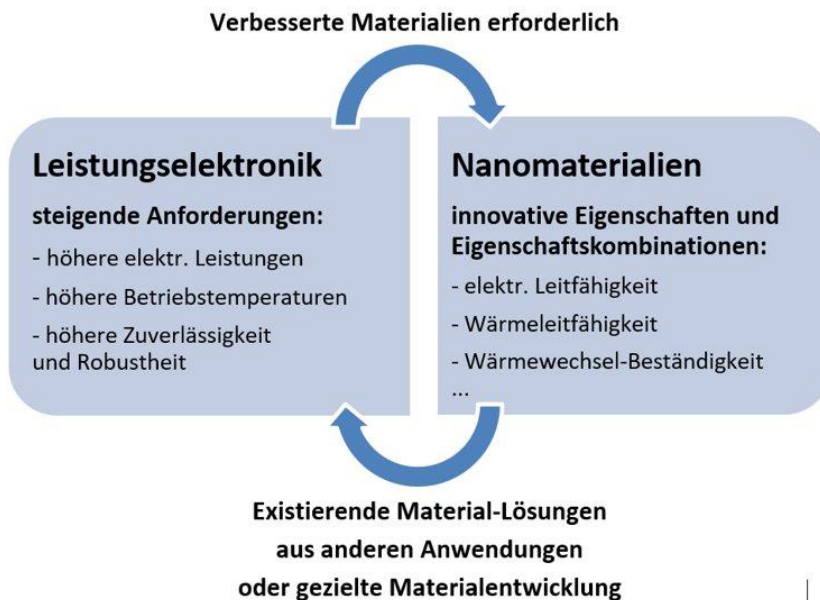


Exklusiver Bericht des Cross-Cluster-Projektes Nanomaterialien für die Leistungselektronik (nano4LE)



Nürnberg, Würzburg, den 31. Juli 2023

Dr. Bernd Bitterlich, Peter Rechberger (Cluster Leistungselektronik)

bernd.bitterlich@ecpe.org, <https://www.ClusterLE.de>

Dr. Peter Grambow, Justus Hermannsdörfer (Cluster Nanotechnologie)

peter.grambow@nanoinitiative-bayern.de, <https://nanoinitiative-bayern.de>

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

© Cluster Leistungselektronik, Cluster Nanotechnologie

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

Inhaltsverzeichnis:

1	Zusammenfassung und Ausblick	4
2	Grundlagen Leistungselektronik und Nanotechnologie.....	5
2.1	Materialanforderungen für den Einsatz in der Leistungselektronik	5
2.1.1	Aufbau von Leistungselektronik	5
2.1.2	Materialanforderungen in der Leistungselektronik	7
2.1.3	Interviews mit Experten aus dem Netzwerk	9
2.2	Grundlagen der Nanotechnologie	11
2.2.1	Herstellung von Nanomaterialien:	12
2.2.2	Unterschiede zwischen Nanomaterial, Nanoobjekt und nanostrukturierten Materialien 13	
2.2.3	Eigenschaften von Nanomaterialien	13
3	Recherche von Erfolgskonzepten zum Einsatz von Nanomaterialien aus anderen Bereichen (cross-industry).....	14
3.1.1	Erfolgskonzepte der Nanotechnologie	14
3.1.2	Elektrische Leitfähigkeit durch Nanomaterialien	17
3.1.3	Wärmeleitfähigkeit durch Nanomaterialien	20
3.1.4	Klebstoffe mit Nanomaterialien	21
3.2	Analyse der Übertragbarkeit auf die Leistungselektronik.....	21
3.2.1	Bzgl. elektr. Leitfähigkeit	21
3.2.2	Bzgl. Wärmeleitfähigkeit	23
3.2.3	Bzgl. Klebstoffe	24
4	Potenzialanalyse	25
4.1	Literaturrecherche.....	25
4.1.1	Literaturrecherche Nanotechnologien in der Leistungselektronik	25
4.1.2	Bewertung der Ergebnisse der Literaturrecherche hinsichtlich Anwendung in der Leistungselektronik	33
4.2	Expertenaussagen: Interviews mit Seminarteilnehmern	34
4.2.1	Vorgehensweise und Umfang	34
4.2.2	Über die Teilnehmenden.....	34
4.2.3	Interview: Beurteilung der wirtschaftlichen Situation in den Branchen Nanotechnologie und Leistungselektronik.....	35
4.2.4	Interview: Technologische Potenziale.....	36
4.3	Analyse und Priorisierung.....	37
4.3.1	Analyse der bisherigen Ergebnisse aus Recherchen und Expertenaussagen.....	37

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

4.3.2	Priorisierung auf bestimmte Anwendungsfelder	39
5	Zusammenfassung der beiden Seminare	40
5.1	Seminar I Nanomaterialien in der Leistungselektronik: Anwendungen, in denen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Alterungsbeständigkeit gefordert sind	40
5.2	Seminar II Nanomaterialien in der Leistungselektronik: funktionalisierte Kunststoffe sowie Aufbau- und Verbindungstechnik	47
5.3	Referentenliste	51

1 Zusammenfassung und Ausblick

Ziele des Cross-Cluster-Projektes Nanomaterialien für die Leistungselektronik „nano4LE“ waren:

- Akteure aus den beiden Netzwerken zu verbinden
- Einsatzpotentiale von Nanomaterialien und Nanotechnologie für Anwendungen in der Leistungselektronik aufzuzeigen.

Über Recherche, Umfragen, Interviews und zwei Seminaren wurden Themen herausgearbeitet, die eine effiziente Umsetzung im Prozess erwarten lassen und einen Performancegewinn in der Leistungselektronik versprechen (siehe auch Übersichts-Abbildung oben). Durch eine Gegenüberstellung der möglichen Innovationen durch die Einarbeitung nanopartikulärer Systeme mit den Spezifikationen in der Leistungselektronik gelang es, einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik zu erhalten. Es zeigt sich auf der einen Seite, dass die Nanotechnologie bereits heute ein breites Potenzial an Lösungsmöglichkeiten bietet und industrielle Erfolgsgeschichten vorweisen kann. Gleichzeitig ist die Einarbeitung von Nanopartikeln z.B. in Polymere Systeme aber ggf. auch mit Mehrkosten verbunden und extrem prozessabhängig. Auf der anderen Seite sucht die Leistungselektronik nach neuen Wegen, um beispielsweise die entstehende und hinderliche Wärme besser abzuführen aber auch um die verwendeten Materialien stetig weiterzuentwickeln.

Die folgende Auflistung zeigt welche unterschiedlichen Einsatzbereiche diskutiert wurden:

- Moderne Isolationswerkstoffe und Vergussmassen: Anspruch und Wirklichkeit
- Durch Nanotechnologie funktionalisierte Kunststoffe zur Erhöhung der elektrischen und der Wärmeleitfähigkeit
- Neuartige Klebstoffe: Eigenschaftsverbesserungen durch Nanokomposite
- Standards und Regularien in der Leistungselektronik
- Alterung und Zuverlässigkeit der verwendeten, insbesondere Komposit-Materialien
- Simulationsmöglichkeiten und digitale Zwillinge in Verbindung mit thermischen Interfacematerialien (TIM)

Insgesamt ist es gelungen, die komplexen Möglichkeiten der Nanotechnologie auf die Anforderungen in der Leistungselektronik abzubilden. Gleichwohl stellen sich naturgemäß viele neue Detailfragen, die es in der Zukunft zu beantworten gilt. Hierzu kamen bei der Umfrage und in den Seminaren viele

Anregungen von den Befragten bzw. den Teilnehmenden. Diese reichen von der Gestaltung einer Anlaufstelle bis hin zu konkreten Projektanfragen.

Ausblick:

Wie vorauszusehen war, kann ein derart umfangreiches Schnittstellenthema „Nanomaterialien/ Nanotechnologien“ und „Leistungselektronik“ in einem einzelnen Cross-Cluster-Projekt nur kurz angerissen werden. Die Teilnehmerkreise verwenden unterschiedliche Begrifflichkeiten, die erst einmal geklärt werden mussten. Zudem sind die eigenen Vorstellungen sehr unterschiedlich: die Akteure aus der Leistungselektronik haben konkrete Problemstellungen und erhoffen sich schnelle Lösungen durch die Nanotechnologie. Die Wünsche können jedoch nicht sofort erfüllt werden. Denn auch wenn die Nanotechnologie ein hohes Potential aufweist, die Herausforderungen in der Leistungselektronik zu erfüllen, ist bis zum finalen Produkt oftmals noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten. Die Akteure beider Cluster müssen daher durch eine kontinuierlich weiterhin informiert und zur Zusammenarbeit aufgerufen werden.

2 Grundlagen Leistungselektronik und Nanotechnologie

2.1 Materialanforderungen für den Einsatz in der Leistungselektronik

2.1.1 Aufbau von Leistungselektronik

Leistungselektronik wandelt elektrische Energie so um, wie der elektrische Verbraucher es benötigt. Beim Anschluss eines Laptops an die 230V-Steckdose beispielsweise wandelt die Leistungselektronik im Netzteil die elektrische Energie des Wechselstromnetzes in eine niedrige Gleichspannung um. Auch für den Betrieb von Elektromotoren wie z.B. im Elektroauto muss Leistungselektronik die elektrische Energie aus dem Stromspeicher so umwandeln, dass der Motor angetrieben werden kann.

Leistungselektronische Geräte wie z.B. Schaltnetzteile oder Frequenzumrichter für Elektromotoren enthalten als elektronische Komponenten Kondensatoren, Spulen, Widerstände und v.a. die Halbleiterschalter. Diese Komponenten werden auf einer elektrisch isolierenden Leiterplatte mit Leiterbahnen aus Kupfer aufgebracht. Die einzelnen Komponenten selbst sind i.d.R. durch einen Kunststoff von der Umgebung verkapselt. Zusätzlich werden meist weitere Schutzschichten oder Vergussmassen verwendet. Eine Besonderheit stellen die sogenannten Leistungsmodule dar, in denen mehrere Halbleiterschalter und wichtige Zusatz-Komponenten in einem eigenen, verkapselten Gehäuse zusammengefasst sind (Abb. 1). Bereits der vereinfachte Aufbau in Abb. 2 zeigt die Komplexität eines derartigen Leistungsmoduls.

