smart³ materials solutions growth

Trendanalyse

Zukunft der Funktionswerkstoffe

Politische und ökonomische Entscheidungen brauchen fundiertes Expertenwissen. Doch dafür müssen gesellschaftliche und technologiepolitische Entwicklungen frühzeitig erkannt und benannt werden. Das **Institut für Innovation und Technik (iit)**, eine Querschnittseinrichtung der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, bietet die notwendigen Grundlagen dafür. Bereits seit 2007 arbeiten Expertinnen und Experten Tag für Tag an der Analyse, Forschung und Prognose technologischer und gesellschaftlicher Trends. Das iit ist ein neutraler, zertifizierter Partner für öffentliche Auftraggeber einschließlich Städten und Gemeinden ebenso wie für Unternehmen.

Das vorliegende Dokument ist eine zusammenfassende Analyse der Recherchen des iit sowie eines Workshops, der vom iit gemeinsam mit dem Innovationsnetzwerk smart³ durchgeführt wurde.

Impressum

Herausgeber
Innovationsnetzwerk smart³

Text und Redaktion
Institut für Innovation und Technik in der
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Autorinnen und Autoren
Dr. Julia Kaltschew
Dr. Steffen Uredat
Stephan Richter
Dr. Kerstin Goluchowicz

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4

2 Meinungsbilder 6

2.1 Überblick 6
2.2 Piezokeramiken 8
2.3 Dielektrische Elastomere 9
2.4 Formgedächtnislegierungen 10

3 Publikationsanalyse 12

4 Forschungsaktivitäten 14

5 Patentaktivitäten 17

6 Neue Anwendungsfelder und Materialien 23

6.1 Additive Fertigung (4D-Druck) 23
6.2 Smarte Hydrogele 25
6.3 Soft Robotics 26

7 Fazit 28

1 Einleitung

Funktionswerkstoffe (sog. Smart Materials oder Intelligente Materialien) besitzen die Fähigkeit, ihre Form abhängig von Umweltbedingungen reversibel zu verändern. Sie können u. a. auf die Umgebungstemperatur oder Änderungen von elektrischen und magnetischen Feldern reagieren. Dadurch besitzen sie zusätzliche Funktionalitäten im Vergleich zu herkömmlichen Werkstoffen, welche oft nur durch ihre Struktur definiert und begrenzt sind. Die Vereinigung von Funktionalität und Struktur in einem Werkstoff ermöglicht neue Entwicklungskonzepte und Produktdesigns.

Werkstoffe mit funktionellen Eigenschaften werden bereits in vielen Produkten und Anwendungen als Sensoren und Aktoren eingesetzt. So bilden beispielsweise *piezoelektrische Keramiken* durch ihre schnelle, elektrisch steuerbare Verformung die Grundlage für Bildstabilisatoren in Kamerasystemen. *Thermische Formgedächtnislegierungen* (FGL) und *magnetische Formgedächtniswerkstoffe* (MSM) können ihre Formen abhängig von Temperatur bzw. einem anliegenden Magnetfeld reversibel ändern und werden u. a. in Ventilen im Automobilbereich eingesetzt. *Dielektrische Elastomere* (DEA) sind besonders leichte und kompakte Funktionswerkstoffe und werden beispielsweise in der Robotik als Aktoren verwendet.

Diese vier genannten Gruppen von Funktionswerkstoffen spiegeln den aktuell größten Bereich der Smart Materials wider, wobei sie einem singulären Einsatzzweck als Sensor, Aktor oder Energiewandler dienen. Ihr innovatives Potenzial entfalten sie jedoch erst, wenn sie mit Komponenten aus anderen Technologiebereichen wie der Elektronik und Optik kombiniert werden. In diesem Zusammenspiel werden sie zukünftig unseren Lebensbereich weiter durchdringen und bedingt durch die wachsenden Bedarfe bei Industrie 4.0, Internet of Things, autonomem Fahren und nicht zuletzt durch den Ausbau der 5G-Netze ihren Markt erweitern. Die Zukunft von Funktionswerkstoffen wird sich in einzelnen Bereichen unterschiedlich darstellen, entsprechend kann sich die Bewältigung der technologischen und infrastrukturellen Herausforderungen sehr komplex gestalten.

Produkte und Bauteile weisen stetig steigende Komplexitäten und wachsende gegenseitige Abhängigkeiten auf. Damit steigen neben Störanfälligkeiten häufig auch Platzbedarf und Energieverbrauch. Das **Innovationsnetzwerk smart³** ist bestrebt, Bauteilkomplexität, Platzbedarf und Energieaufwand durch den Einsatz von Smart Materials zu reduzieren. Durch die Integration der Funktionalität direkt in die Struktur soll der Aufbau und damit die Handhabung von Produkten und Bauteilen signifikant vereinfacht werden. Smart³ ist eine Initiative von Unternehmen und Forschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern. Ziel des Netzwerks ist die Entwicklung neuer, innovativer Produkte auf Basis von Smart Materials. Ingenieure, Materialwissenschaftler, Designer, Sozialwissenschaftler und Wirtschaftsexperten arbeiten gemeinsam am kommerziellen Durchbruch entsprechender Produkte in vielfältigen Anwendungsbereichen – von Gesundheit bis Klimaschutz, von Energieerzeugung über Produktionssysteme bis zur Mobilität.
Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, arbeiten die Mitglieder des Netzwerkes in gemeinsamen FuE-Projekten an einem Paradigmenwechsel im Produktverständnis – Bauteilkomplexität, Gewicht und Masse sollen reduziert werden, statt komplexer Funktionsbauteile soll die Funktionalität direkt in die Bauteilstruktur integriert werden.

Im Rahmen einer Trendanalyse zur Zukunft der Funktionswerkstoffe hat das iit im Auftrag von smart³ die Entwicklungstrends für die oben genannten Gruppen von Funktionswerkstoffen erfasst, zukünftige Anwendungsfelder identifiziert sowie den Blick auf bekannte Anwendungsfelder vertieft. Ein ausgeglichener Methodenmix verschiedener Analyse- und Erhebungsinstrumente (Sekundärdatenanalyse, Experteninterviews, softwaregestützte Visualisierung) ermöglichte eine fundierte Analyse. Zu der Sekundärdatenanalyse gehörten eine Bestandsaufnahme vorhandener Literatur zu Anwendungsfeldern von Funktionswerkstoffen sowie eine Recherche in Patent- und Förderdatenbanken. Dabei wurden die Entwicklungspotenziale etablierter Anwendungsfelder sowie potenziell neue Anwendungsfelder der einzelnen Materialklassen explizit mitbetrachtet. Die Experteninterviews wurden standardisiert mit fünf Experten aus dem Innovationsnetzwerk smart³ durchgeführt. Um die recherchierten Daten zusammenzufassen und zu visualisieren wurde die Software Tableau genutzt.

2 Meinungsbilder

Im Innovationsnetzwerk smart³ sind zurzeit Wirtschaftsunternehmen und Forschungseinrichtungen organisiert, die in den Materialklassen Piezokeramiken, dielektrische Elastomere und Formgedächtnislegierungen aktiv sind. Im Folgenden werden wesentliche Markt- und Forschungsentwicklungen der letzten Jahre in diesen Materialsystemen dargestellt. Wesentliche Informationsquelle für diese Darstellung sind standardisierte Fachinterviews mit fünf Expertinnen und Experten aus dem Netzwerk smart³.

2.1 Überblick

In piezoelektrischen Keramiken (PC) und dielektrischen Elastomeren (DEA) können elektrische Spannungsänderungen bei Formänderungen durch äußere Krafteinwirkung festgestellt werden. Diese Eigenschaft kann in Kraft- bzw. Drucksensoren und zur Erzeugung von elektrischer Energie aus mechanischer Arbeit genutzt werden. Umgekehrt kann durch Anlegen einer elektrischen Spannung auch eine reversible Formänderung von Bauteilen herbeigeführt werden. Entsprechend können diese Materialien sowohl in Sensoren als auch in Aktoren zum Einsatz kommen.

Thermischen Formgedächtnislegierungen (FGL) kann bei hohen Temperaturen eine Form eingeprägt werden. Bei Abkühlung unter eine materialspezifische Phasenumwandlungstemperatur können die Materialien deformiert werden, kehren bei Überschreiten dieser Temperatur jedoch wieder in die eingeprägte Form zurück. Auch diese Eigenschaft lässt sich für Aktoren nutzen. Bei besonderen magnetischen FGL tritt dieser Effekt zusätzlich auch bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes auf.

Im Gegensatz zu Bauteilen, die diese modernen Funktionswerkstoffe nutzen, sind pneumatische Aktoren und induktiv arbeitende Elektromotoren, Linearantriebe (auch in Ventilen) und Kraftsensoren seit langer Zeit in industriellen Anwendungen etabliert. Jahrzehntelange Optimierungen, nachgewiesene Zuverlässigkeit und Langlebigkeit sowie eine große Verfügbarkeit an Standardbauteilen aus etablierten Materialien machen es den Funktionswerkstoffen schwer, in bestehende Anwendungsbereiche vorzudringen. In großen Industriebereichen besteht ferner der Bedarf an zuverlässigen Simulationsmöglichkeiten von Materialien und Baugruppen, die für Funktionswerkstoffe noch nicht im gleichen Maße entwickelt oder verfügbar sind wie für herkömmliche Materialen.

Für eine zunehmende Akzeptanz und Nutzung von Funktionswerkstoffen müssen im Wesentlichen folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

- Gewährleistung und Nachweis von reproduzierbaren Materialeigenschaften und langzeitiger Zuverlässigkeit von Baugruppen aus Funktionswerkstoffen
- Verfügbarkeit von Standardbauteilen oder einfacher Zugang zu Fertigungsverfahren für angepasste Bauteile (3D/4D-Druck)
- Entwicklung zuverlässiger Simulationsmethoden, die die Simulation von Funktionsbaugruppen von der Herstellung bis zum Lebensende schon in der Designphase erlaubt („digitaler Zwilling“)

Diese Kriterien sind insbesondere im industriellen Umfeld und bei sicherheitsrelevanten Anwendungen, etwa in der Luftfahrt, entscheidend. Darüber hinaus bieten Funktionswerkstoffe jedoch auch neue Designmöglichkeiten und Anwendungen im Consumer- und Wellnessbereich, die

geringere Anforderungen an Langlebigkeit und Zuverlässigkeit stellen, dafür aber die Möglichkeit bieten, sich von Wettbewerbern abzusetzen. Beispiele hierfür sind in Sporttextilien tragbare Sensoren, die es erlauben, die Bewegung während sportlicher Aktivitäten zu verfolgen oder haptische Elemente auf glatten Oberflächen, die die Haptik eines Schalters oder Tasters unter den Fingerspitzen des Anwenders nachahmen. Derartige Anwendungen lassen sich vor allem im Premiumbereich einer Produktpalette verorten, etwa bei Bedienelementen im Fahrzeuginnenraum.

Mit Hilfe von Funktionswerkstoffen lassen sich Aktoren und Sensoren aufbauen, die deutlich kompakter sind als klassische, induktiv arbeitende Baugruppen. Alternativ können auch großflächige Druck- und Kraftsensoren erzeugt werden, die mit anderen Technologien allenfalls mit sehr großem Aufwand aufgebaut werden könnten. Überall dort, wo der Bauraum stark begrenzt ist oder sehr große Strukturen benötigt werden, haben diese Materialien also deutliche Vorteile gegenüber klassischen Lösungsansätzen und ermöglichen neue Anwendungen.

Die Verschmelzung von Form und Funktion sowie die monolithische Integration verschiedener Materialien in einem Werkstück sind wichtig, um diese Vorteile auch effektiv nutzen zu können. Hierdurch treten Herausforderungen sowohl bei der Produktion als auch am Lebensende eines Produkts auf:

- Es werden Produktionsverfahren benötigt, die eine monolithische Kombination von Funktionswerkstoffen und Bauteilen aus anderen Materialen ermöglichen. Hier wurden in den letzten Jahren deutliche Fortschritte auf dem Gebiet der Dünnschichtabscheidung von FGL und PC sowie im 3D-Druck von Funktionsmaterialen gemacht. Für diese Art der additiven Fertigung hat sich inzwischen der Begriff „4D-Druck“ etabliert.
- Die Kombination verschiedener Materialien in einem Bauteil erschwert ein Recycling der Materialien am Ende der Lebenszeit eines Bauteils. Dieser Aspekt muss bereits in der Designphase beachtet werden. Zusätzlich müssen effektive Verfahren zur Rückgewinnung von Wert- und Gefahrenstoffen entwickelt und die für die Etablierung notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen geschaffen werden.