Zur Herstellung von Leistungselektronik werden viele verschiedene Werkstofftypen eingesetzt und in der sog. Aufbau- und Verbindungstechnik („AVT“) verarbeitet. Neben den funktionellen Eigenschaften

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

der Materialien sind daher auch deren Verarbeitungseigenschaften sehr wichtig, um fehlerfreie Bauteile herstellen zu können. Abb. 3 gibt eine gute Übersicht über die einzelnen Funktionsbereiche: das elektrisch isolierende Substrat wird mit den Leiterbahnen aus Kupfer belegt. Die elektr. Komponenten werden meist durch Lötens mit den Leiterbahnen verbunden. Besonderes Augenmerk gilt der Verbindung zum Halbleiterschalter (sowohl dem „die attach“ als auch der „die top connection“), weil durch den gepulsten Stromfluss hier die größten Belastungen in der Anwendung auftreten, siehe folgendes Kapitel.

Wichtig ist auch die Beschaffenheit der „Terminals“, denn die angeschlossenen Stromzuführungen dürfen auch bei ungünstigen Umweltbedingungen keine Kontaktschwächen ausbilden. Kunststoffe zum Verkapseln können zusätzlichen Schutz vor Umwelteinflüssen und Korrosion bieten, verschlechtern jedoch die Wärmeabfuhr. Bei den meisten Anwendungen werden Kühlkörper benötigt, um die auf kleiner Fläche entstehende Wärme gezielt abzuführen und eine Übertemperatur an den Bauteilen zu verhindern.

Verluste als Wärme entstehen vor allem bei den Schaltvorgängen der Halbleiterschalter, die typischerweise im Bereich 10-100 kHz takten. Auch wenn diese Schaltverluste in moderner Leistungselektronik bestenfalls nur 1-2 % der gesamten elektrischen Leistung betragen, können diese zu erheblicher Wärmeentstehung führen.



Abbildung 1: Beispiel für ein Hochleistungsmodul: der abgebildete Typ kann insgesamt bis zu 1400A bei einer Spannung von 1200V schalten und wird in Motorantrieben, Windenergieanlagen, Solarwechselrichtern u.a. eingesetzt.

Quelle: Semikron-Danfoss, <https://www.semikron-danfoss.com/de/produkte/produktlinien/semitrans/semitrans-20.html>

Cross-Cluster-Projekt nano4LE

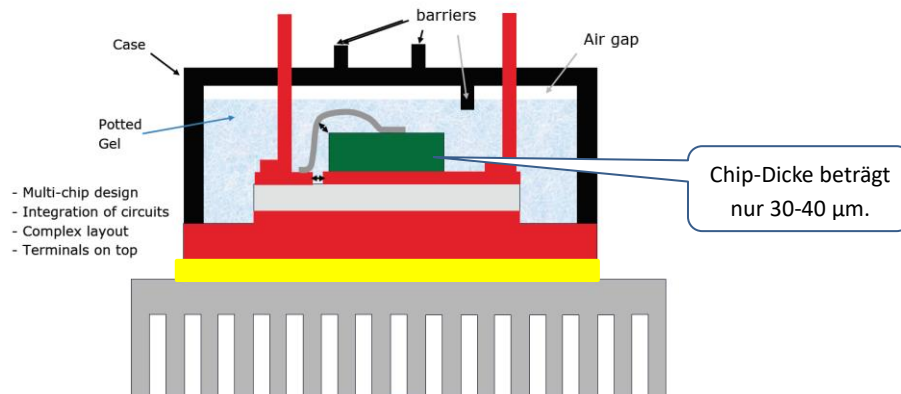


Abbildung 2: prinzipieller Aufbau eines Leistungsmoduls als Beispiel.
Quelle: Dr. Reinhold Bayerer, *Physics of Power Electronics*.



Abbildung 3: Übersicht über AVT-Einsatzgebiete bei Leistungsmodulen
Quelle: *Challenges of New Packaging Solutions for Power Modules*, Prof. Eisele FH Kiel, PCIM conference May 2021

2.1.2 Materialanforderungen in der Leistungselektronik

Vor allem die Elektromobilität stellt immer höhere Anforderungen an Zuverlässigkeit und Lebensdauer aller Komponenten – und damit insbesondere an die hochbelastete Leistungselektronik. Außerdem wird gefordert, dass die Komponenten immer kleiner werden – bei gleichzeitig steigender elektrischer Leistung. Das führt zu immer höheren Leistungsdichten im Bauteil, d.h. sehr hohen Strömen auf kleiner Fläche. Die unvermeidbaren Verluste durch elektrische Widerstände führen lokal zu einer starken Erwärmung. Die Bauteile bzw. die Materialien, mit denen diese Bauteile aufgebaut sind, müssen diese hohen Temperaturen aushalten und die Wärme möglichst schnell abführen. Aufgrund der Betriebsweise der Leistungselektronik kommt es zudem zu extrem schnellen Temperaturwechseln und damit thermo-mechanischer Belastung. Die Werkstoffe bzw. Werkstoff-Kombinationen müssen diese Temperaturwechsel aushalten.

Die Trends in der Leistungselektronik wie

- Kleiner

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

© Cluster Leistungselektronik, Cluster Nanotechnologie

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

- Schneller (schnellere Spannungswechsel du/dt)
- Höhere Leistungen
- Höhere Zuverlässigkeit und Robustheit
- Höhere Effizienz, weniger (Wärme)-Verluste

führen z.T. zu erhöhtem Stress der Materialien bzw. Material-Verbunde in Bezug auf:

- Temperatur-Wechsel
- Maximal-Temperaturen
- Mechan. Belastung
- Elektrische Belastung
- Korrosion

In der automotive quality guideline AQG324 sind die erforderlichen Prüfungen für Leistungsmodule, die im Automobilbereich eingesetzt werden sollen, detailliert beschrieben. Unter anderen werden verschiedene Lebensdauertests (Auslagerung bei Maximaltemperatur, Temperaturwechseltests ohne oder mit Strombelastung („power cycling“), Tests unter mechanischer Belastung und Korrosionstests gefordert.

Folgende Übersicht stellt wichtige Eigenschaften und Anforderungen in der Anwendung dar. Daneben existieren vielfältige Anforderungen an die Verarbeitbarkeit der verschiedenen Materialien, um Prozessfehler zu vermeiden und Herstellkosten zu senken.

	Derzeit	Trend	Wunsch
Hohe Max. Temperaturbelastung (Lote, Kunststoffisolierungen, elektr. Komponenten, Leiterplatte)	125°C (Leistungsmodul)	150°C	200°C
Geringer thermischer Widerstand des Systems , d.h. bessere Wärmeabfuhr (durch z.B. Materialien mit höheren Wärmeleitfähigkeiten oder dünnere Zwischenschichten oder ganz ohne).	Mind. 1.5 W/mK, besser > 3W/mK <i>Die Angabe von Werkstoffeigenschaften ist jedoch nicht ausreichend, da hauptsächlich der thermische Widerstand des Systems entscheidend ist.</i>		
Hohe Zyklenfestigkeit (wegen thermo-mechanischer Impulsbelastung)	Ref.	Faktor 10	>>Faktor 10
hohe Scherfestigkeiten für stabile Verbindungen bei Fügeprozessen (Löten, Drahtbonden).	50 MPa (die attach)	100 MPa	>>100 MPa

2.1.3 Interviews mit Experten aus dem Netzwerk

Aufgrund der Vielfalt an eingesetzten Materialien in den speziellen Anwendungen erschien es am Erfolg versprechensten, die jeweiligen Materialanforderungen über die vorhandenen Experten-Kontakte im Netzwerk des Cluster Leistungselektronik herauszufinden. Daher wurden Interviews mit verschiedenen Firmenvertretern durchgeführt, um allgemeine Vorgaben sowie Wünsche und Bedarfe herauszufinden. Aufgrund möglicher Wettbewerbsvorteile wurden allerdings nur in den seltensten Fällen konkrete quantitative Angaben gemacht.

Aussagen aus den Interviews, sortiert nach Branchen:

Hersteller von TIM-Materialien u.a.:

TIM (thermal interface material), Gapfiller, Vergussmassen:

wichtige Eigenschaften: **Preis**, **Standfestigkeit** (wiederholgenau dispensieren), **Wärmeleitfähigkeit**, **mechan. Eigenschaften**.

Durch den Trend höherer Leistungsdichten gibt es vereinzelt Kundenanfragen für hohe

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Wärmeleitfähigkeiten um 6 W/mK. Die Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe wird durch keramische Füller hergestellt, die einen Kostentreiber darstellen.

Beim **Dispensen ist die Viskosität entscheidend**. Diese ist nicht konstant, sondern steigt bei Luft einschläüssen (Empfehlung an Kunden: Entgasen) und mit der Standzeit an.

Ein **feineres Dosieren** ist mit feineren Düsen möglich, wofür feinere Partikel eingesetzt werden müssen. Derzeit liegen die feinsten Partikel im μm -Bereich. Meist werden bi- oder trimodale Verteilungen eingesetzt.

Problem ist **Alterung**: hochgefüllte Kunststoffe werden mit der Zeit brüchig.

Hersteller von Kunststoffen – auch für die Elektronikindustrie:

Thema **Vergussmassen**:

Wenn die **Wärmeleitfähigkeit** $>1,5$ W/mK betragen soll, dann steigt der **Preis** aufgrund teurer Füllstoffe und längerer Prozesszeiten z.B. beim Mischen und Dispergieren. Bei den eingesetzten Füllstoffen gibt es welche, die bis $1\mu\text{m}$ fein sind.

Auch hier wird betont, wie wichtig es ist, **Luftblasen** durch Entgasen zu vermeiden. V.a. an den Grenzflächen bleiben sonst Luftblasen beim Vergießen zurück.

Hersteller von Solarwechselrichtern:

Thema **Isoliermaterialien**:

Es werden überwiegend Standard-Isoliermaterialien eingesetzt. Es ist nur geringer Bedarf an verbesserten Materialeigenschaften vorhanden. Wunsch wären **Isolierstoffe, die höhere Spannungsfestigkeiten** aufweisen. Anwendungsbeispiel ist der ummantelte Kupferdraht zum Wickeln von Spulen. Durch eine dünnere Isolationsschicht könnte der Abstand von Kupferdraht zu Kupferdraht verringert und damit direkt und indirekt die Bauteilgröße verringert werden. Gleichzeitig dürfen jedoch im Falle einer thermischen Überbelastung **keine kritischen Fluorgase** entstehen!

Die Wärmeleitfähigkeit ist ebenfalls sehr wichtig. Daten wurden jedoch nicht genannt.

Materialien **für „hohe du/dt “**, die sehr schnelle Wechsel in der elektr. Spannung auf Dauer sicher aushalten, sind gesucht.

Eine eigene exklusive Werkstoffentwicklung würde in dieser Branche auf keinen Fall gestartet werden, um von Skaleneffekten bei den Zulieferern profitieren zu können (Kosten!).

Zulieferer für Automobil-Elektronik:

Themen: Isolation, TIM, Gapfiller, Vergussmassen

Gewünscht werden Materialien, die die folgenden, normalerweise widersprüchlichen Eigenschaften aufweisen: sehr gute **elektr. Isolationseigenschaften** auch bei mehreren kV und gleichzeitig hohe **Wärmeleitfähigkeiten** von mind. 3 W/mK.