Funktionswerkstoffe ermöglichen eine extreme Miniaturisierung von funktionalen Baugruppen und sind damit wesentliche Voraussetzung für minimalinvasive Chirurgie und andere medizinische Anwendungen. Entsprechend stellen medizintechnische Anwendungen einen großen Markt für Funktionswerkstoffe dar, für die ein erheblicher Entwicklungsaufwand betrieben wird.

Ein weiteres aufstrebendes Anwendungsfeld ist die Energiegewinnung für autarke elektrische Geräte. Das alltägliche Umfeld wird immer reicher an kleinen elektronischen Geräten, etwa in Türschließanlagen und Sensoren im Fahrzeugbereich, die mit Energie versorgt werden müssen. Das Fortschreiten von Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge lässt den Bedarf an kompakten Energieversorgungen weiter ansteigen. Eine Versorgung mit Batterien ist aus ökonomischen und ökologischen Aspekten nicht geeignet, diesen Bedarf zu befriedigen. Kleine Generatoren, die aus Bewegungen und Vibrationen im Gerät Strom erzeugen können, sind hier eine zukunftstaugliche Alternative. Der Fortschritt bei der Entwicklung PC- und DEA-basierter Minigeneratoren einerseits und der Fortschritt bei der Entwicklung energiesparender elektronischer Bauteile durch neue Halbleitertechnologien wie z. B. advanced-CMOS-(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) und FDSOI-(Fully Depleted Silicon On Insulator) Technologie andererseits ermöglichen eine Lösung zukünftiger Energieprobleme.

2.2 Piezokeramiken

Der piezoelektrische Effekt wird bereits seit vielen Jahrzenten technisch genutzt. Entsprechende Bauteile sind in jedem Lebensbereich zu finden. Spätestens mit der Nutzung als Zündfunkengeneratoren in Feuerzeugen sind sie in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts im Consumerbereich angekommen. Heute finden sie in Einspritzventilen, Ultraschallsensoren, Festplatten und Digitalkameras weite Verbreitung. Obwohl piezoelektrische Bauteile seit langem etabliert sind, ist in den vergangenen Jahren ein Marktzuwachs von 7,5 bis 10 % zu beobachten. Dass dieser Trend abklingt, ist auch in den nächsten fünf Jahren nicht zu erwarten.

Einfache Massenartikel wie Geräuschgeneratoren („Buzzer“), die in billiger Unterhaltungselektronik, Rauchmeldern etc. eingesetzt werden, werden derzeit ausschließlich in Ostasien produziert. Hochwertige Bauteile, etwa für medizinische Anwendungen, Mikropumpen und für industrielle Roboteraktoren werden aber nach wie vor in Europa und den USA entwickelt und in großem Maßstab auch hier hergestellt und vertrieben.

Prinzipiell lassen sich zwei grundlegend verschiedene Anwendungen unterscheiden: Das Anlegen einer Spannung kann in mechanische Arbeit umgewandelt werden oder mechanische Arbeit kann zum Erzeugen einer Spannung genutzt werden. Ersteres nutzt man zur schnellen und präzisen Verstellung von optischen und mechanischen Komponenten (Aktor), letzteres für Sensoren und zur Energiegewinnung (Harvesting). In Verbindung mit der Mikrosystemtechnologie lassen sich hierfür äußerst kompakte elektromechanische Baugruppen (MEMS-Micro-Electro-Mechanical Systems) aufbauen. Typische Anwendungen sind verstellbare Mikrospiegel, Bubblejet-Druckköpfe, Mikrofone und Drucksensoren.

Piezokeramiken eignen sich hervorragend für die Generierung und Detektion von Ultraschall und finden daher seit langem eine breite Anwendung in der Ultraschalldiagnostik für die Medizin und Materialprüfung. Bei den medizinischen Anwendungen werden piezokeramische Komponenten in den letzten Jahren vermehrt in der Chirurgie (Piezochirurgie) verwendet: mit der Piezochirurgie können selektiv Knochen bearbeitet werden, während weiches Gewebe, wie Muskeln und Nerven, unbeschädigt bleibt.

Weitere Anwendungen finden Piezo-Elemente überall in der industriellen Automation, wo sie z. B. für Ultraschallsensoren zur Füllstands- und Durchflussmessung sowie zur Schwingungskontrolle genutzt werden.

In Luft- und Raumfahrt, Fahrzeugtechnik, Architektur und bei Windkraftanlagen wird vermehrt Leichtbauweise eingesetzt. Diese erfordert eine verstärkte Überwachung der Struktur, um Überlastungen zu vermeiden oder Materialermüdung rechtzeitig entgegenwirken zu können. Entsprechend nimmt die Bedeutung des Structure Health Monitoring (SHM) zu. Hier können Piezokeramiken wesentliche Beiträge leisten: Krafteinwirkungen auf Bauteile und Verformungen können mit Piezosensoren detektiert werden. Gleichzeitig können Piezogeneratoren als Energy-Harvester eingesetzt werden, um Sensoren in schlecht zugängigen Positionen, etwa an den Flügeln von Windkraftanlagen, autark mit Strom zu versorgen.

Weitere Impulse verspricht man sich von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) mit Piezoschichten. Die Grundlagen für die hierfür notwendige Beschichtungstechnologie konnten bereits im technischen Maßstab realisiert werden. Hierauf basierend werden in den nächsten Jahren

zunehmend MEMS-basierte, miniaturisierte Funktionseinheiten wie Mikrofone und Lautsprecher für Hörgeräte und Mikropumpen auf den Markt kommen.

Im Rahmen der zunehmenden Datenerfassung und -weiterleitung sowie der Steuerung alltäglicher Prozesse aus der Entfernung im Zuge der Gebäudeautomatisierung, des Internets der Dinge und der Industrie 4.0 entsteht ein wachsender Bedarf an kompakten Energieversorgern für die entsprechenden Funktionselemente. Schließlich können nicht all diese Elemente über Kabel und Batterien mit Energie versorgt werden. Hier werden zunehmend piezoelektrische Generatoren eingesetzt. So lassen sich beispielsweise Taster realisieren, die ohne Zuleitung auf die Wand montiert werden können. Bei Betätigung des Tasters wird die Kompression eines Piezoelements genutzt, um elektrische Energie für einen integrierten Sender zu erzeugen, der die Betätigung des Tasters an einen Empfänger, beispielsweise in einer Lampenfassung, meldet. Die Entwicklung solcher energieautarken Systeme setzt neben Entwicklungen der Energy-Harvester („Energieernter“) auch die Entwicklung immer energiesparenderer Elektronikbauteile (Energieverbraucher) voraus. Der allgemeine Trend zur Entwicklung immer energieeffizienterer Elektronik befördert damit auch neue Einsatzmöglichkeiten für Energy-Harvester.

Neue Anwendungsbereiche stellen Piezohaptics dar. Dies sind flache Piezoaktoren, die über Vibration haptische Reize übertragen können und so tastbare Felder auf glatten Flächen simulieren. Anwendungen hierfür finden sich in speziell designten Bedienfeldern, überwiegend an Elektrogeräten und in Automobilen im Premiumsegment.

Industriell eingesetzte Piezokeramiken basieren in der Regel auf Bleiverbindungen (Blei-Zirkonat-Titanat, PZT). Aufgrund der RoHS-Verordnung der EU (EU-Richtlinie 2011/65/EU, Restriction of Hazardous Substances), die die Verwendung von gesundheitsschädlichen Schwermetallen einschränken soll, besteht die Gefahr, dass die Verwendung dieses Material rechtlich eingeschränkt wird. Die Erforschung alternativer, bleifreier Piezokeramiken ist daher wichtig, um eine langfristige Perspektive für Piezokeramiken zu sichern. Erste Produkte auf Basis von bleifreiem Bismut-Natrium-Titanat sind inzwischen auf dem Markt verfügbar, haben jedoch im Vergleich zu PZT einen beschränkteren Einsatztemperaturbereich und schlechtere mechanische Eigenschaften. Auf diesem Gebiet besteht damit perspektivisch noch großes Entwicklungspotenzial.

Wesentliche Fortschritte für die Produktion und Handhabung von Piezo-Elementen wurden durch die Einführung der sog. Cofiring-Technologie erzielt, die die großtechnische Herstellung von piezoaktiven Folien ermöglicht, die zu Stapeln konfektioniert werden können. Neben der weitreichenden Konfektionierbarkeit von Aktoren ergab sich hieraus auch die Möglichkeit, Aktoren mit geringeren Spannungen anzusteuern.

2.3 Dielektrische Elastomere

Die dielektrischen Elastomere (DEA) können, wie die Piezokeramiken, als Aktoren und Sensoren bzw. Energy-Harvester eingesetzt werden. Vor zehn Jahren wurden große Hoffnungen in DEA gesetzt, die jedoch bislang nur ansatzweise erfüllt werden konnten. Eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Etablierung von DEA-Produkten ist die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger, langzeitstabiler Elastomermaterialien mit gut reproduzierbaren Eigenschaften. Während anfangs hohe Erwartungen in Polyurethan und Polyethin gesetzt wurden, hat sich inzwischen Silikon als gut geeignetes Material erwiesen. Silikonfolien hierfür werden derzeit mit gut einstellbaren und reproduzierbaren Eigenschaften großtechnisch hergestellt und die Industrie sieht sich hier am

Einstiegspunkt zum Massenmarkt. Zielmärkte für die Anwendung von dielektrischen Elastomeren sind vornehmlich die Medizintechnik, Automobil-Anwendungen und Anwendungen im Bereich der Elektronik. Große Innovationspotenziale liegen aber auch in den Bereichen Energiegewinnung und Wearables, also in der Kleidung integrierter elektronischer Funktionsgruppen.

In der aktuellen Entwicklungsphase kann noch nicht auf nachgewiesene Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit verwiesen werden und es gibt noch keine Aktoren und Sensoren als Katalogware. Chemieunternehmen arbeiten daher derzeit mit kleinen Unternehmen und Start-ups zusammen, um Demonstratoren zu entwickeln, mit denen weitere Unternehmen in der Wertschöpfungskette adressiert werden können. So wird derzeit an Wellenkraftwerken gearbeitet, bei denen natürliche Wellenbewegungen auf Gewässern genutzt werden, um Energy-Harvester anzuregen, deren Wirkungsprinzip auf dielektrischen Elastomeren beruht.

Am Körper bzw. in der Kleidung platzierte Sensoren können Bewegungen und Körperhaltungen von Personen erfassen, die für die Optimierung sportlicher Aktivitäten, Anwendungen rund um den Bereich Virtuelle Realität oder auch für therapeutische Maßnahmen nutzbar sind.

2.4 Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnislegierungen (FGL) weisen in ihrem Betriebstemperaturintervall einen Phasenumwandlungspunkt auf, an dem sich die mechanischen Eigenschaften des Materials signifikant ändern. Insbesondere lässt sich in das Material eine Form einprägen, in die das Material auch nach einer mechanischen Verformung beim Übergang von der Tieftemperaturphase in die Hochtemperaturphase immer wieder zurückkehrt. Hierbei treten auch in kleinen Werkstücken bereits große Kräfte auf, so dass sich dieser Effekt hervorragend für Aktoren eignet, wobei bereits kleine Aktoren große Kräfte entfalten. Aufgrund der thermischen Trägheit lassen sich thermische FGL jedoch nur bei langsamen Prozessen als Aktoren einsetzen. Maximale Aktionsfrequenzen liegen im Hz-Bereich. Überdies besitzen FGL nur eine beschränkte zyklische Stabilität, d.h. bei sehr häufigem Schalten zwischen verschiedenen Formen können Funktionseinschränkungen auftreten. Idealerweise werden thermische FGL daher dort eingesetzt, wo nur wenige Aktionen durchgeführt werden müssen und diese nicht zeitkritisch hinsichtlich des Umwandlungszeitpunkts zwischen Hoch- und Tieftemperaturphase sind.

Bedeutende Anwendungen liegen daher beispielsweise in der minimalinvasiven Chirurgie, wo kleinste Aktoren in Arthroskopie, Endoskopie und Colonoskopie zum Einsatz kommen oder für Implantate, die sich erst am Zielort entfalten (z. B. Stents).

Ein wesentlich schnelleres und zeitlich exakteres Schaltverhalten wird durch magnetische FGL ermöglicht. Bei diesen Materialien kann ein Wechsel zwischen der Hoch- und der Niedrigtemperaturphase alternativ durch äußere Magnetfelder ausgelöst werden. Da es mit Elektromagneten möglich ist, Magnetfelder schnell auf- und abzubauen, kann das Schalten von FGL sehr gut und zeitgenau kontrolliert werden. Hiermit können Formwechsel im kHz-Bereich ermöglicht werden. Trotz dieser positiven Eigenschaft werden magnetische FGL bislang kaum in größerem Umfang eingesetzt.

Bei potenziellen Anwendern werden FGL oft mit herkömmlichen metallischen Materialien verglichen. So werden FGL durch ihren, verglichen mit Stahl oder Kuper, höheren Preis negativ wahrgenommen, ohne in diesem Vergleich ihren besonderen Eigenschaften Rechnung zu tragen. Vor allem aber

unterscheiden sich FGL in ihrer Verarbeitbarkeit deutlich von herkömmlichen metallischen Werkstoffen und potenzielle Anbieter verfügen somit häufig nicht über die Ausstattung und Fähigkeiten, um FGL zu verarbeiten. Insbesondere die Möglichkeit, durch Kombination mit anderen Materialien kompakte und effiziente Baugruppen zu erzeugen, kann daher oft nicht genutzt werden. Die additive Fertigung von Bauteilen aus FGL kombiniert mit einer gut zugänglichen Infrastruktur von Dienstleistern, bei denen diese Fertigung durchgeführt werden kann, bzw. erschwingliche Drucker für FGL für die Eigenfertigung, kann hier die Verwertung der besonderen Eigenschaften der FGL nachhaltig befördern.

Die Fortschritte auf dem Gebiet der Laser-gestützten additiven Fertigung von FGL (Selective Laser Melting SLM und Laser Engineering Net Shape LENS) eröffnen hier neue Möglichkeiten. Ein Netzwerk aus Dienstleistern ist dabei von großem Vorteil.

3 Publikationsanalyse

Um einen Überblick über die internationale wissenschaftliche Publikationslandschaft zum Thema Smart Materials zu erlangen, wurden internationale, wissenschaftliche Publikationen – hierzu zählen Fachartikel, Konferenzbeiträge, Review-Artikel und Umfragen – analysiert. Die Anzahl der Peer-Review-Artikel ist ein gängiger Indikator, um wissenschaftliche Tätigkeiten an Hochschulen und Forschungseinrichtungen abzubilden. Der thematische Schwerpunkt lag auf thermischen und magnetische Formgedächtnislegierungen, dielektrischen Elastomeren, Piezokeramiken und Smart Materials. Da die meisten wissenschaftlichen Arbeiten in englischer Sprache verfasst werden, wurden für die Recherche die englischen Begriffe „(ferromagnetic) shape memory alloy, „piezoceramic/piezoelectric ceramic“, „dielectric elastomer“ und „smart material“ genutzt.

In Abbildung 1 ist der Verlauf der jährlich publizierten Fachartikel für die oben genannten Materialklassen dargestellt. Dabei wird Smart Material als Sammelbegriff verwendet, unter dem verschiedenste Anwendungen und Materialien zusammengefasst werden. Die Anzahl der jährlich publizierten Fachartikel ist auf internationaler Ebene seit dem Jahr 2000 insgesamt deutlich angestiegen. Obwohl die Publikationsraten in allen wissenschaftlichen Disziplinen aufgrund einer steigenden Anzahl von Fachjournalen in den letzten Jahren zugenommen haben, deutet diese Vervielfachung der wissenschaftlichen Artikel auf eine sehr dynamische Entwicklung im Bereich der Funktionsmaterialien hin.

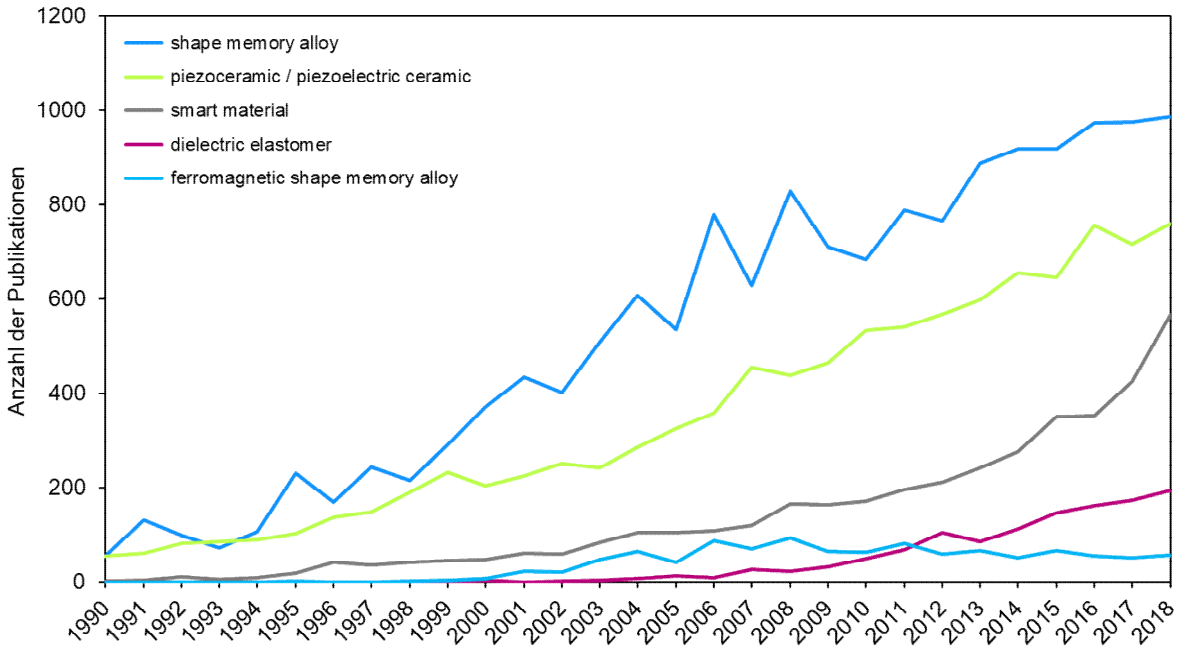

Abbildung 1: Anzahl der jährlichen wissenschaftlichen Publikationen auf internationaler Ebene (Darstellung © VDI/VDE-IT)

Zwischen 2013 und 2018 wurde die größte Anzahl an Publikationen zu Formgedächtnislegierungen und Piezokeramiken veröffentlicht. Während die Publikationsrate für ferromagnetische Formgedächtnislegierungen stagnierte, stieg diese für alle anderen untersuchten Materialklassen deutlich an. Insbesondere konnten Veröffentlichungen zu Smart Materials in den letzten drei Jahren ein starkes Wachstum verzeichnen. Dies deutet darauf hin, dass sich der Begriff der Smart Materials

in der wissenschaftlichen Gemeinschaft als Sammelbegriff für verschiedene Materialgruppen zunehmend etabliert hat.

Eine Auswertung der Publikationen nach Herkunftsland zeigt, dass in Deutschland ansässige Forschungseinrichtungen im Zeitraum von 2013 bis 2018 – nach China und den USA – zu den publikationsstärksten gehörten (Abbildung 2). Diese gute Position könnte Deutschland in den kommenden Jahren jedoch verlieren, weil die Anzahl der jährlich publizierten Fachartikel hierzulande nicht maßgeblich zugenommen hat. Der inhaltliche Fokus lag in Deutschland zwischen 2013 und 2018 vor allem auf den Formgedächtnislegierungen. Mehr als die Hälfte der deutschen Publikationen sind auf diesem Gebiet.

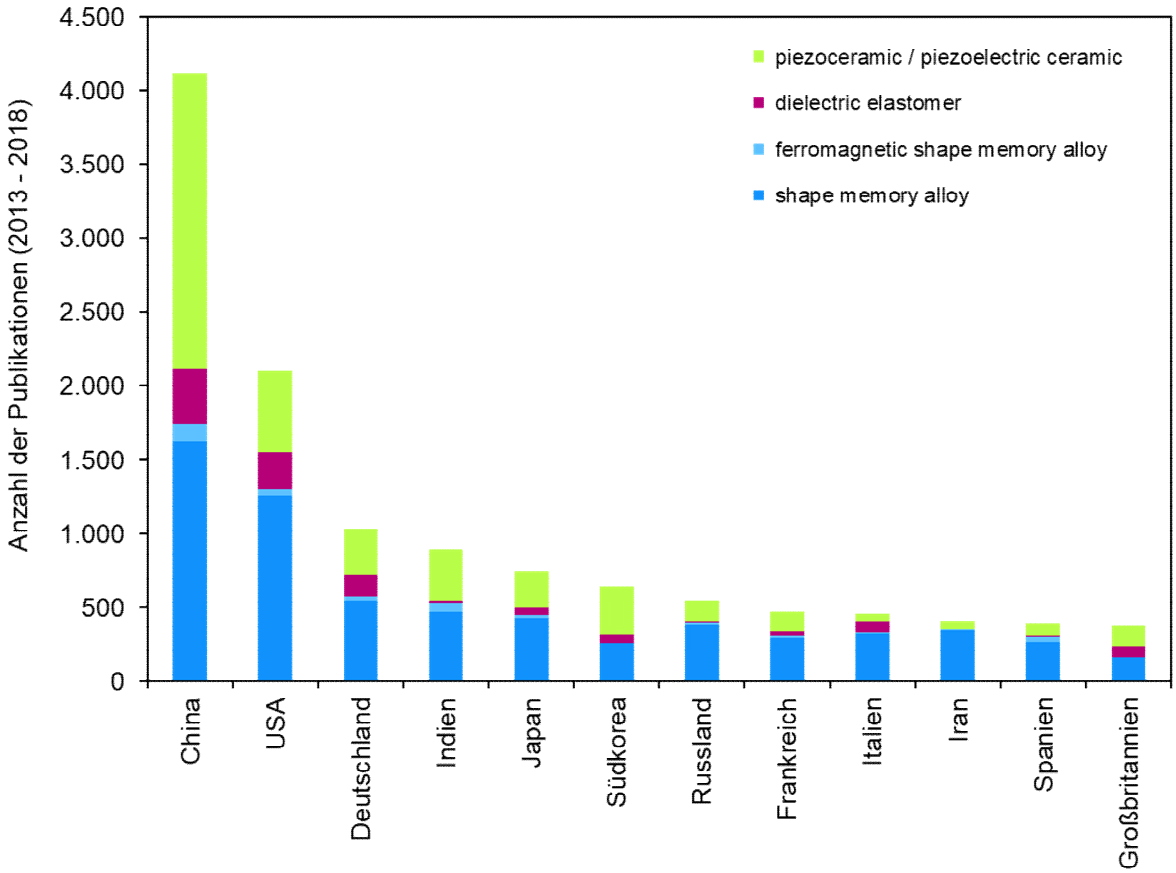

Abbildung 2: Anzahl wissenschaftlichen Publikationen je Land (Top 12) für die Jahre 2013-2018 (Darstellung © VDI/VDE-IT)

Während in den meisten Ländern der Top 12 die wissenschaftlichen Aktivitäten an Hochschulen und Forschungseinrichtungen schwerpunktmäßig auf Formgedächtnislegierungen ausgerichtet sind, nimmt der publikationsstärkste Akteur China im internationalen Vergleich eine Sonderrolle ein. Hier lag die inhaltliche Ausrichtung zwischen 2013 und 2018 vor allem auf Piezokeramiken.