Vergussmassen sollen gleichzeitig eine niedrige **Viskosität** bei der Verarbeitung aufweisen, um kleine Spalte sicher aufzufüllen.

Im Automotive-Bereich gilt die Forderung, dass die Kunststoffe **auch bei -40°C noch weichelastisch** bleiben. Maximaltemperaturen bis 150°C , wofür Materiallösungen vorhanden sind. Wissen über Materialsysteme, die z.T. bis 200°C aushalten, sei vorhanden.

Auch die **dielektrischen Eigenschaften** der Materialien sind relevant wegen der elektromagnetischen Verträglichkeit. Hier kommt es allerdings zu einer Wechselwirkung mit dem mechanischen Einbau im System, weshalb die reinen Materialdaten nicht allein entscheidend sind.

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Exklusive Materiallösungen können wünschenswert sein, wenn man sich damit vom Wettbewerb absetzen kann.

Hersteller von Komponenten für Wickelgüter:

Thema Kupferlitze:

Die elektr. Isolation erfolgt durch Aufbringen von Lacken im Tauchverfahren. Eine hohe **Spannungsfestigkeit** erfordert eine Zusatzisolierung z.B. durch Isolationsfolien (zusätzl. Prozessschritt, Kosten, erhöhte Dicke). Litzen werden zu Bündeln gepackt. Eine mechanische Belastung auf die Zwischenschichten führt zu einer sehr variablen Abnahme der Spannungs-Festigkeit. Die Lufteinschlüsse verringern zudem die **Stabilität gegenüber Teilentladung**.

Da es sich um ein normiertes Produkt handelt, bestehen kaum Möglichkeiten, sich durch verbesserte Eigenschaften vom Wettbewerb abzusetzen.

Entwicklungsdienstleister für Automotive und Industrie:

Das Wärmemanagement im Umrichter ist Kern-Know-How: nur in Kombination von möglichst niedrigen Verlusten und möglichst schneller Abfuhr der nicht vermeidbaren Verlustwärme können die heutigen Anforderungen bzgl. Kosten und Zuverlässigkeit erfüllt werden.

TIM und Zwischenfolien müssen zuverlässig gleichmäßig dünn und blasenfrei appliziert werden können. Sogenannte phase-change-materials (PCM) bieten den kaum vermeidbaren Luftblasen Wege zum Entweichen. Die Isolationsschichten sollen möglichst dünn sein, um den Wärmedurchgang wenig zu behindern. Auf der anderen Seite steigt bei sehr dünnen Isolierschichten die kapazitive Kopplung stark an, die zu hohen unerwünschten Common Mode-Strömen führen können.

2.2 Grundlagen der Nanotechnologie

Die Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie und hat ein beachtliches technisches und kommerzielles Potenzial. Die Nanotechnologie wurde von der Europäischen Kommission daher auch als eine der Schlüsseltechnologien („key enabling technology“) erkannt und Prognosen zufolge werden die Fachkenntnisse und das Know-how auf diesem Gebiet für das künftige Wirtschaftswachstum in der EU eine zentrale Rolle spielen. Nanotechnologien bieten eine Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten, die zu neuen Produkten oder verbesserten Produkteigenschaften führen. So gibt es inzwischen auch kaum einen wirtschaftlichen Bereich, der nicht von der Nanotechnologie profitiert, z.B. Medizintechnik, Maschinenbau, Umwelttechnik, Optik, Textilindustrie, Verpackungs-industrie und Bauwesen. Auch in der Elektronik ist die Nanotechnologie ein essentieller Bestandteil, bspw. um die Leistung eines IC (engl. integrated circuit = integrierter Schaltkreis) zu steigern.

Per Definition sind Nanomaterialien Objekte im Bereich von 1 bis 100 Nanometern. Dieser Bereich ist insofern interessant, da Materie, die verkleinert wird, ihre Eigenschaften ändern kann, wie z.B. die Farbe oder die chemische Reaktivität. Diese Änderung basiert auf einer Änderung der elektronischen Eigenschaften im Material. Außerdem vergrößert sich die effektive Oberfläche eines Materials, wodurch Wechselwirkungen mit anderen Materialien (z.B. Harzen oder Polymeren) stärker ausfallen können. Durch die hohe Oberflächenaktivität tendieren Nanomaterialien jedoch auch zu einer schnellen Agglomeration oder Aggregation, was zu einem Verlust der nanospezifischen Eigenschaften führen kann. Nanomaterialien müssen daher stets gut dispergiert sein, um das volle Potenzial nutzen zu können. Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

zu können. Dem Dispergieren (und Stabilisieren) kommt demzufolge auch eine Schlüsselrolle zu, insbesondere da Nanomaterialien häufig im Trockenverfahren hergestellt werden und i.d.R. nachträglich in flüssige Formulierungen überführt werden.

Neben der Verarbeitung und der Reproduzierbarkeit spielen aber auch Themen wie Sicherheit und Arbeitsschutz eine wichtige Rolle. Um auch die gesellschaftliche Akzeptanz zu fördern, wird die Nanotechnologie in Bayern und in Deutschland seit mehr als 15 Jahren sehr offen (im Dialog) und mit der gleichzeitigen Betrachtung von Chancen und Risiken geführt. Dass diese Herangehensweise (und der Zugang zu entsprechendem Wissen) entscheidend für die Akzeptanz in der Bevölkerung sind, zeigt auch eine aktuelle Studie der EU: Haben Personen fachliches Wissen über die Nanotechnologie, sehen diese insbesondere die Vorteile der Technologie. Die **größte Hürde bzw. Herausforderung** bei der industriellen Nutzung von Nanomaterialien bleibt somit auch weiterhin

- der Abbau von Vorbehalten durch konsequente und fachliche Aufklärung von Chancen und Risiken;
- eine nüchterne Betrachtung von Möglichkeiten, um überzogenen Erwartungen an Produkteigenschaften zu vermeiden;
- die reibungslose Integration in bestehende Industrieprozesse, ohne diese nachteilig zu beeinflussen;
- eine verbesserte Kontrolle und Überwachung der Bedingungen, die für die Verwendung von Nanomaterialien in industriellen Prozessen erforderlich sind;

Die Trends in der Nanotechnologie wie eine

- allgemeine Akzeptanz in der Industrie (Nano ist keine Hype-Technologie mehr)
- und eine offenere Sichtweise von ehemals kritischen Stimmen bzgl. der Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie in Bezug auf die klimatischen und gesellschaftlichen Herausforderungen der kommenden Jahre

führen zu

- größere Produktionsvolumina bzw.
- geringeren Materialpreisen und damit wettbewerbsfähigen Materialien, sowie zu
- höherer Zuverlässigkeit.

2.2.1 Herstellung von Nanomaterialien:

Nanomaterialien können **(1) natürlichen Ursprungs** sein (hergestellt durch Viren, Bakterien oder Pflanzen, oder gebildet im Wüstensandstaub oder als Rauch von vulkanischer Aktivität oder Waldbränden), **(2) unfreiwillig erzeugt** werden (hauptsächlich industrielle Prozesse wie Flammenpyrolyse, Hochtemperaturverfahren, Verbrennungsprozessen (Diesel, Kohle)) oder **(3) freiwillig erzeugt** werden (hergestellte Nanomaterialien). Dabei gibt es generell zwei verschiedene Verfahren: während im „Top-Down“-Ansatz größere Partikel klein gemahlen werden, verfolgt der „Bottom-Up“-Ansatz die Bildung (bzw. den Aufbau) von Nanopartikeln durch die Kombination von Atomen oder Molekülen.

2.2.2 Unterschiede zwischen Nanomaterial, Nanoobjekt und nanostrukturierten Materialien

Der Überbegriff Nanomaterialien lässt sich in zwei Kategorien (Nanoobjekte und nanostrukturierte Materialien) und mehrere Untergruppen unterteilen (Vgl. Abbildung 4). Objekte, die in einer oder mehrerer Dimensionen im Bereich von 1 - 100 nm vorliegen werden als Nanoobjekte bezeichnet. Je nach Herstellungsmethode können dabei wiederum unterschiedliche Formen und Strukturen (Sphären, Nadeln bzw. Röhren, Plättchen und Fasern) realisiert werden. Nanostrukturierte Materialien wiederum weisen eine innere Struktur oder Oberflächenstruktur im Nanomaßstab auf und können bspw. Zwischenräume und Poren im Nanomaßstab aufweisen. Neben der Pulverform können diese Materialien auch als Nanokomposit, fester Nanoschaum, Nanoporenmaterial oder Nanodispersionsflüssigkeit vorliegen.

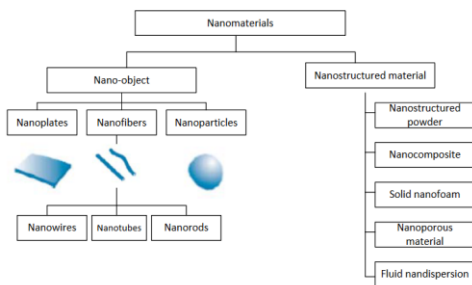


Figure 1. Representative scheme of nanomaterials manufactured according to ISO 80004-1, ISO 80004-2 and ISO 80003.

Abbildung 4: Formen von Nanomaterialien

Nanomaterialien können unterschiedliche chemische Zusammensetzungen haben. Kategorisieren lassen sich diese in Metallen, Halbleitermaterialien, Metalloxide oder Kohlenstoffbasierte Verbindungen. Zusätzlich können Nanomaterialien eine modifizierte Oberfläche zur besseren Verarbeitung oder Stabilität aufweisen. Darüber hinaus werden auch Legierungen oder Multimaterialsysteme verwendet.

2.2.3 Eigenschaften von Nanomaterialien

Die Eigenschaften von Nanopartikel werden maßgeblich durch Größe und Gestalt, aber auch ihrer chemischen Zusammensetzung bestimmt. Sie können dabei deutlich andere Eigenschaften haben als das entsprechende Bulkmaterial. Dazu zählen u.a. Reaktionsfähigkeiten, Härte, Phasenübergänge, Farbe, Magnetismus oder elektrische und/oder thermische Leitfähigkeiten. Durch gezielte Reduzierung der Teilchen auf Nanogröße können daher gezielt erwünschte Eigenschaften und spezifische Funktionen erreicht werden.

Neben der chemischen Zusammensetzung der Nanomaterialien spielen die Form und das Aspekt-Verhältnis (Länge zu Breite) eine wichtige Rolle und wirken sich auch makroskopisch stark auf die Eigenschaften von Verbundmaterialien aus. Nanofasern wie Nanokohlenstoffröhren bspw. können bei einer guten Dispergierung ein Perkulationsnetzwerk ausbilden und bereits bei sehr geringen Füllmengen eine hohe Leitfähigkeit in sonst isolierenden Materialien wie Kunststoffen ermöglichen (Vgl. Abbildung 5).

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Nanomaterialien werden dabei meist nur als Additive in geringen Mengen eingesetzt, da in der Regel schon geringe Mengen Nanomaterial ausreichen, um die makroskopischen Materialeigenschaften zu verbessern oder zu beeinflussen:

- Elektrische Leitfähigkeit (z.B. Nanosilber, Nanokupfer, Nanokohlenstoff)
- Wärmeleitfähigkeit (z.B. Nanosilber, Nanokohlenstoff, Nanokupfer)
- Mechanische Stabilität (z.B. Nanokohlenstoff, Aluminiumoxide)
- Elektrische Isolation (z.B. Nanobornitrid, Nanodiamant)

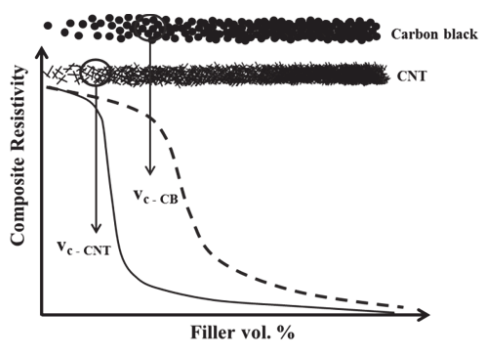


Abbildung 5: Darstellung eines Perkolationseffekts am Beispiel von CNTs und carbon black (copyright by Young-Bin Park)

3 Recherche von Erfolgskonzepten zum Einsatz von Nanomaterialien aus anderen Bereichen (cross-industry)

3.1.1 Erfolgskonzepte der Nanotechnologie

Die Nanotechnologie bietet vielfältige Erfolgsbeispiele von der Medizintechnik bis hin zum Leichtbau. Dabei werden verschiedene Nanomaterialien eingesetzt, um makroskopische Materialeigenschaften zu verbessern, Ressourcen einzusparen oder Herstellungsprozesse zu optimieren. Im vorliegenden Bericht werden aufgrund der Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten und Materialien jedoch nur Anwendungen mit Relevanz für die Leistungselektronik betrachtet.

In den letzten Jahren hat sich die Nanotechnologie in verschiedenen Industriebereichen erfolgreich etabliert und zu einer Verbesserung bestehender oder der Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen geführt. Beispielsweise besitzen **MWCNT** (Multi Wall Carbon Nano Tubes) einen sehr hohen E-Modul sowie eine sehr hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Da sie kostengünstig in großen Mengen auf dem Markt verfügbar sind, ein hohes Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis aufweisen und damit schon in geringen Zusatzmengen eine gute elektrische Leitfähigkeit und hohe mechanische Festigkeit bewirken, werden sie heute vielfach **für elektrisch leitfähige Beschichtungen und in Kompositwerkstoffen** eingesetzt. Im Bereich der Energiespeicherung werden MWCNT zur

Verbesserung der Elektroden von Li-Ionen-Batterien eingesetzt. LG-Chemicals hat dafür extra eine eigene Fabrik aufgebaut, deren Kapazität Anfang des Jahres von 500 Jahrestonnen auf 1700 Jahrestonnen gesteigert wurde. Durch diese weltweiten Entwicklungen **sinken die Preise nanoskaliger Materialien** (z.B. MWCNT) deutlich und damit eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten für die Einsatzgebiete der Nanotechnologie.

Die Nanotechnologie ist in vielen Industriebereichen "angekommen" und wird dort nicht länger nur als Hype-Thema betrachtet. Diese Erfolgskonzepte sollen nun auch anderen Industrien als Vorlage dienen, um die Vorteile von Nanomaterialien zu nutzen. Nanomaterialien werden dabei je nach chemischer Zusammensetzung, Größe und Form für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt:

Nanomaterial	Einsatz / Eigenschaften
Siliziumdioxid (SiO ₂)	Additive in Polymerkompositen (UV-A-Schutz), Solarzellen, Datenspeicher, Pharmazie, Medizin ...
Titandioxide (TiO ₂) (wichtigste Modifikation: Rutil und Anatase)	Weißpigment (max. Reflexionsvermögen bei 300 nm und transparent bei ca. 50 nm), UV-Filter, elektrische und photokatalytische sowie antimikrobielle Eigenschaften ...
Zinkoxide (ZnO)	UV-Filter, Additiv für kratzresistente Oberflächen, antimikrobielle Eigenschaften ...
Zirkonium dioxid (ZrO ₂)	Technische Keramik (Sintern von Nano-Zirkondioxid-Pulver liefert sehr hohe Härte und Bruchzähigkeit), Additiv für kratzresistente Oberflächen
Cerium dioxid (CeO ₂)	Auto-Katalysatoren, Biomedizin, Landwirtschaft, Schleif- und Poliermittel bei der Herstellung von Computerchips (Halbleiterindustrie) ...
Eisenoxide (Fe ₂ O ₃ , magnetite, Fe ₃ O ₄ , ...)	Additive in Polymerkompositen, Medizin (Tumorbehandlung und Transport von Medikamenten im Körper) ...
Eisen	Einsatz als Reduktionsmittel, Aggregatbildung. Verwendung in der Wasseraufbereitung. Rückläufiger Einsatz als Magnetaufzeichnungsbändern (nadelförmige Ferritpartikel).
Hexagonales Bornitrid und Bornitrid-Nanoröhren (BNNT)	Schleifmittel und Beschichtung. Ähnliche mechanische und physikalische Eigenschaften wie CNTs (z.B. Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Wärmeleitfähigkeit) aber elektrisch isolierend. Vorteile: Korrosionsbeständigkeit, Härte, Gewicht.
Silber	Sehr hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, antibakterielle Wirkung, Landwirtschaft, Elektronik
Indiumzinnoxid (ITO)	IR-Absorber, Elektronik, Sicherheitsmerkmale. Hohe elektrische Leitfähigkeit, Transparenz im visuellen Spektralbereich, hohe chemische Beständigkeit
Aluminiumoxid	Füllstoffe in Polymeren und Reifen, Beschichtungen (Kratz- und Abriebfestigkeit), technische Keramik (Härte, Bruchfestigkeit) ...

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

Aluminium hydroxides and aluminium oxo-hydroxides	Flammschutzmittel und Füllstoff (Teppiche, Gummis, Kunststoffe, Schaumstoffe), Verdickungsmittel und Erhöhung der Farbsättigung (Farben- und Kunststoffindustrie), Zahnpasta und Kosmetika ...
Nanoclays	Kunststoffzusatz (Lebensmittelverpackungsfolien, Plastikflaschen ...). Eigenschaften: höhere Zugfestigkeit, verbesserte Barriere- und Abrasionseigenschaften, geringe thermische Ausdehnung, Flamm- und Brandschutzmittel. Elektronik: Chemische Beständigkeit, mechanische Festigkeit und thermische Stabilität
Gold	Biotechnologie und Biomedizintechnik. Besonders: Chemische Inertheit und toxikologische Unbedenklichkeit.
Kupfer	Biozid, Elektronik: Lösungen oder Pasten aus Kupfer-Nanopartikeln
Platin- und Palladium-legierungen	Elektronik (Mehrschicht-Keramikkondensatoren)
Titan	Legierungsverbindung in Leichtbaumaterialien in Luft- und Raumfahrt, Automotive, medizinische Implantate
Kohlenstoffe: Ruß Industrieruß (80-95 % amorpher Kohlenstoff) und Carbon Black (> 96 % amorpher Kohlenstoff)	Autoreifen, Kunststoffe, Drucker, Kopierer, Trägermaterial für Katalysatoren, UV-Schutz, mechanische und tribologische Anwendungen. Der Grad der organischen und anorganischen Verunreinigungen ist bei Industrierüßen i.d.R. sehr hoch. Thermische und elektrische Leitfähigkeit.
Kohlenstoffe: Fullerene	Kosmetik, Datenspeicher, Photonik, Pharmazie
Kohlenstoffe: CNT (SWCNT und MWCNT)	Automotive, Energiespeicher, Kunststoffe, Leichtbau. Thermische und elektrische Leitfähigkeit.
Kohlenstoff: Graphen	Automotive, Energiespeicher, Kunststoffe, Leichtbau. Thermische und elektrische Leitfähigkeit.
Kohlenstoff: Diamant	Hohes Elastizitätsmodul, hohe Wärmeleitfähigkeit (1000-2500 W/m*K), hoher elektrischer Widerstand. Elektrisch leitfähig durch Zusätze wie Bor, Phosphor oder Stickstoff (Halb- oder Supra-leiter). Einsatz in elektronischen Bauelementen (Wärmeableitung).
Quantum dots (z.B. CdSe, CdTe, InP, InAs, GaAs, GaN oder ZnS)	Quantenpunkte bestehen typischerweise aus einem metalloiden Kern und einer Hülle aus Peptiden oder anderen funktionellen Gruppen für physiologisch kompatible Eigenschaften. Einsatz in Biomedizin, Tumorbildung, Lasern, LEDs, Datenspeicher.
Nanopolymere und Lipid-Nanopartikel	Nanopolymere werden bspw. als Trägersubstanz für Medikamente eingesetzt die sehr gezielt nur beschädigte Zellen ansteuern können. Polystyrol-Nanopartikel können bspw. in elektronischen Geräten oder Farbstoffen eingesetzt werden. Außerdem können sie andere Substanzen verkapseln und haben eine hohe Affinität verschiedene Moleküle und Proteine an ihrer Oberfläche zu binden. Dadurch werden sie bspw. im medizinischen Bereich als nanoskalige Träger für Medikamente untersucht. Silizium-Nanokugeln sind ebenfalls Nanopolymere und sind

	bspw. bei einer Größe von 40-100 nm deutlich härter als Bulk-Silizium (zwischen Saphir und Diamant). Lipid-Nanopartikel sind Nanopartikel, die aus Lipiden bestehen. Sie sind ein neuartiges pharmazeutisches Arzneimittelabgabesystem (bspw. mRNA-Impfstoffe).
Polymer-Nanoverbundwerkstoffe	Polymer-Nanoverbundwerkstoffe bestehen aus einer Polymermatrix, in der Nanopartikel oder Nanofüllstoffe dispergiert vorliegen. Die Nanoteilchen können unterschiedliche Formen besitzen (z. B. Plättchen, Fasern oder Sphäroide).