Im Vergleich zu den Piezokeramiken und Formgedächtnislegierungen ist die Publikationsrate für dielektrische Elastomere deutlich geringer.

4 Forschungsaktivitäten

Mit einer Analyse von europäischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten (FuE-Projekte) können aktuelle Themen und Schwerpunkte der europäischen Forschungsförderung identifiziert werden. Hierfür wurden europäische FuE-Aktivitäten unter Nutzung des Community Research and Development Information Service (CORDIS) des Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienstes der Europäischen Union genutzt. Im betrachteten Zeitraum zwischen 2008 und 2019 gab es insgesamt 86 Projekte in 65 unterschiedlichen EU Programmen, Calls und Individual Fellowship Actions mit Beteiligungen aus 37 Ländern. Die Anzahl der zum Teil bereits abgeschlossenen Projekte wird im zeitlichen Verlauf in Abbildung 3 dargestellt. Dabei wurden die Aktivitäten für die Materialklassen Formgedächtnislegierungen (15 abgeschlossene und 7 noch laufenden Projekte), der piezoelektrischen Keramiken (4 abgeschlossene und 1 laufendes Projekt) und dielektrische Elastomere (3 abgeschlossene und 1 laufendes Projekt) sowie Projekte unter dem Sammelbegriff Smart Materials (40 abgeschlossene und 15 noch laufenden Projekten) dargestellt.

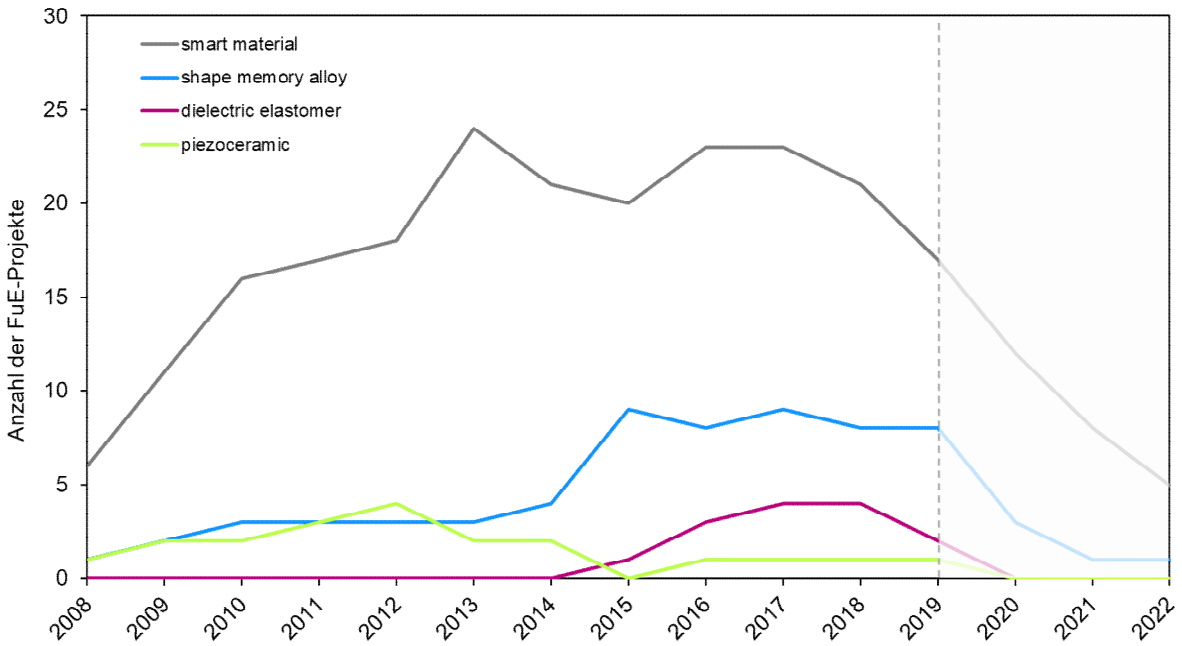

Abbildung 3: Anzahl der jährlichen laufenden europäischen FuE-Projekte zwischen 2008 und 2019 (Darstellung © VDI/VDE-IT)

Der inhaltliche Fokus lag und liegt vor allem auf Projekten im Kontext Formgedächtnislegierungen (22 Projekte) und Smart Materials (45 Projekte). Die Projektbearbeitung erfolgt unter starker deutscher, britischer, spanischer, französischer, italienischer und niederländischer Beteiligung sowohl in der Einzelländerförderung als auch in großen länderübergreifenden Projekten. Dies zeigt sich sowohl hinsichtlich der bewilligten Fördervolumina für die einzelnen Organisationstypen (vgl. Abbildung 4) als auch in der Anzahl der Projektbeteiligungen. Hierbei wurde in Deutschland und Großbritannien der größte Anteil der Fördersummen an privatwischaftliche Unternehmen gezahlt.

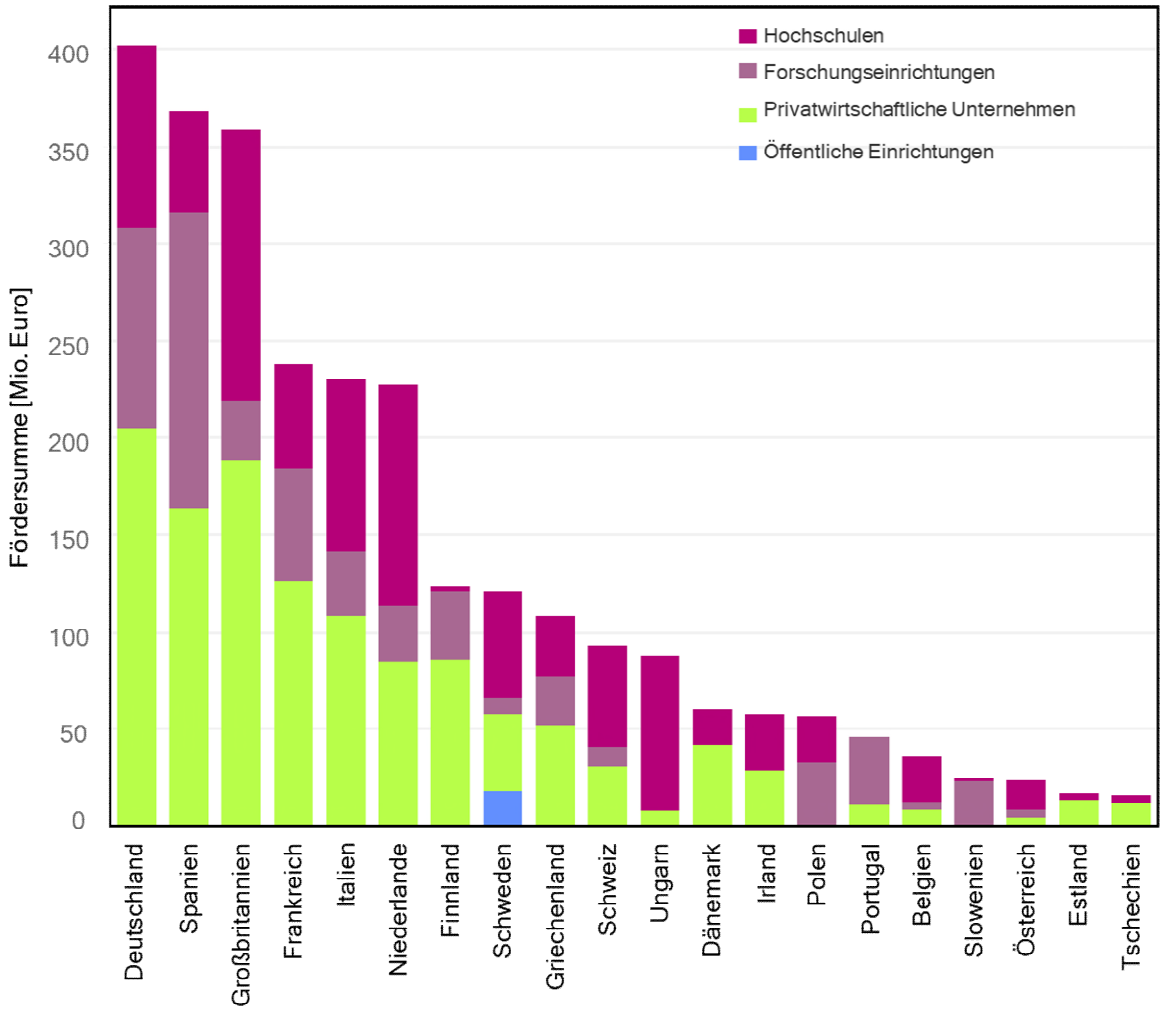

Abbildung 4: Länderanteile des Fördervolumens europäischer FuE-Projekte (Darstellung © VDI/VDE-IT)

Wie die Darstellung nach Organisationsform zeigt, variiert die Verteilung der Förderung in den einzelnen Ländern für Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Hochschulen und andere öffentliche Einrichtungen stark. Zu den meistgeförderten europäischen Universitäten im Bereich der Funktionsmaterialien gehören die University of Cambridge (UK), die Technische Universiteit Delft und Technische Universiteit Eindhoven (NL), die Linköpings Universitet (SE), die Politechnika Lubelska (PL) und die Friedrich-Alexander Universität Nürnberg-Erlangen (DE). Die beiden niederländischen Universitäten erweisen sich hierbei zudem als wichtige europäische Netzwerkpartner.

Zu den Top 5 der privatwirtschaftlichen Unternehmen gehören Arquimea Ingeniería S.L.U. (ES), Phi Drive Srl (IT), Philips Electronics Nederland B.V. (NL), Elastimed Ltd. (IL) und Noliac A/S (DK). Dabei handelt es sich neben Philips Electronics, die auch als Forschungs- und Entwicklungsdienstleistunger tätig sind, um Anbieter für elektronische, mikroelektronische und elektromechanische Systeme und Komponenten, hochpräzise Antriebe und Positioniersysteme, intelligente medizinische Geräte sowie hochwertige piezoelektrische Komponenten als Mono- oder Mehrschichtprodukte.