Darüber hinaus werden auch verschiedene Nanomaterialien kombiniert oder legiert, um neue Eigenschaften zu ermöglichen. Dadurch ergibt sich wiederum eine Vielzahl an weiteren Kombinationsmöglichkeiten wie bspw. Composite, hybride Materialien sowie Kern-Schale- oder Janus-Partikel.

Aufgrund der Vielfalt an verfügbaren Nanomaterialien wurden im Weiteren zunächst nur diese Materialien untersucht, die aufgrund ihrer Eigenschaftsspektren und bisherigen Einsatzgebiete am erfolgversprechendsten erschienen. Dazu wurden verschiedene Experten-Kontakte im Netzwerk des Clusters Nanotechnologie interviewt.

3.1.2 Elektrische Leitfähigkeit durch Nanomaterialien

Je nach benötigter Leitfähigkeit werden verschiedene Nanomaterialien für die Einstellung einer elektrischen Leitfähigkeit genutzt:

- **Silber** ist das Element mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit und elektrischen Leitfähigkeit im Periodensystem. In der Form von **Nanosilber** oder **nano-strukturiertes Silber** können diese Eigenschaften materialsparend für die Elektronik, z. B. für transparente und gleichzeitig elektrisch-leitfähige Folien, genutzt werden. Nanosilber wird bereits in der Elektronik und auch in der Verbindungstechnik eingesetzt. Da Nanosilber einen geringeren Schmelzpunkt als Bulksilber aufweist, kann dadurch u.a. die Sintertemperatur reduziert werden. Neben sphärischen Partikeln werden dabei insbesondere anisotrope Nanosilberdrähte mit möglichst hohem Aspektverhältnis eingesetzt. Dadurch können trotz geringer Füllgrade gute Perkolationsepfade eingestellt und so auch transparente leitfähige Schichten oder Strukturen erzeugt werden. Silber wird aber auch nanostrukturiert verwendet, um bspw. in der Verbindungstechnik bei bereits geringen Sintertemperaturen eine gute Verbindung zu erreichen. Nanosilber wird auch in-situ erzeugt, um Lücken zwischen den Mikropartikeln zu füllen. Nanosilber wird auch für elektrisch leitfähige Klebstoffe eingesetzt, bspw. in Sicherheitselementen in Gläsern. (Akteure: HeiQ RAS AG, NanoWired GmbH, Nano-Join GmbH, Tarn-Pure, GSB Wahl GmbH, NanoSpace ...)
- **Nanokupfer** hat ebenfalls eine hohe elektrische Leitfähigkeit ist jedoch günstiger als Nanosilber. Demgegenüber steht jedoch eine geringere Oxidationsbeständigkeit. Nanokupfer wird vor allem als Biozid und für elektrische Anwendungen eingesetzt. In der Informations- und Kommunikationstechnologie werden kleine, präzise Schalt- und Leiterbahnen durch Lösungen oder Pasten aus Kupfer-Nanopartikeln und mittels digitaler Druckverfahren hergestellt. (Akteure: z.B. Copptech GmbH)

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

- **Nanokohlenstoffe** sind eine vielseitige Stoffklasse und bieten verschiedene Einsatzmöglichkeiten und einmalige Materialeigenschaften. Aufgrund ihrer nanoskaligen Abmessungen reichen oft schon geringe Zusätze im Prozent-Bereich oder darunter, um anderen Werkstoffen ebenfalls eine elektrische oder thermische Leitfähigkeit zu verleihen oder sie mechanisch deutlich zu verstärken. Die elektrische Leitfähigkeit ist geringer als bei Nanosilber oder Nanokupfer, dafür sind die Materialien deutlich preiswerter. Nanokohlenstoffe werden bspw. genutzt, um Sensoren in die Faserstruktur eines Windrad-Flügels einzubringen. Auch werden Nanokohlenstoffe in elektrisch leitfähigen Klebstoffen eingesetzt. (Akteure: Nanocyl S.A., Nawa Technologies, TU Chemnitz, ...)
 - Kohlenstoff-Nanoröhren oder auch Carbon Nanotubes sind aufgerollte Graphen-Schichten, welche im Idealfall innen hohl sind. An ihren Enden können sie offen sein oder eine Fulleren-artige Kappe besitzen. Man unterscheidet prinzipiell zwischen den einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren (single-wall carbon nanotubes – SWCNT), die Durchmesser im Bereich von 0,7 bis 4 nm besitzen, und den mehrwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren (multi-wall carbon nanotubes – MWCNT), deren Durchmesser im Bereich von 5–20 nm liegt.
 - Graphene stellen einzelne Kohlenstofflagen des Graphits dar. Technisch findet man heute aber unter der Bezeichnung „Graphen“ überwiegend Qualitäten, die aus mehreren Kohlenstofflagen bestehen. Je nachdem, über welches Verfahren das Graphen hergestellt wurde, trägt es mehr oder weniger funktionelle Gruppen. Durch spezielle Verfahren können Graphenschichten auch direkt auf planaren Oberflächen erzeugt und nachträglich auf andere Oberflächen als wichtiger Baustein für optoelektronische Anwendungen übertragen werden. Von den bekannten Kohlenstoff-Modifikationen sind Graphene die jüngsten Produkte auf dem Markt. Deshalb sind sie, insbesondere wenn sie sehr wenige Schichten aufweisen, im Vergleich zu anderen Nanokohlenstoffmaterialien etwas teurer und bislang nicht in größeren Mengen kommerziell verfügbar. Viele potenzielle Anwendungen sind noch in der Entwicklung, aber die ersten Produkte sind bereits verfügbar.
 - Kohlenstoffnanofasern oder Carbon Nanofibers (CNF) sind lange, faserartige Kohlenstoffschichten, in denen die einzelnen Lagen quer zur Faserrichtung angeordnet sind (platelet-type) oder winklig ineinander geschachtelt (herringbone-type) vorliegen. Sie haben ein ähnlich großes Aspektverhältnis (Verhältnis von Länge zu Durchmesser) wie die Carbon Nanotubes, sind aber mit einem Durchmesser im Bereich von 150–300 nm deutlich größer. Aufgebrachte metallische Zwischenschichten zwischen den Graphenlagen verbessern die Anbindung der CNFs an keramische und metallische Matrices, weshalb so modifizierte Nanofibers auch gut für den Einsatz in Kompositwerkstoffen geeignet sind. Darüber hinaus lassen sich Platelet-CNFs gut in selbstschmierenden Werkstoffen nutzen.
 - **Indiumzinnoxid** liegt meist als Pulver in verschiedenen Modifikationen und Dotierungen vor. Es lässt sich einfach in optisch transparente Nanodispersionen umwandeln oder während des Extrusions- oder Spritzgussprozesses in Polymeren dispergieren. Gelbes Indiumzinnoxid wird vorwiegend als Ausgangsmaterial für verschiedene Prozesse zur Herstellung transparenter leitender Schichten und Elektroden für Displays, Solarzellen und ähnliche Anwendungen verwendet. Die dünnen Filme sind farblos und weisen eine hervorragende Leitfähigkeit und Transparenz auf. Blaues Indiumzinnoxid, weist im Vergleich zur gelben Version eine höhere
- Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

elektrische Leitfähigkeit und eine höhere Absorption im Infrarotlicht auf, wodurch es für Beschichtungen, Tinten und Polymerfilme nützlich ist. Die Hauptanwendungsgebiete dieser Folien sind die Hitzeabschirmung auf Architektur- und Automobilglas, wo sie hohe Transparenz und geringe Farbe im sichtbaren Bereich mit hervorragenden Absorptionseigenschaften im Infrarotbereich kombinieren. Gelb-grünliches Indiumzinnoxid wird überwiegend für Gas-sensormaterialien verwendet. Die elektrische Leitfähigkeit ist gut, das NIR-Absorptionsprofil ist jedoch geringer. (Akteure: Keeling & Walker)

3.1.3 Wärmeleitfähigkeit durch Nanomaterialien

Nanomaterialien können auch eingesetzt werden, um die Wärmeleitfähigkeit zu optimieren. Da Korngrenzen jedoch generell eine Wärmebarriere darstellen und die Wärmeleitfähigkeit reduzieren kommen dafür in erster Linie anisotrope Nanomaterialien (Drähte oder Fasern) in Frage.

- Die Wärmeleitfähigkeit von **Diamanten** ist sehr gut (etwa zwei- bis fünfmal größer als Silber und fünf- bis achtmal größer als Gold), und wird entsprechend für das thermische Management und die Kühlung von Hochleistungsbauelementen wie z.B. Laserdioden genutzt. Aufgrund der erhöhten Konzentration von Korngrenzen, kommen Nanodiamanten jedoch nicht als Füllstoff für den Wärmetransport in Frage. Nanodiamanten können jedoch genutzt werden, um Oberflächen zu "impfen" und dann entsprechende Diamantschichten über die Gasphase abzuscheiden. Funktionalisierte Nanodiamanten werden darüber hinaus bspw. als Quantensensoren in zellulärer Umgebung und als effiziente Therapeutika und verbesserte Kontrastmittel untersucht [https://www.mpg.de/11711239/mpi-p_ib_20171]. Auch wird derzeit untersucht, ob durch Nanodiamanten Energieeinsparungen in elektrischen Modulen erreicht werden können [<https://www.uni-giessen.de/de/ueber-uns/pressestelle/pm/pm31-13>].
- **Nanosilber und Nanosilberdrähte** haben ebenfalls eine hohe thermische Leitfähigkeit. Aufgrund des hohen Preises wird Nanosilber jedoch bislang nicht großtechnisch eingesetzt.
- **Nanokohlenstoffe** weisen demgegenüber ebenfalls eine gute thermische Leitfähigkeit und zudem einen deutlich geringeren Preis auf. Großes Anwendungspotenzial haben sogenannte VACNTs (Vertically Aligned Carbon NanoTubes), die u.a. als Ultra-Capacitors (Super-Kapazitäten) und thermisch hochleitende TIMs (Thermal Interface Material) genutzt werden können. VACNT werden üblicherweise in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren in Massenfertigung hergestellt, um Herstellungskosten zu senken. Durch die Ordnung der VACNTs in Längsrichtung kann eine bis zu hundertfach höhere Ladungsträgerstromdichte als bei herkömmlichen Super-Kapazitäten erzielt. Außerdem kann die thermische Leitfähigkeit der VACNTs entlang ihrer z-Achse genutzt werden, um einen zielgerichteten Wärmetransport zu ermöglichen (thermisch leitende Pads)
- **Aluminiumoxid** weist ebenfalls eine gute Wärmeleitfähigkeit auf. Für die Leistungselektronik sind derartige keramische Werkstoffe besonders interessant, da die Materialien gleichzeitig elektrisch isolierend sind (Akteure: Güpo ...). Aluminiumoxid wird entsprechend u.a. in Pasten, Gapfüllern, Verguss-Massen, Wärmeleit-Folien und -Klebern, Keramiken und Kunststoffen eingesetzt. [<https://www.elektormagazine.de/news/nano-sandwiching-verbessert-die-warmeubertragung-in-der-nanoelektronik> und <https://www.elektronikpraxis.de/sandwich-technik-schuetzt-nano-transistor-vor-ueberhitzen-a-756355/>]. Extrem dünne Beschichtungen von APYRAL® AOH /ACTILOX® (Böhmit) oder Nabalox® (Aluminiumoxid) werden als Schutzschild in Separatorfolien für Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Durch den Einsatz kann die Separatorfolie den vielfältigen Belastungen thermischer und mechanischer als auch elektrischer Art standhalten und somit das thermische Durchgehen und den Brand einzelner Zellen bzw. der kompletten Batterie verhindern. (Akteure: Nabaltec)
- **Nanokupfer und Nanokupferoxide** weisen ebenfalls eine gute Wärmeleitfähigkeit auf und werden bspw. als Additive für die Optimierung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten untersucht. Sog. Hybrid-Nanoflüssigkeiten sind eine Mischung aus metallischem, polymerem

oder nichtmetallischem Nanopulver mit Grundflüssigkeit. Dem, im Vergleich zu Silber, geringerem Materialpreis steht jedoch eine geringere Oxidationsbeständigkeit gegenüber.

3.1.4 Klebstoffe mit Nanomaterialien

- **Nanokohlenstoffe** (u.a. Carbon Nanotube-modifizierte Klebstoffe auf Polyurethan- und Silikon-Basis) werden bereits in der (Mikro-)Elektronik eingesetzt, um elektrostatische Entladungen zu verhindern, bspw. für das Kleben und Vergießen von ESD- und EMV-empfindlichen Bauteilen¹
- **Nanosilber** wird ebenfalls bereits in leitfähigen Klebstoffen für die Elektronik eingesetzt. Bislang sind die Materialeigenschaften aber noch nicht für die Leistungselektronik geeignet.
- Diverse Hersteller von Klebstoffen geben darüber an Nanomaterialien einzusetzen, ohne dies jedoch näher zu spezifizieren.

3.2 Analyse der Übertragbarkeit auf die Leistungselektronik

Hauptentwicklungstreiber in der Leistungselektronik sind, wie schon in Kap. 1 erwähnt, die Forderungen an hohe Zuverlässigkeit trotz immer kleiner werdender Bauvolumina und stets steigenden elektrischen Leistungen, d.h. Strömen und Spannungen. Hohe Spannungen erfordern ausreichende Spannungsfestigkeit der Isolationsmaterialien, hohe Ströme entsprechend ausgelegte Querschnitte der Leiterbahnen.

Für diese „high performance“ Einsatzgebiete ist es daher nicht hinreichend, bspw. ein Polymer durch Zusatz von Nanopartikel aus Kupfer leitfähig zu machen, da eine hohe Stromtragfähigkeit benötigt wird, die nur durch massive Kupferbahnen erreicht werden kann. Damit ist die Übertragbarkeit der vielen Anwendungsbeispiele aus der Nanotechnologie in die Leistungselektronik nicht ohne weiteres möglich, und es müssen die einzelnen möglichen Einsatzgebiete gezielt herausgesucht werden. Im Folgenden wird versucht, gemäß der Einteilung wie im vorigen Kapitel jeweils die mögliche Übertragbarkeit zu bewerten.

3.2.1 Bzgl. elektr. Leitfähigkeit

Wenn hohe elektr. Ströme transportiert werden müssen, sind Materialien aus massivem Kupfer oder Silber derzeit alternativlos. Jedoch werden in der Verbindungstechnik Lot- oder Sinterpasten eingesetzt, die nicht aus reinem Kupfer oder Silber bestehen und nach dem Verbindungsprozess eine erhebliche Porosität aufweisen können, also insgesamt im Vergleich zu massiven Materialien den Strom schlechter leiten können. Aufgrund der geringen Dicke der Schicht ist der Durchgangswiderstand für den elektr. Strom trotzdem noch akzeptabel. Die **Aufbau- und Verbindungstechnik** bietet daher ein Einsatzfeld für Nanomaterialien.

Konventionelle Lot- und Sinterpasten enthalten Partikel im Mikrometer-Maßstab. Nano-Partikel beeinflussen zwar meist die Verarbeitungseigenschaften der Pasten ungünstig, bieten aber Vorteile durch z.B. geringere Prozesstemperaturen beim Löt- oder Sintern und meist bessere (mechanische) Eigenschaften der entstehenden Verbindungen. Partikelverteilungen mit nur einem Teil nanoskaliger

• ¹ Projekt ESDBond: <https://www.skz.de/forschung/aktuelles/neuartige-elektrisch-leitfaehige-klebstoffe-gegen-elektromagnetische-stoerungen>

Partikel könnten evtl. einen Kompromiss zwischen noch guten Verarbeitungseigenschaften und akzeptablen Mehrkosten bieten.

Leistungselektronische Geräte enthalten neben ihrem Kernstück, dem Leistungshalbleiter(n) bzw. dem Leistungsmodul, weitere Komponenten, bei denen ein Einsatz von Materialien, die durch Nanomaterialien elektr. leitfähig gemacht worden sind, denkbar ist:

- Printed Electronics für low power Leiterbahnen bei Sensoren, Treiberschaltungen o..
Nanomaterialien werden bereits bei gedruckter Elektronik als Bestandteil der Druckpasten und -tinten eingesetzt. Printed Electronics sind in der Leistungselektronik bisher nur wenig verbreitet, weil die Herstellung meist zusätzliche Prozessschritte zur konventionellen Herstelltechnologie benötigt, was zu Mehrkosten bei der Fertigung führt. Für eine weitere Verbreitung muss daher der Eigenschaftsgewinn durch den Einsatz von Nanomaterialien verbessert werden, so dass sich die Mehrkosten rentieren. Zum Beispiel könnten die elektrischen Verbindungen zu Sensoren oder gar inklusive der Sensoren auf eine Ebene oder auch 3D-Fläche gedruckt werden, um bspw. den Sensor auf einer schon bestückten Platine auf einem IC-Gehäuse aufzubringen. Auch die Treiberschaltungen, mit denen die Leistungshalbleiter angesteuert werden, arbeiten nur mit kleinen Spannungen und Strömen, so dass hier nicht die besonders hohen Anforderungen an die Leitermaterialien bestehen, wie es im Leistungsreich der Fall ist.
- Ableitung kapazitiver Ströme
Durch die ständigen Strom-/Spannungswechsel, die durch das Schalten der Leistungshalbleiter hervorgerufen werden, entstehen sog. parasitäre kapazitive Verluste: in den umgebenden dielektrischen Materialien werden ständig Ladungsverschiebungen hervorgerufen. Störender sind jedoch die in nahegelegenen Metallflächen oder Leiterbahnen über kapazitive Kopplung verursachten Common-Mode-Ströme, die nicht nur Verluste darstellen, sondern auch Funktionsstörungen wie z.B. fehlerhafte Sensorsignale hervorrufen können. Dieser Effekt konterkariert die Anstrengungen, Isolationschichten möglichst dünn zu gestalten, um den Wärmewiderstand gering zu halten, weil dadurch die kapazitive Kopplung verstärkt wird. Eine Isolationschicht mit einer sehr dünnen, elektr. leitenden Zwischenschicht könnte hier möglicherweise Abhilfe schaffen, weil dadurch die Ableitströme und damit die Verluste sehr viel geringer gehalten werden könnten. Da die Ableitströme nur klein sind, würde eine minimale elektr. Leitfähigkeit ausreichen. Für eine derartige Funktionalisierung elektrischer Isolationsmaterialien könnten nanoskalige Füllstoffe gut geeignet sein, da diese die nicht-elektrischen Werkstoffeigenschaften der Isolationsmaterialien nur wenig beeinflussen. Natürlich wäre der Nachweis einer nach wie vor ausreichenden elektr. Isolationsfähigkeit gegenüber hohen Spannungen sowie Kriechströmen unbedingt erforderlich.
- EMV-Schutz
Elektromagnetische Störungen müssen v.a. bei leistungselektronischen Geräten unter einem frequenzabhängigen Grenzwert liegen. Häufig muss ein hoher Aufwand betrieben werden, um die Grenzwerte gerade bei hohen Frequenzen einhalten zu können. In vielen Fällen wäre ein Kunststoffgehäuse anstelle eines geerdeten Metallgehäuses wünschenswert (Kosten, Gewicht, elektr. Isolation). Eine elektrisch funktionalisierte Oberfläche des Kunststoffgehäuses

könnte evtl. wie ein Metallkäfig wirken und elektromagnetische Störungen abhalten, während das normale Kunststoffgehäuse die elektr. Isolierung sicherstellt. Für diesen Einsatzzweck ist in der funktionalisierten Oberfläche nur eine geringe Stromtragfähigkeit erforderlich.

3.2.2 Bzgl. Wärmeleitfähigkeit

Aufgrund der auf kleinem Bauraum entstehenden Wärmeverluste im Leistungshalbleiter ist ein gutes Wärmemanagement extrem wichtig. Hohe Temperaturen verringern die Lebensdauer aller elektronischen Komponenten bzw. können diese sogar schädigen. Daher besteht ein sehr großes Interesse an Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Allerdings muss auch die elektrische Isolationsfähigkeit stets gegeben sein. Polymermaterialien bieten eine hohe elektr. Isolierfähigkeit, aber nur eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit.

Die Wärmeleitfähigkeit kann durch Zusatzstoffe verbessert werden. Der Einsatz von elektr. leitfähigen Zusatzstoffen wie CNTs oder Nano-Silberpartikel ist hier jedoch nicht ohne weiteres möglich, da die Isolierfestigkeit des Polymers beibehalten werden muss. Nicht elektrisch leitende Materialien wie z.B. Aluminiumoxidpartikel stehen daher im Fokus. Zwar können derartige Füllstoffe die Verarbeitungseigenschaften verschlechtern und auch die Kosten erhöhen, allerdings sind gut wärmeleitende Polymere für besondere Einsatzfälle unverzichtbar.

Neben der Werkstoffeigenschaft „Wärmeleitfähigkeit“ ist für das System jedoch auch die Dicke der Materialschicht entscheidend. Besser ist daher die Angabe des thermischen Widerstandes, der beide Parameter – Dicke und Wärmeleitfähigkeit – beinhaltet. Im Gesamt-System ergibt sich der therm. Widerstand aus allen Einzelschichten zusammen. Hier kann unter Umständen ein Aufbau mit einer sehr dünnen Schicht aus schlecht wärmeleitendem Isolationspolymer ggf. besser sein als eine dicke Schicht eines durch Füllstoffe besser wärmeleitenden Polymers sein. Es kommt also immer auf den jeweiligen Einsatzzweck an.