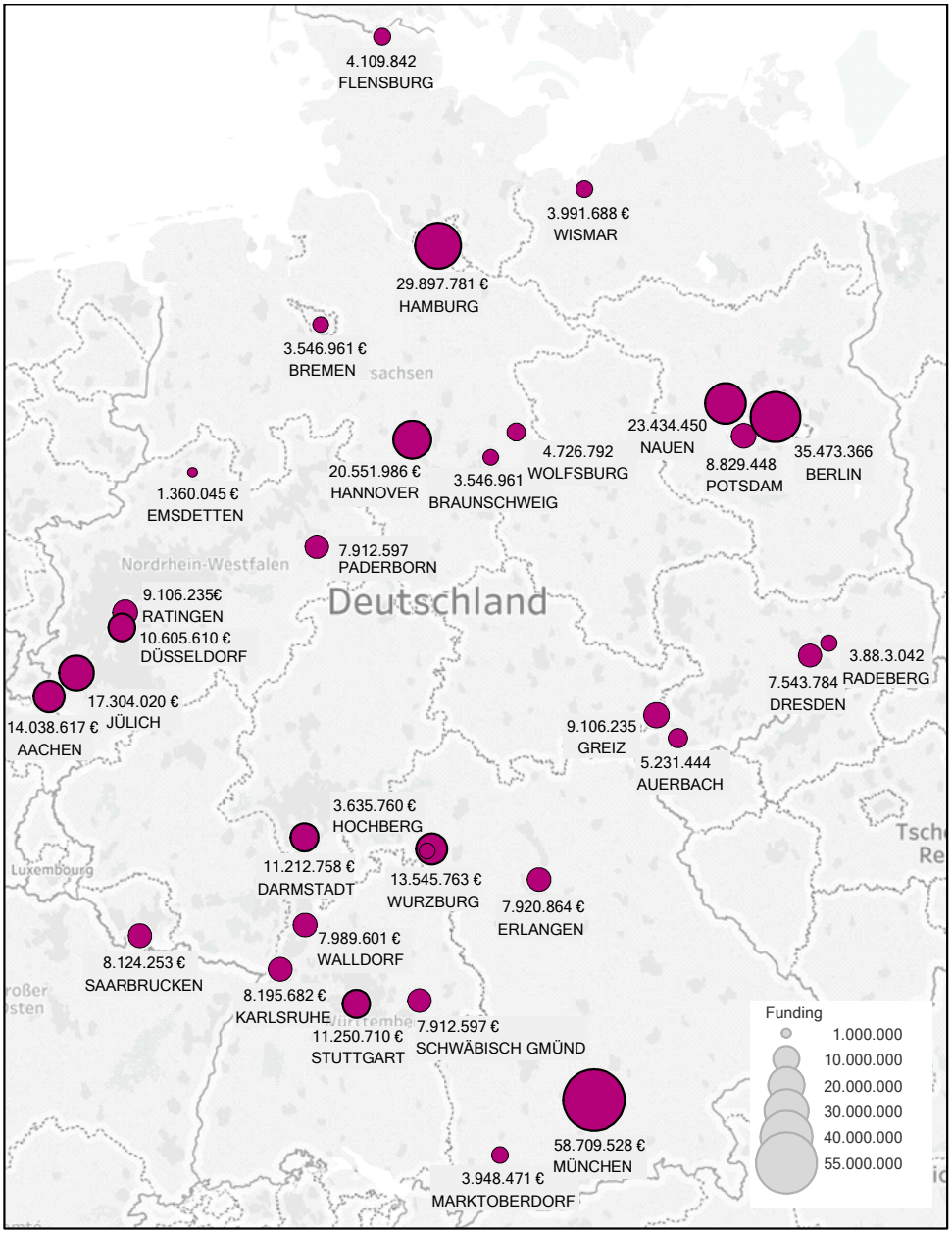

Abbildung 5: Anteil des Fördervolumens in D an europäischen FuE-Projekte von 2008 bis 2019 (Darstellung © VDI/VDE-IT)

In Abbildung 5 wird der Standortanteil des Fördervolumens in Deutschland an europäischen FuE-Projekten zwischen 2008 und 2019 dargestellt. Die höchsten Fördersummen gingen an das Forschungszentrum Jülich GmbH, die Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V., die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, das Max Planck Institut für Eisenforschung GmbH, das Deutsche Zentrum für Luft -und Raumfahrt e.V. sowie die Stiftung FZI Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie. Im Ländervergleich der am stärksten vertretenden sechs Länder (DE, ES, UK, FR, IT und NL) zeigt der Vergleich der Top 20 der am stärksten geförderten Organisationen, dass das Forschungszentrum Jülich mit Abstand die höchste Einzelförderung erhalten hat bzw. erhält.

5 Patentaktivitäten

Eine Auswertung von Patenten, die in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Funktionswerkstoffe angemeldet oder erteilt wurden, verschafft einen Einblick in zukünftige Anwendungsfelder der betrachteten Materialklassen. Zudem lassen sich Trends bei neuen Funktionsmaterialien erkennen.

Es wurde eine Neuheitsrecherche mit DEPATISnet[1] durchgeführt, mit dem auf das elektronische Dokumentenarchiv DEPATIS (Deutsches Patentinformationssystem) des Deutschen Patent- und Markenamts zugegriffen werden kann.

Mit einer initialen Übersichtsabfrage wurden Patente über alle Patentämter (Deutschland, Europa, USA, Japan etc.) in den Jahren 1990 bis 2018 recherchiert. Dabei wurden die übergeordneten Begriffe „piezoelectric“, „shape memory“, „electroactive polymer“ und „smart material“ in der Titelsuche verwendet. Die Anzahl der Treffer setzt sich aus den angemeldeten und erteilten Patenten zusammen. Eine nähere Erläuterung der Suchbegriffe befindet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Suchbegriffe für die Patentrecherche

Suchbegriff	Erläuterung
„piezoelectric“	Es wurde der Suchbegriff „piezoelectric“ statt „piezoceramic“ verwendet, um die Recherche möglichst umfassend zu gestalten. Viele Erfindungen, die auf dem Gebiet der Piezokeramiken angemeldet werden, verwenden im Titel eine allgemeinere Beschreibung wie beispielsweise „piezoelectric element“ oder „piezoelectric device“. So konnten alle Patente zu Piezokeramiken erfasst werden.
„shape memory“	Unter dem Suchbegriff „shape memory“ wurden alle Anmeldungen auf dem Gebiet der Formgedächtnislegierungen zusammengefasst. Eine Unterscheidung in thermische und magnetische Formgedächtnislegierungen ist nicht möglich, da dies im Titel meistens nicht angegeben wird. Eine einzelne Abfrage der magnetischen Formgedächtnislegierungen erzeugt nur eine sehr kleine Trefferzahl.
„electroactive polymer“	Die dielektrischen Elastomere gehören zur Gruppe der elektroaktiven Polymere. Da die direkte Suche nach den dielektrischen Elastomeren nur eine sehr geringe Trefferzahl lieferte, wurde der erweiterte Suchbegriff „electroactive polymer“ verwendet.
„smart material“	Unter der Bezeichnung „smart material“ sind nur wenige Patente verzeichnet. Dies ist damit zu erklären, dass der Begriff „smart material“ zu allgemein ist für eine erfolgreiche Patentanmeldung. In den meisten Fällen ist die Spezifizierung der Materialklasse notwendig für die Erteilung. Aufgrund der geringen Trefferzahl für den Begriff „smart material“ wird diese Klasse bei der Auswertung der Patentrecherche nicht weiter betrachtet.

[1] https://depatisnet.dpma.de/

Die Anzahl der angemeldeten und erteilten Patente in den Materialklassen „piezoelectric“, „shape memory“ und „electroactive polymer“ ist in Abbildung 6 dargestellt. Es wurde hierbei das Jahr der Anmeldung betrachtet. Da für neue Patentanmeldungen eine Offenlegungsfrist von 18 Monaten gilt, d. h. die Patente in dieser Zeit geheim bleiben und nicht recherchierbar sind, werden bei der Analyse nur die Zahlen bis 2016 berücksichtigt. Neue Patentanmeldungen aus den Jahren 2017 und 2018 sind noch nicht vollständig veröffentlicht.

Die Anzahl der Patente auf dem Gebiet der Piezokeramiken steigt seit Mitte der 1990er Jahr stetig an und erreichte ein Maximum im Jahr 2011. In dem Jahr gab es ca. 3,7 Mal so viele Patente wie im Jahr 1993. Seit diesem Höhepunkt ist die Anzahl der Patente leicht rückläufig und befindet sich 2016 etwa auf dem gleichen Niveau wie 2003. Auch die Patentzahlen für Formgedächtnislegierungen steigen seit den 1990er Jahren stetig an und befinden sich seit 2008 auf einem unveränderten Plateau – ca. 7,5 Mal so hoch wie Anfang der 1990er Jahre. Bei den elektroaktiven Polymeren ist erst ab 2000 eine signifikante Anzahl von Patenten zu verzeichnen. Hier gibt es ein Maximum im Jahr 2006 mit ca. 200 angemeldeten und erteilten Patenten. Danach ist die Anzahl der Patente wieder rückläufig und sinkt bis zum Jahr 2016 auf ein Viertel des Maximalwertes. Insgesamt ist festzuhalten, dass weltweit innerhalb der drei betrachteten Materialklassen die meisten Patente für Piezokeramiken angemeldet bzw. erteilt werden.

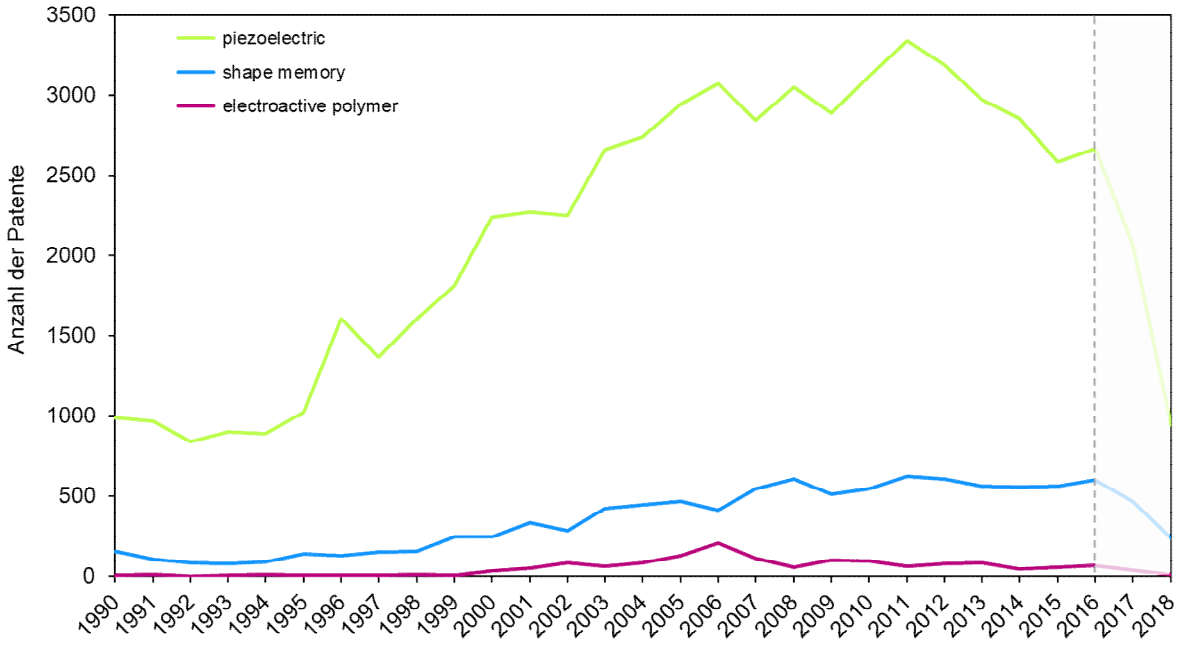

Abbildung 6: Anzahl der Patentanmeldungen von 1990 bis 2018 nach Materialklasse (Darstellung © VDI/VDE-IT)

In der Abbildung 7 sind die Patentanmeldungen in den drei Materialklassen nach vier ausgewählten Patentämtern dargestellt. Die einzelnen Patentämter werden in Tabelle 2 kurz dargestellt.

Auch hier werden die Daten aufgrund der 18-monatigen Offenlegungsfrist nur bis zum Jahr 2016 berücksichtigt, da neue Patentanmeldungen aus den Jahren 2017 und 2018 noch nicht vollständig veröffentlicht sind. Für die Recherche beim deutschen und europäischen Patentamt wurden die deutschen Übersetzungen der Suchbegriffe verwendet („piezoelektrisch“, „Formgedächtnis“ und „elektroaktive Polymere“).

Tabelle 2: Patentämter

Patentamt	Erläuterung
DE	Alle Patente, die in Deutschland angemeldet wurden und deren Patentnummern mit den Buchstaben „DE“ beginnen.
EP	Alle Patente, die beim europäischen Patentamt angemeldet wurden. Nach Erteilung kann gewählt werden, in welchen der 38 Vertragsstaaten des europäischen Patentübereinkommens das Patent gelten soll. Der Ländercode für die Patentnummern ist „EP“.
US	Alle Patente, die in den USA angemeldet wurden und deren Patentnummern mit den Buchstaben „US“ beginnen.
WO	Alle internationalen Patente, die bei der Weltorganisation für Geistiges Eigentum, einem Zusammenschluss aus 152 Vertragspartnern, angemeldet wurden. Die Erteilung der Patente erfolgt anschließend in ausgewählten nationalen Phasen. Der Ländercode für die Patentnummern ist „WO“.

In dem Vergleich der vier verschiedenen Patentämter ist erkennbar, dass sich die zeitlichen Verläufe der Anzahl der Patentanmeldung für einzelne Materialklassen unterscheiden.