Eine Besonderheit stellen sog. **Thermal Interface Materials (TIM)** dar: diese verbinden z.B. den Kühlkörper mit dem Leistungsmodul und werden möglichst dünn aufgetragen. Für noch dünnere TIM-Schichten werden Materialien mit feineren Partikeln der Füllstoffe benötigt als derzeit auf dem Markt erhältlich sind. Hier könnten nanoskalige, elektr. nichtleitende Materialien gut eingesetzt werden.

Ganz wichtig für diesen Einsatzbereich ist eine blasenfreie Schicht. Vermehrt werden daher sog. „phase-change materials“ (PCM) eingesetzt. PCM bestehen aus einer Polymermatrix und Füllstoffen. Ein PCM ist so konzipiert, dass es seinen Zustand bei der Phasenübergangstemperatur ändert, was bedeutet, dass es oberhalb der Phasenübergangstemperatur von einem festen Material zu einer weichen, anpassungsfähigen Grenzfläche übergeht. Dadurch kann sich das Produkt an die Konturen der Oberfläche anpassen und alle Hohlräume und kleinen Lücken ausfüllen, genau wie es eine Paste beim Auftragen tun würde, was eine minimale Klebeliniendicke und einen minimalen Wärmewiderstand an der Grenzfläche ermöglicht. Durch eine Rillenstruktur der PCM-Folie kann Luft, die z.B. beim Applizieren eingebracht wurde, gut entweichen.

3.2.3 Bzgl. Klebstoffe

Hier müssen zwei Einsatzgebiete unterschieden werden:

a) Temporäre Fixierung vor dem Lötprozess

Die Polymere, die die Klebewirkung verursachen, sollen bei einer temporären Fixierung während des Lötprozesses rückstandsfrei „ausbrennen“. Dies ist normalerweise kein Problem, auch wenn der Lötprozess teilweise unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt wird. Kritischer ist eine Blasenbildung durch gasförmige Zersetzungsprodukte, die nicht schnell genug entweichen können. Klebstoffe mit Additiven aus metallischen Nano-Partikeln oder -Fasern würden während des Zersetzungsprozesses der Organik ein stabiles Gerüst aufrechterhalten und damit Kanäle bereitstellen, durch die die Zersetzungsgase entweichen könnten. Sobald das Lot aufschmelzen würde, würde es durch die Kapillarwirkung der Kanäle in das offene Netzwerk aufgesogen werden. Gleichzeitig könnten dadurch seitliche Löt-Ausflüsse vermieden werden.

b) Kleben anstelle von Löten

Hierbei soll neben der mechanischen Verbindung auch eine ausreichende elektr. Leitfähigkeit gegeben sein. Wie schon oben dargestellt, eignet sich die geringe elektr. Leitfähigkeit funktionalisierter Polymere nicht für die Komponenten des Leistungsteils. Sogenannte low power-Bauelemente könnten jedoch durchaus mit einem leitfähigen Kleber aufgebracht werden, wenn die Lebensdauer der Klebeverbindung gleichwertig zu einer konventionellen Lotverbindung gleichwertig ist.

4 Potenzialanalyse

Für eine tiefergehende Potenzialanalyse wurden weitere Informationen gesammelt und analysiert. Dieses Kapitel führt daher zunächst die Ergebnisse einer umfangreicheren Literaturrecherche und auch die Aussagen von Interviews mit ausgewählten Seminar-Teilnehmern auf. Anschließend erfolgen kurze Fazits anderer Arbeitspakete, aus denen für die Potenzialanalyse wichtige Daten gewonnen wurden, bevor eine endgültige Schlussfolgerung gezogen wird.

4.1 Literaturrecherche

4.1.1 Literaturrecherche Nanotechnologien in der Leistungselektronik

Eine tiefere Literaturrecherche (Schlagworte Nano und "Power Electronics") ergab insgesamt 338 Publikationen. Im internationalen Vergleich steht die deutsche Forschung an 8. Stelle. Dominiert wird das Forschungsgebiet hingegen von China und den USA.

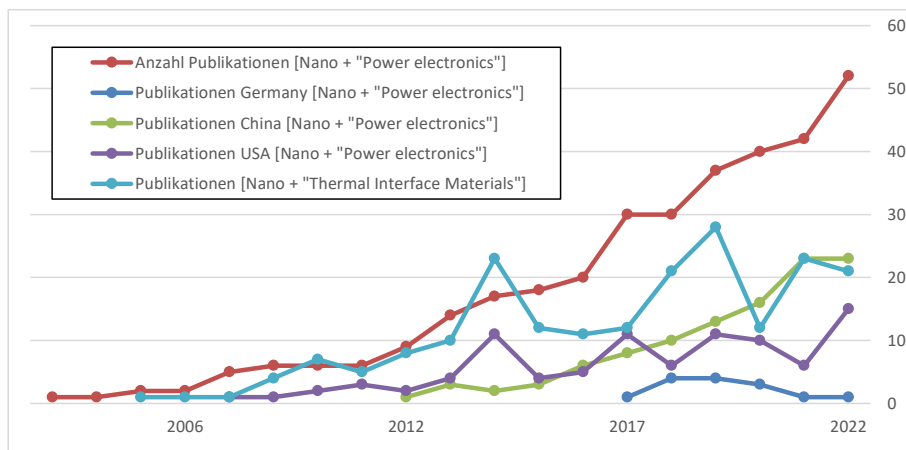


Abbildung 6: Anzahl und Herkunft der Recherche-Treffer zu „Nano + Power Electronics“

Nachstehend sind vielversprechende Studien herausgegriffen und näher dargestellt. Dabei zeigt sich, dass in der Regel Komposite, Legierungen oder Hybride Materialansätze verfolgt werden:

1. **Cu-CNT-Verbundlötpaste:** In einer Forschungsgruppe aus Südkorea wurde das Transient Liquid Phase (TLP)-Bonden von Cu-Plättchen unter Verwendung von Sn-beschichteter mehrwandiger Cu-CNT-Verbundlötpaste mit Flussmittel vom Typ RMA untersucht. Die Dicke der auf das Cu-Plättchen aufgedruckten Lotpaste betrug 150 µm. Die Verbindung wandelte sich nach 8 min Bonden bei 260 °C vollständig in Cu₃Sn IMC um.²
2. **Co-Zr-Ta und Al₂O₃-Nanoschichten:** Michael et al. reported 150-µm-tall solenoid inductors embedded with a sputtered nanolaminated magnetic core for high-frequency power conversion. An inductance of up to 500 nH was achieved with a stack of 20 layers alternating between an 80-nm-thick Co-Zr-Ta magnetic layer and a 4-nm-thick Al₂O₃ layer.³
3. **Nanogranular cobalt-based alloys (CoNiFe):** have recently received much attention due to their low core loss at high frequencies. Notable studies of MEMS inductors with this material category include CoNiFe and sputtered cobalt-based amorphous alloys. Alternating electro-deposition and co-sputtering are the two most common deposition methods that have been demonstrated for nanolaminated thin-film structures. (...) Another notable category of magnetic cores is **composite cores**. Using microscale and nanoscale magnetic particles that are electrically isolated, the eddy current loss can be significantly reduced, thus extending nanocomposite materials to high-frequency applications. Magnetic composites consist of magnetic particles that are electrically isolated either by insulator shells or by non-conducting media such as polymers. Casting or screen printing has the advantage of forming a large-volume magnetic core at low costs.⁴
4. **Polymer/CNT nanocomposites:** Thermally conductive polymer composites offer new possibilities for replacing metal parts in several applications, including power electronics (...) thanks to the polymer advantages such as light weight, corrosion resistance and ease of processing. Current interest to improve the thermal conductivity of polymers is focused on the selective addition of nanofillers with high thermal conductivity. Unusually high thermal conductivity makes carbon nanotube (CNT) the best promising candidate material for thermally conductive composites. However, the thermal conductivities of polymer/CNT nanocomposites are relatively low compared with expectations from the intrinsic thermal conductivity of CNTs. The challenge primarily comes from the large interfacial thermal resistance between the CNT and the surrounding polymer matrix, which hinders the transfer of phonon

² Rajendran, S.H.; Jung, D. H.; Cheon, W.S.; Jung, J.P. Übergangsflüssigphasenbonden von Kupfer unter Verwendung von Sn-beschichteten Cu-MWCNT-Verbundpulvern für die Leistungselektronik. Appl. Wissenschaft. 2019, 9, 529.

³ Michel, J. P. et al. Ultra-low profile integrated magnetic inductors and transformers for HF applications. *IEEE Trans. Magn.* **55**, 1–7 (2019).

⁴ <https://doi.org/10.1038/s41378-021-00275-w>

dominating heat conduction in polymer and CNT. This article reviews the status of worldwide research in the thermal conductivity of CNTs and their polymer nanocomposites.⁵

5. **Nanocopper:** A study characterized the mechanical properties of sintered nano-copper particles using the high-temperature nanoindentation tests. The results showed that: firstly, **the hardness and indentation modulus of the sintered nano-copper particles increased rapidly when the loading rate increased below 0.2 mN.s⁻¹ and then stabilized, and decreased with increased applied load up to 30 mN.** Next, by extracting the yield stress and strain hardening index, a plastic stress-strain constitutive model at room temperature for sintered nano-copper particles was obtained. Finally, the high temperature nanoindentation tests were performed at 140 C-200 C on the sintered nano-copper particles prepared under different assisted pressures, which showed that a high assisted pressure resulted in the reduced temperature sensitivity of hardness and indentation modulus. The creep tests indicated that high operation temperature resulted in a high steady-state creep rate, which negatively impacted the creep resistance of sintered nano-copper particles, while the higher assisted pressure could improve the creep resistance.⁶
6. **Cu@Ag core-shell material:** not only has advantages of Cu and Ag elements but also inhibits Ag migration and Cu oxidation issues, showing potential in die attachments for power electronics. In this work, a high-temperature Cu@Ag solder preform was firstly fabricated by electromagnetic compaction (EMC) on Cu@Ag core-shell powder. Unlike conventional solder preforms, a void-free joint can be directly achieved with this Cu@Ag solder preform by simple thermal compression at low temperature and pressure without melting. Moreover, with the benefits of high-energy forming process, other vital properties of solder preforms, including electrical property, thermal stability, corrosion resistance and joint integrity, were also improved compared to conventional die attach materials. For instance, the corrosion potential of this Cu@Ag solder preform was -0.14 V, which indicates excellent corrosion resistance similar to pure Ag (-0.12 V). And no oxidation can be detected on this solder preform after storage in air for at least one year. These performance improvements were a result of enormous pressure generated instantaneously on Cu@Ag powder during EMC. The results showed that a flaw-free Cu@Ag solder preform with a high compactness of over 99 % can be successfully fabricated by appropriate compaction pressure of 13.4 MPa.⁷
7. **Graphene/Cu-Cu(x)O:** Sintered nano-copper is becoming a promising candidate as thermal interface material (TIM) for die attaching in high power electronics. It exhibits much higher thermal conductivity and operating temperature than conventional TIMs based on polymer and solder joints, and higher electromigration resistance and lower cost than sintered nano-silver TIM. However, the performance of existing sintered nano-copper is lower than expected because of high porosity resulted from poor sintering of copper particles with oxide shell. Here we demonstrate a method of improving the thermal conductivity of sintered copper by addition of graphene/Cu-Cu (x) O with controllable diameter of similar to 163 nm. The