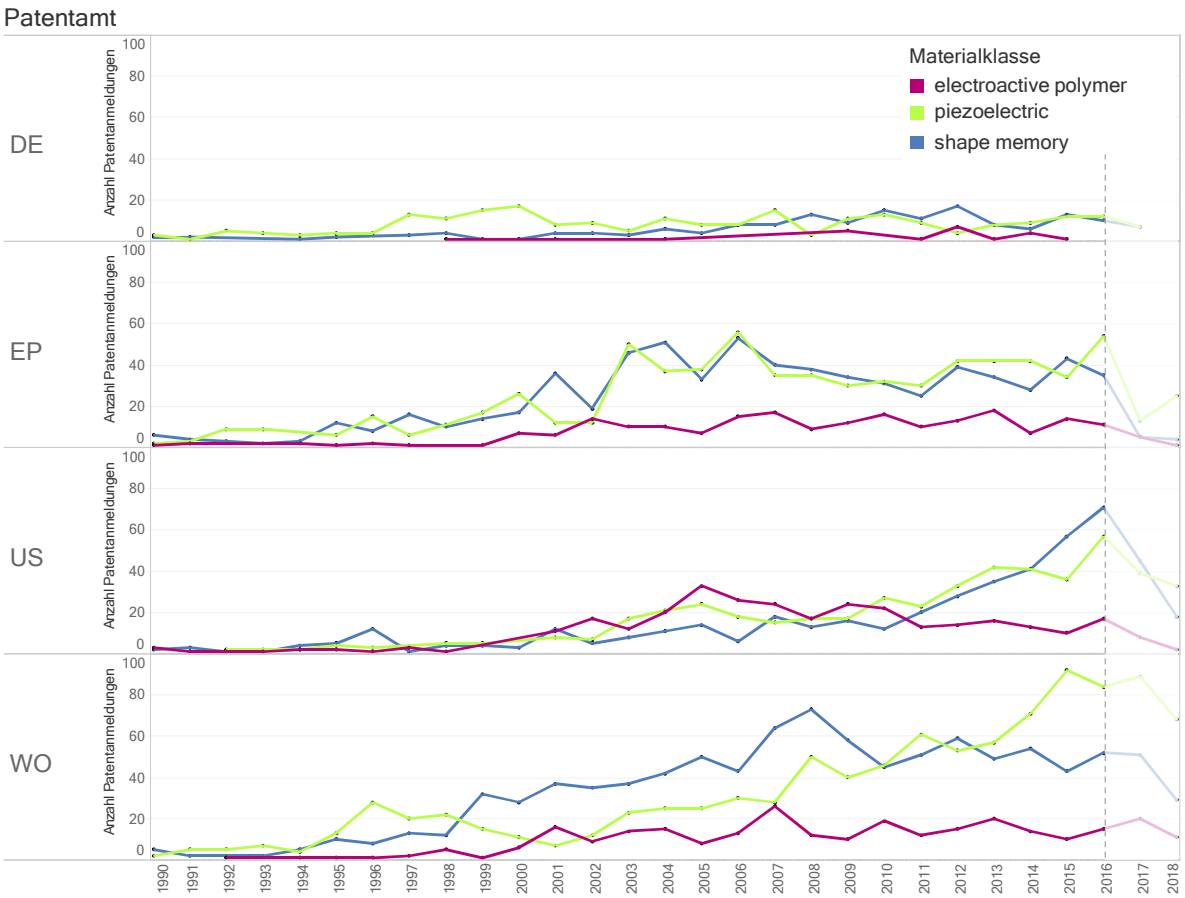

Abbildung 7: Zeitliche Auswertung der erteilten Patente nach Materialklasse und Patentamt (Darstellung © VDI/VDE-IT)

Während in Deutschland und Europa die Zahl der Anmeldungen im Bereich Piezokeramiken in den letzten Jahren stagniert, ist in den USA und weltweit ein deutlich ansteigender Trend erkennbar. Bei den Formgedächtnislegierungen sind die Zahlen nur in den USA in den letzten Jahren ansteigend, während in Deutschland, Europa und weltweit in den letzten 10 bis 15 Jahren ein leicht abfallender Trend erkennbar ist. Nur bei den dielektrischen Elastomeren sind die Zahlen für die Patentanmeldungen in allen vier betrachteten Patentämtern rückläufig.

Im Vergleich zu der Auswertung über alle verfügbaren Patentämter in Abbildung 6 sind die Anzahl der Patentanmeldungen bei Piezokeramiken und Formgedächtnislegierungen in der Auswertung nach Patentämtern (Abbildung 7) in der gleichen Größenordnung. Nur die Anzahl der angemeldeten Patente für elektroaktive Polymere ist geringer. Diese signifikant höhere Anzahl der Piezokeramiken liegt an der großen Zahl von Anmeldungen aus Asien (Japan, Korea) in diesem Themengebiet.

In Abbildung 8 ist die Anzahl der Patentanmeldungen nach Herkunft der Patentanmelder dargestellt. Ausgewertet wurden hier wieder die Anmeldungen bei den vier Patentämtern DE, EP, US und WO. In der Abbildung ist deutlich erkennbar, dass japanische Institutionen vor allem viele Patente für Piezokeramiken anmelden. Bei den Institutionen aus den USA dominieren die Patentanmeldungen für Formgedächtnislegierungen deutlich vor den elektroaktiven Polymeren. Anmeldungen für Piezokeramiken gibt es relativ gesehen aus den USA nur wenige.

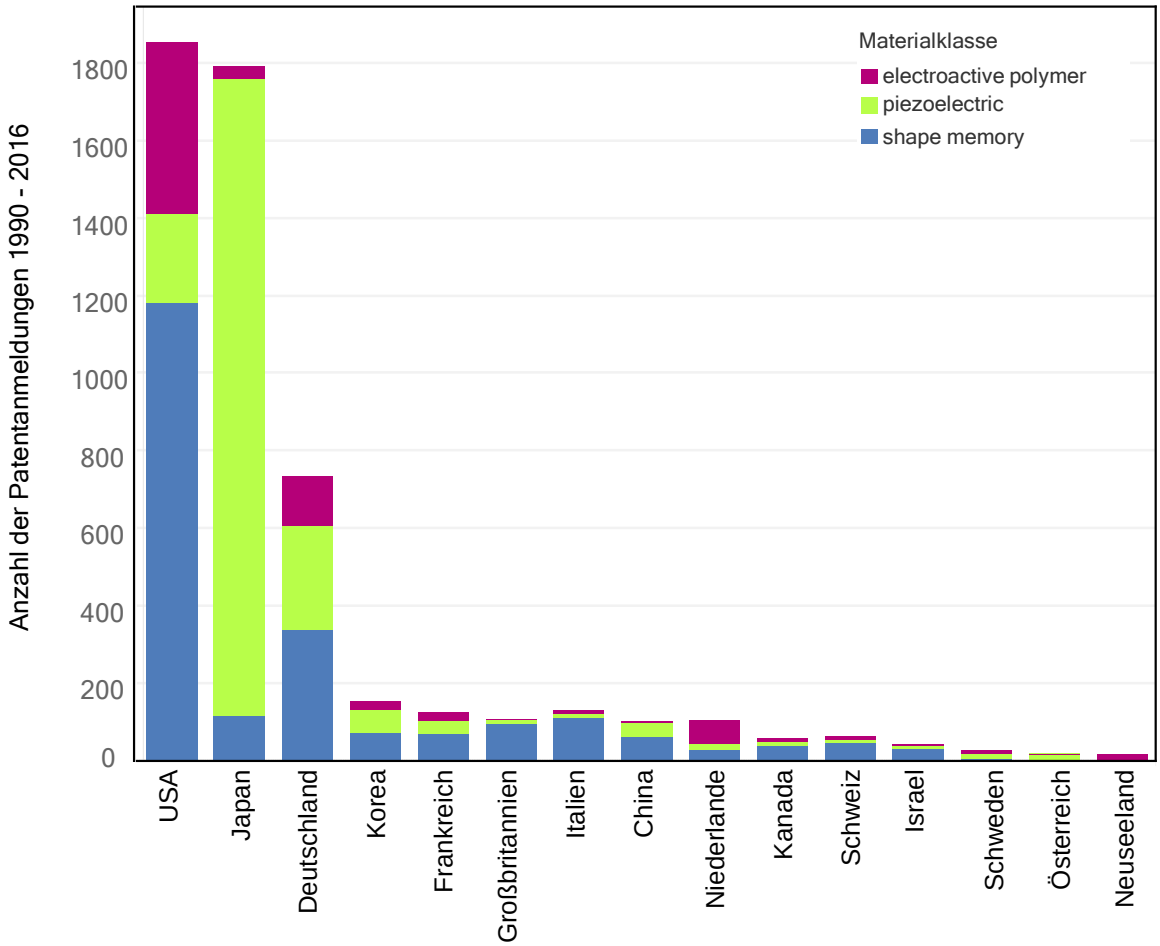

Abbildung 8: Anzahl der Patentanmeldungen je Land (Top 15) für die Jahre 1990 bis 2016 (Darstellung © VDI/VDE-IT)

Die meisten deutschen Anmeldungen sind auf dem Gebiet der Formgedächtnislegierungen gefolgt von Piezokeramiken und elektroaktiven Polymeren. Deutschland ist bei der Anzahl der Anmeldungen, summiert über alle drei Materialklassen, auf dem dritten Platz hinter den USA und Japan. Danach fällt die Kurve steil ab, so dass die genannten drei Länder als die einflussreichsten Anmelder in den ausgewählten Materialklassen angesehen werden können.

Tabelle 3: IPC-Klassifizierung

IPC	Bezeichnung
Sektion A	Täglicher Lebensbedarf
Sektion C	Chemie; Hüttenwesen
Sektion H	Elektrotechnik
Klasse A61	Medizin oder Tiermedizin; Hygiene
Klasse C08	Organische makromolekulare Verbindungen; deren Herstellung oder chemische Verarbeitung; Massen auf deren Basis
Klasse H01	Grundlegende elektrische Bauteile
Klasse H03	Grundlegende elektronische Schaltkreise

Patentanmeldungen werden gemäß der Internationalen Patentklassifikation (IPC) in acht Sektionen klassifiziert. Jede Sektion ist in der zweiten Hierarchieebene in Klassen unterteilt. Die Auswertung der IPC-Klassen zeigt, dass viele Patente in den betrachteten Materialklassen zum größten Teil in die gleichen vier IPC Hauptklassen eingeteilt werden. Die Klassen sind in Tabelle 3 beschrieben.

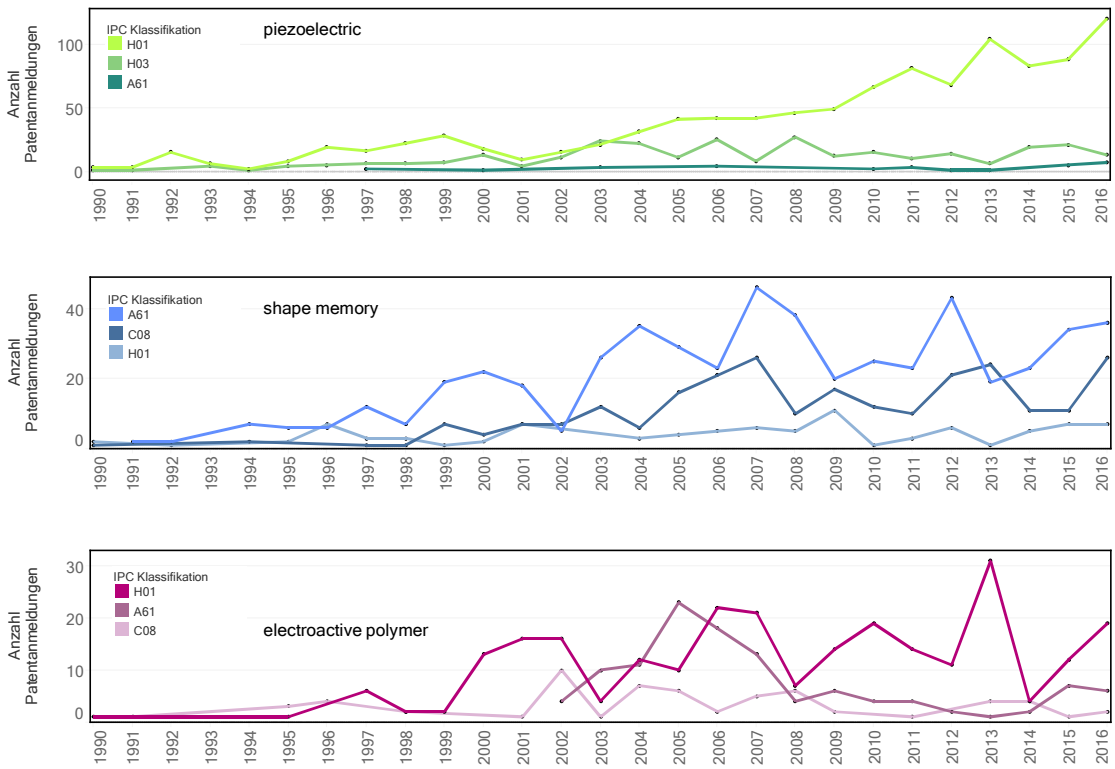

Abbildung 9: IPC-Klassifikation der Patentanmeldungen (Darstellung © VDI/VDE-IT)

Eine Auswertung der am häufigsten verwendeten Klassen für die einzelnen Materialien ist in Abbildung 9 dargestellt.

Bei den Piezokeramiken dominieren die elektrotechnischen Anwendungen (z. B. Stellvorrichtungen) während bei den Formgedächtnismaterialien eher Anwendungen im medizintechnischen oder chemischen Bereich (z. B. medizinische Implantate oder Formgedächtnispolymere) im Vordergrund stehen. Die Anmeldungen von dielektrischen Polymeren befinden sich hauptsächlich im elektrotechnischen (z. B. Energiewandler) oder medizintechnischen Bereich (z. B. künstliche Muskeln).

6 Neue Anwendungsfelder und Materialien

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Diskursanalyse wurden die Überschriften und Abstracts von mehr als 15.000 internationalen, wissenschaftlichen Publikationen – hierzu zählen Fachartikel, Konferenzbeiträge, Review-Artikel und Umfragen – analysiert, die zwischen 2014 und 2018 zu den Schwerpunkten Smart Materials, Formgedächtnislegierungen, dielektrische Elastomere und Piezo-Werkstoffe veröffentlicht wurden. Ziel war es, aktuelle „Material- und Anwendungstrends“ zu identifizieren, die in der internationalen Wissenschafts-Community zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Aufbauend auf die wissenschaftlichen Diskursanalyse wurden – im Abgleich mit den Meinungsbildern der interviewten Experten und der Förderdatenbank-Analyse sowie in Abstimmung mit dem Netzwerk smart³ – drei strategische Themenschwerpunkte (Trendthemen) ausgewählt, in denen sich das Netzwerk smart³ und seine Partnerinstitutionen und -unternehmen gut positionieren könnten, um zukünftige Potenziale von Funktionswerkstoffen frühzeitig zu erschließen und strategische Partnerschaften rechtzeitig auf- und auszubauen Abbildung 10.

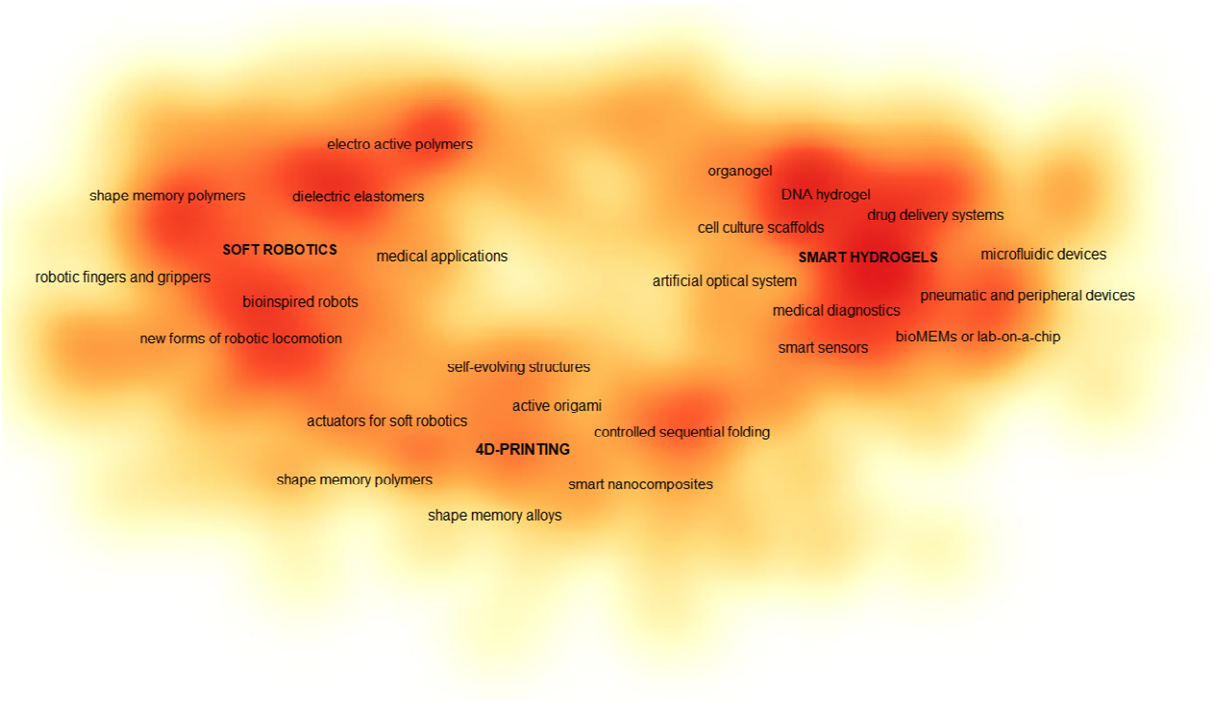

Abbildung 10: Trendthemen für Smart Materials (Darstellung © VDI/VDE-IT)

6.1 Additive Fertigung (4D-Druck)

Die dynamische Entwicklung, welche die additive Fertigung - häufig auch als 3D-Druck[2] bezeichnet - in den vergangenen Jahren durchlaufen hat, hält weiter an. Dies führt zu einem stark wachsenden Markt von Gütern und Dienstleistungen und bringt eine Vielzahl neuer Anbieter (Maschinen und

[2] Auf eine Übersicht der gängigen 3D-Druckverfahren kann unter folgendem Link zugegriffen werden: Ritter, Steffen (2018): formnext AM FIELD GUIDE. Eine praktische Orientierungshilfe für die spannende Welt der generativen Fertigung. 1. Auflage. Stuttgart: Mesago Messe Frankfurt GmbH.

Dienstleistungen) und Anwender mit sich. Deutsche Unternehmen sind aktuell führend in der Anwendungserfahrung. Es folgen die USA, Großbritannien und andere EU-Staaten vor China und Südkorea.

Mit der zunehmenden Implementierung der Produktionstechnologie in der Industrie werden auch die unterschiedlichen 3D-Druckverfahren weiterentwickelt und neue druckbare Materialien erforscht. 3D-gedruckte smarte Materialien und Strukturen, die ihre Form oder Eigenschaften unter dem Einfluss von äußeren Reizen verändern, sind seit einigen Jahren in den Fokus der Forschung gerückt. Für additiv gefertigte smarte Materialien und Strukturen hat sich seither der Begriff „4D-Druck“ durchgesetzt, welcher auf die strukturelle Rekonfiguration als Reaktion auf äußere Reize im Laufe der Zeit (4. Dimension) verweist.

Die aktuellen Forschungsaktivitäten im Kontext 4D-Druck fokussieren entweder auf die additive Fertigung eines spezifischen intelligenten Werkstoffs oder den Multi-Material-Druck. Zu den Beispielen von additiv verarbeiteten smarten Materialien gehören u. a. smarte Nanomaterialien, Formgedächtnislegierungen und Formgedächtnispolymere: Im DPP-Verfahren (Direct Print Photopolymerization) wurden piezoelektrische Polymere, im SLM-Verfahren (Selective Laser Melting) wurden NiTi-Komponenten und im MJ-Verfahren (PolyJet oder MultiJet) wurden Formgedächtnispolymere hergestellt. Der Multi-Material-Druck von smarten Materialen wird bisher vor allem im MJ-Verfahren (PolyJet oder MultiJet) umgesetzt. Es wurden bspw. DEA-Aktoren für Soft-Robotik-Anwendungen gedruckt, sich selbst entfaltende Strukturen, die die Bewegung natürlicher Vorbilder wie Samenkapseln oder Insektenflügel nachahmen, aber auch „smarte“ Origami.

Anders als bei herkömmlichen Herstellungsverfahren können im 4D-Druck sehr kleine und/ oder komplexe Strukturen problemlos umgesetzt werden. Zudem konnten die „smarten Eigenschaften“ verbessert werden – beispielsweise der piezoelektrischer Koeffizient der piezo-Polymere. Da der 4D-Druck noch ein recht junges Entwicklungsfeld ist, sind weder die additiven Verfahren noch die smarten Materialien „marktreif“ entwickelt. Über zukünftige Anwendungsfelder wird bisher noch spekuliert.

Weiterführende Literatur

Choi, Jin; Kwon, O-Chang; Jo, Wonjin; Lee, Heon Ju; Moon, Myoung-Woon (2015): 4D Printing Technology. A Review. In: *3D Printing and Additive Manufacturing* 2 (4), S. 159–167.

Gladman, A. Sydney; Matsumoto, Elisabetta A.; Nuzzo, Ralph G.; Mahadevan, L.; Lewis, Jennifer A. (2016): Biomimetic 4D printing. In: *Nature materials* 15 (4), S. 413–418.

Khoo, Zhong Xun; Teoh, Joanne Ee Mei; Liu, Yong; Chua, Chee Kai; Yang, Shoufeng; An, Jia et al. (2015): 3D printing of smart materials. A review on recent progresses in 4D printing. In: *Virtual and Physical Prototyping* 10 (3), S. 103–122.

Momeni, Farhang; M. Mehdi Hassani; N, Seyed; Liu, Xun; Ni, Jun (2017): A review of 4D printing. In: *Materials & Design* 122, S. 42–79.

Tibbits, Skylar (2014): 4D Printing. Multi-Material Shape Change. In: *Archit Design* 84 (1), S. 116–121.

6.2 Smarte Hydrogele

Hydrogele bestehen aus wasserunlöslichen, hydrophilen Polymeren, die in einem dreidimensionalen Netzwerk miteinander verknüpft sind. Die Vernetzung der Polymere im Hydrogel kann auf Basis kovalenter Bindung, ionischer Bindung, Van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrückenbildung und weiteren dipolaren Wechselwirkungen beruhen oder aus einem Zusammenwirken eben dieser.

Der Begriff des Hydrogels wurde erstmalig Ende des 19. Jahrhunderts in der Wissenschaft gebräuchlich. Hundert Jahre später, seit Anfang des 21. Jahrhunderts, werden Hydrogele zunehmend auch als smarte Materialien verwendet. Diese smarten Hydrogele können gerichtet auf externe Stimuli reagieren, z. B. auf Änderungen der Temperatur, des pH-Werts, der Lichtintensivität und des elektrischen Felds. Entsprechend der externen Stimuli wird in der Regel zwischen temperatur- und licht-empfindlichen Hydrogelen sowie solchen, die auf den pH-Wert und ein elektrisches Feld reagieren, unterschieden. Deren „smarte“ Eigenschaften werden hauptsächlich durch Polymer-Polymer- und Polymer-Lösungsmittel-Wechselwirkungen bestimmt und stehen im Fokus der Forschungsaktivitäten rund um smarte Hydrogele.

Die aktuelle Forschungslandschaft fokussiert vor allem auf temperaturempfindliche Hydrogele. Diese haben die Fähigkeit, reversible Volumen-Phasenübergänge als Reaktion auf geringe Veränderungen ihrer Umgebungstemperatur zu durchlaufen. Poly(N-Isopropylacrylamid) (pNIPAm) ist mit Abstand das am weitesten verbreitete temperaturempfindliche Hydrogel-Polymer. Eine weitere intensiv untersuchte Gruppe sind die pH-empfindlichen Hydrogele, deren Volumen sich bei pH-Änderung reversibel verändert. Die Netzwerk-Bausteine solcher Hydrogele sind Polymere, die schwach sauer oder basisch sind, wie z. B. Poly(acrylsäure) oder Chitosan. Für die Herstellung von lichtempfindlichen Hydrogelen werden funktionelle Gruppen, bspw. Chromophoren wie Azobenzolen, in die Hydrogelnetze integriert. Bei Belichtung erhöht sich der osmotische Druck in solchen Hydrogelen und führt zu einer reversiblen, lichtinduzierten Quellung. E-Feld-empfindliche Hydrogele bestehen aus einem Netzwerk aus polyionischen Ketten. Durch die Induktion eines E-Feldes binden mobile Ionen an das Polymernetzwerk und sammeln sich an verschiedenen Stellen innerhalb des Hydrogels. Diese erhöhen dort den osmotischen Druck, was zu einer anisotropen Quellung im Hydrogel führt.

Ein Merkmal, das alle smarten Hydrogele teilen, ist die Fähigkeit von reversiblen Volumenänderungen, die durch äußere und innere Stimuli initiiert werden. Aufgrund dessen, dass dieses "on/off-Quellverhalten“ in vielen Fällen unter physiologischen Bedingungen induziert werden kann, bieten sich eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Medizintechnik an. Smarte Hydrogele werden als „aktor-fähige“ Biomaterialien eingesetzt, z. B. als künstliche Muskeln, Mikrofluid-Systeme für die medizinische Diagnostik, bio-aktive Gerüste für die Zellkultur und als Sensoren oder BioMEM-Systeme zur Messung verschiedenster Moleküle. Darüber hinaus werden smarte Hydrogele als „drug delivery systems“ eingesetzt: Sie können Medikamente reizgesteuert (z. B. bei spezifischen Temperaturen oder pH-Werten) an einem spezifischen Ort, verabreichen. Obwohl smarte Hydrogele viele potenzielle Anwendungsmöglichkeiten bieten, sind diese häufig noch nicht wirtschaftlich erschlossen. Die Ursache hierfür liegt darin, dass in vielen Fällen die physikalischen Eigenschaften von smarten Hydrogelen noch nicht ausreichend untersucht wurden und ihre auf spezifische Eigenschaften ausgelegte Synthese äußerst komplex ist.

Weiterführende Literatur

Buwalda, Sytze J.; Boere, Kristel W. M.; Dijkstra, Pieter J.; Feijen, Jan; Vermonden, Tina; Hennink, Wim E. (2014): Hydrogels in a historical perspective. From simple networks to smart materials. In: *Journal of controlled release: official journal of the Controlled Release Society* 190, S. 254–273.

Koetting, Michael C.; Peters, Jonathan T.; Steichen, Stephanie D.; Peppas, Nicholas A. (2015): Stimulus-responsive hydrogels. Theory, modern advances, and applications. In: *Materials science & engineering. R, Reports: a review journal* 93, S. 1–49.

Lim, Han L.; Hwang, Yongsung; Kar, Mrityunjoy; Varghese, Shyni (2014): Smart hydrogels as functional biomimetic systems. In: *Biomater. Sci.* 2 (5), S. 603–618.

Qiu, Yong; Park, Kinam (2001): Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. In: *Advanced Drug Delivery Reviews* 53 (3), S. 321–339.

Ullah, Faheem; Othman, Muhammad Bisyrul Hafi; Javed, Fatima; Ahmad, Zulkifli; Md Akil, Hazizan (2015): Classification, processing and application of hydrogels. A review. In: *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 57, S. 414–433.

6.3 Soft Robotics

Roboter werden seit ca. 50 Jahren in der industriellen Fertigung eingesetzt, anfangs vor allem für die Übernahme von monotonen und gefährlichen Aufgaben innerhalb der unterschiedlichsten Produktionsprozesse. In den vergangenen Jahren haben sich die Einsatzfelder robotischer Systeme jedoch stark erweitert. So übernehmen Roboter schon heute nicht nur in der Industriehalle wichtige Aufgaben, sondern dringen vermehrt auch in unseren Alltag vor, z. B. als Staubsauger- oder Mähroboter.

Mit der Erschließung neuer Anwendungsfelder und der Entwicklung hin zu einer kollaborativen Robotik in der Industrie werden an robotische Systeme auch neue Anforderungen gestellt, z. B. bei der Gestaltung. Roboter bestehen bis heute überwiegend aus zusammengesetzten starren Gliedern, deren Verbindungsgelenke ihnen eine Bewegung ermöglichen. Da Roboter zukünftig immer enger mit dem Menschen zusammen arbeiten sollen - in der Fabrik wie auch im privatem und gewerblichem Umfeld – besteht der Wunsch, die aktuellen starren Systeme hin zu „weichen“, beweglichen Robotern zu entwickeln, u. a. um Verletzungspotenziale im direkten Umgang mit den Robotern zu minimieren. Diese Entwicklungsbemühungen bündeln sich im Kontext der sogenannten „Soft Robotics“. Für die Soft Robotic-Aktuatoren werden zunehmend smarte Materialien eingesetzt, vor allem Formgedächtnispolymere (FGP) und Elektroaktive Polymere (EAP) bzw. dielektrische Elastomere (DE), die Weichheit und Flexibilität miteinander verbinden und reizgesteuert komplexe Bewegungen ausführen können.

Der Nature Fokus „Soft Robotics“ [3] von 2018 listet verschiedene Anwendungsbeispiele aus dem wissenschaftlichen Kontext auf, häufig bioinspirierte Roboter aus smarten Materialien, die das Bewegungsverhalten von Regenwürmern, Bakterien oder Kraken nachahmen können. In der Praxis finden sich erste Anwendungsbeispiele in der Medizin. So wurden bereits chirurgische Instrumente auf Basis von „Soft Robotic“-Komponenten realisiert. Zudem wurden unterschiedliche „softe“

[3] Abrufbar unter https://www.nature.com/collections/wpsbvwhdyh

robotische Greifsysteme und Finger umgesetzt. Auch in der Pflege und Rehabilitation sollen zukünftig robotische Systeme mit weichen, flexiblen Komponenten zum Einsatz kommen, die das Personal bei alltäglichen Aufgaben unterstützen. Weitere interessante Einsatzbereiche finden sich überall dort, wo eine maximale Mobilität in unstrukturierten Geländen Voraussetzung für den Einsatz von Robotern ist.

Weiterführende Literatur

Laschi, Cecilia; Mazzolai, Barbara; Cianchetti, Matteo (2016): Soft robotics. Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities. In: *Sci. Robot.* 1 (1), eaah3690.

Rus, Daniela; Tolley, Michael T. (2015): Design, fabrication and control of soft robots. In: *Nature* 521 (7553), S. 467–475.

Schmitt, François; Piccin, Olivier; Barbé, Laurent; Bayle, Bernard (2018): Soft Robots Manufacturing. A Review. In: *Front. Robot. AI* 5, S. 34224.

Shian, Samuel; Bertoldi, Katia; Clarke, David R. (2015): Dielectric Elastomer Based "Grippers" for Soft Robotics. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 27 (43), S. 6814–6819.

Shintake, Jun; Cacucciolo, Vito; Floreano, Dario; Shea, Herbert (2018): Soft Robotic Grippers. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, e1707035.

Yang, Yang; Chen, Yonghua; Li, Yingtian; Chen, Michael Z. Q.; Wei, Ying (2017): Bioinspired Robotic Fingers Based on Pneumatic Actuator and 3D Printing of Smart Material. In: *Soft robotics* 4 (2), S. 147–162.

7 Fazit

Smarte Werkstoffe ermöglichen heute schon eine Vielzahl neuer Anwendungen. Sie treten hierbei jedoch in der Regel in einem konservativ geprägten Umfeld an und können sich zunächst nur in Anwendungen durchsetzen, in denen sie einen echten Mehrwert darstellen. Damit müssen sie sich an Qualitäts-, Zuverlässigkeits- und Preismaßstäben lange bekannter und bewährter Werkstoffe messen lassen. Der Weg zur Nutzung des großen Potenzials smarter Materialien führt daher nicht über eine Integration der Werkstoffe um der neuen Werkstoffe Willen, sondern über anwendungsorientierte Entwicklungen, die auf konkrete Produkte abzielen und mit herkömmlichen Werkstoffen nicht realisiert werden können. Beispiele hierfür gibt es in der Medizintechnik, der Robotik, sowie bei Energy-Harvestern für eine Vielzahl von Endanwendungen. Um das Potenzial neuer, smarter Werkstoffe zu nutzen, müssen viele Kräfte zusammenwirken. Es besteht daher der Bedarf an einem starken Netzwerk, um dieses Zusammenwirken zu gestalten. Eine besonders große Aufgabe eines Smart-Material-Netzwerks ist es, Industrie und Forschung in Kontakt zu bringen, um anwendungs- und produktorientierte Kooperationsprojekte zu ermöglichen. Das Netzwerk muss hierfür breit aufgestellt sein, sowohl was die Anzahl von Forschungs- und Industriepartnern betrifft, als auch im Hinblick auf die im Netzwerk vertretenen Materialklassen. Denn insbesondere Industrieunternehmen scheuen es aufgrund des damit verbundenen Kosten- und Ressourcenaufwands, sich in einer Vielzahl verschiedener Netzwerke zu engagieren. Ein Smart-Materials-Netzwerk sollte sich überdies nicht nur auf anfänglich identifizierte Materialklassen beschränken, sondern stets auch neue Materialklassen integrieren.

Die Voraussetzungen für die Nutzung des Potenzials smarter Werkstoffe sind dabei in Deutschland sehr günstig: Hier treffen eine gute Forschungsinfrastruktur und eine hoch entwickelte Industrie zusammen. Die Publikations- und Patentstatistiken belegen, dass Deutschland hier im internationalen Vergleich im Spitzenfeld angesiedelt ist. Ferner werden in Deutschland auch Produkte im Premiumsegment gefertigt, bei denen höhere Kosten investiert werden können, um sich so vom Wettbewerb abzuheben. Einmal für das Premiumsegment getätigte Entwicklungen können anschließend auch den Weg in eine breitere Anwendung finden.

Eine weitere Barriere die überwunden werden muss, um neue Werkstoffe zu nutzen, ist der Zugriff auf Maschinen und Know-how zur Verarbeitung der Materialien. Auch in der Organisation einer entsprechenden Infrastruktur, die auch kleinen Unternehmen in Nischenmärkten bedienen und Start-ups die Nutzung smarter Werkstoffe ermöglicht, liegt eine wichtige Aufgabe eines Netzwerks. Insbesondere bei den Formgedächtniswerkstoffen ermöglichen additive Fertigungsmethoden, Form und Funktion von Bauteilen effizient auf einfache zu verbinden. Eine breite Verfügbarkeit von „4D-Druckern“ würde eine Vielzahl neuer, innovativer Anwendungen ermöglichen.

Die Publikationsanalyse zeigt, weltweit von Jahr zu Jahr ein Wachstum der Forschungsaktivitäten bei den Smart Materials. Die Zunahme der Publikationen findet hierbei hauptsächlich in Ostasien, insbesondere in China statt. Die Anzahl der Patentanmeldungen pro Jahr stagniert in den letzten 10 Jahren jedoch nahezu. Anscheinend führen viele in Ostasien getätigte Forschungsaktivitäten nicht zu Anwendung in der Industrie. Die Auswertung der Forschungsförderungsstatistiken zeigen wiederum, dass die Entwicklungen in Europa unter großer Industriebeteiligung stattfinden. Dies ist eine gute Voraussetzung für die Erarbeitung patentfähiger Entwicklungen. Eine gute Vernetzung von Forschung und Industrie erweist sich hier als ein Erfolgsrezept, das verstetigt werden sollte.

Smart³ e.V.
Edisonstraße 4
02625 Bautzen

www.smarthoch3.de