⁵ <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.11.004>

⁶ <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.105168>

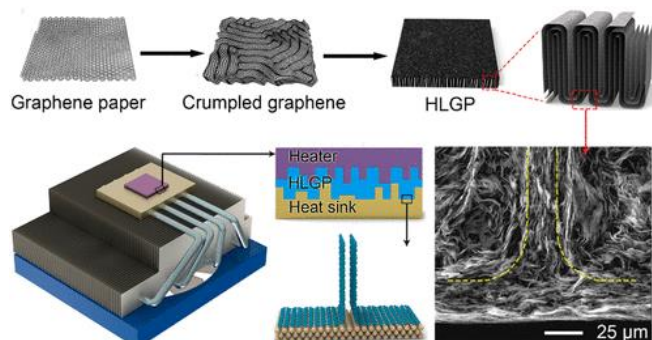
⁷ <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117056>

measured thermal conductivity of the sintered composite TIM is enhanced by up to 123.5% compared with that of sintered pure copper. It can be understood as a result of the formation of graphene heat transfer network in sintered TIM. In addition, the C-O-Cu bonds formed at the interface between graphene and copper nanoparticles are critical for improving thermal performance as well as electrical and mechanical performance of the TIM. The developed TIM can be widely used in high power electronic packaging especially for high temperature applications, including IGBT, SiC and GaN power devices.⁸

8. **VACNT:** Nanostructured TIMs promise improvement in effective thermal resistance compared to conventional bulk materials. However, a number of advancements are needed before the promise of such materials is fully realized in practical applications. Particular emphasis is needed on the alignment of materials and reduction of boundary resistances at the interfaces between the fillers and the matrix. For VACNT TIM, improvements in CNT synthesis including precise control over volume fraction, elimination of defects, and array height are all needed. Furthermore, the ability to effectively mechanically transfer the arrays from their native substrates to separate usable substrates is critical for potential commercial use. Mechanical transfer mechanisms must reduce interfacial thermal resistances, while ensuring all CNTs are being effectively used in heat conduction. For nanoparticle based composite TIMs, hybrids of multiple sized particles show promise in enhanced thermal transport. Also, functionalizing the particles with an additional agent meant to reduce boundary resistance between the particles and the matrix is to be investigated further.⁹
9. **Graphene:** Using conventional graphene paper as starting material, a graphene monolith could be fabricated by a mechanical machining process using a self-developed automation equipment. The resulting HLGP has a hierarchical microstructure composed of mainly vertically aligned graphene and a thin cap of horizontal graphene layers on both the top and bottom sides. The vertically oriented graphene within the HLGP contributes to a high through-plane thermal conductivity ($143 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), while maintaining excellent deformability (low compressive modulus of 0.87 MPa). Most metals have satisfactory thermal conductivity but relatively high compressive modulus, and soft silicones are typically thermal insulators ($0.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Currently, it is a great challenge to develop a soft material with the thermal conductivity up to metal level for TIM application. This study solves this problem by constructing a graphene-based microstructure composed of mainly vertical graphene and a thin cap of horizontal graphene layers on both the top and bottom sides through a mechanical machining process to manipulate the stacked architecture of conventional graphene paper. In the actual TIM performance measurement, the system cooling efficiency with our graphene monolith as TIM is 3 times as high as that of the state-of-the-art commercial TIM, demonstrating the superior ability to solve the interfacial heat transfer issues in electronic systems.

⁸ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6528/abfc71>

⁹ <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.10.014>



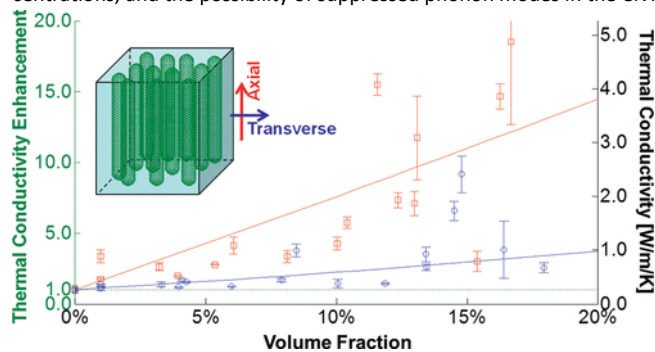
In addition, we demonstrated that the horizontal graphene layers at both surface sides play a crucial role to reduce the contact thermal resistance of the HLGP in the TIM performance measurement. As a result, the cooling efficiency of the HLGP used as a TIM is superior than that of a state-of-the-art thermal pad ($17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) with a decrease of the heater temperature by 65°C versus 38°C , showing a significant improvement in the heat dissipation capacity in electronics. In addition, the HLGP with excellent compressibility (compressive modulus: 0.87 MPa) is a kind of thermal pad, by which, compared to other types of TIMs (*e.g.*, thermal greases and phase change materials), our HLGP as a TIM has some special advantages, such as the capacity of thermal shock absorption and the possibility for applying to multiple IC chips with different heights. Moreover, based on the all-inorganic composition of graphene, our HLGP not only exhibits good stability during TIM operation but also possesses a wide operating temperature range (-196 to 500°C), making the HLGP a promising candidate for next-generation TIM applications. Last but not least, this work aims to study the relation between structure and properties of a graphene-based monolith and focuses on modulating the arrangement of graphene sheets to achieve an HLGP with the best balance between thermal conductivity and mechanical property. Therefore, the HLGP reported in this study was directly fabricated by a mechanical machining process of the graphene paper, without any further chemical or physical optimized treatment. Herein, some designed surface modification, such as surface functionalization or the micro/nanostructured surface treatment of HLGP, may be carried out to modulate the interfacial interaction of graphene and its contact surface to further reduce the contact thermal resistance between the HLGP and the heater/heat sink, aiming at different application scenarios.¹⁰

10. **Hybrid graphene-metal particle fillers:** The thermal conductivity of resulting composites was increased by similar to 500% in a temperature range from 300K to 400K at a small graphene loading fraction of 5-vol.-%. The unusually strong enhancement of thermal properties was attributed to the high intrinsic thermal conductivity of graphene, strong graphene coupling to matrix materials, and the large range of the length-scale-from nanometers to micrometers-of the graphene and silver particle fillers. The obtained results are important for the thermal management of advanced electronics and optoelectronics.¹¹

¹⁰ <https://doi.org/10.1021/acs.nano.9b05163>

¹¹ <https://doi.org/10.1063/1.3687173>

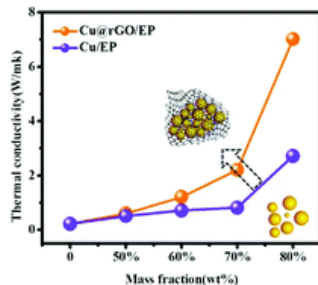
11. **Aligned multiwall CNT nanocomposite films:** Nanostructured composites containing aligned carbon nanotubes (CNTs) are very promising as interface materials for electronic systems and thermoelectric power generators. We report the first data for the thermal conductivity of densified, aligned multiwall CNT nanocomposite films for a range of CNT volume fractions. A 1 vol % CNT composite more than doubles the thermal conductivity of the base polymer. Denser arrays (17 vol % CNTs) enhance the thermal conductivity by as much as a factor of 18 and there is a nonlinear trend with CNT volume fraction. This article discusses the Impact of CNT density on thermal conduction considering boundary resistances, increased defect concentrations, and the possibility of suppressed phonon modes in the CNTs.¹²



12. **Reduced graphene oxide encapsulated copper sphere (Cu@rGO):** The Cu@rGO hybrid exhibits a 3D structure with high oxidation resistance. The obtained polymer composites exhibit a high thermal conductivity ($7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), as the loading of the Cu@rGO hybrids is 80 wt%, which is 2.6 times higher than that of the polymer composites filled with only Cu spheres. The high thermal conductivity might be attributed to the synergistic effects between spherical Cu and rGO nano-sheets, which enhanced the oxidation resistance of copper and increased the thermal transfer path, along with the reduced interfacial thermal resistance between Cu and epoxy resins. In addition, the Cu@rGO/epoxy composites reveal a decreased thermal expansion coefficient (CTE), an increased glass transition temperature (T_g), and an enhanced shear strength. This unique 3D core-shell Cu@rGO structure and its epoxy composites with high thermal conductivity and dimensional stability could be suitable as excellent thermal interface materials in advanced electronic packaging techniques.¹³

¹² <https://doi.org/10.1021/nn200847u>

¹³ <https://doi.org/10.1039/C7TC04427E>



13. **Hybrid (VACNT, Cu, Al):** This paper describes the nano-TIM approaches taken and results obtained by four teams responding to the DARPA challenge of pursuing the development of low thermal resistance of 1 mm² K/W and high compliance and reliability TIMs. These approaches include the use of metal nanosprings (GE), laminated solder and flexible graphite films (Teledyne), multiwalled carbon nanotubes (CNTs) with layered metallic bonding materials (Raytheon), and open-ended CNTs (Georgia Tech (GT)). Following a detailed description of the specific nano-TIM approaches taken and of the metrology developed and used to measure the very low thermal resistivities, the thermal performance achieved by these nano-TIMs, with constant thermal load, as well as under temperature cycling and in extended life testing (aging), will be presented. It has been found that the nano-TIMs developed by all four teams can provide thermal interface resistivities well below 10 mm² K/W and that GE's copper nanospring TIMs can consistently achieve thermal interface resistances in the range of 1 mm² K/W. This paper also introduces efforts undertaken for next generation TIMs to reach thermal interface resistance of just 0.1 mm² K/W. (...) The goal of the NTI program was to improve the thermal bottle-neck in DoD systems by lowering TIM resistance to 1 mm² K/W ensuring thermoplastic like compliance and reworkability. This paper summarized the work of four performers: GT, Raytheon, GE, and Teledyne from their samples tested at NREL. It is found all the performers improved substantially from the SOA. GT achieved a thermal resistance best value of 3.9 mm² K/W, Raytheon best values are close to 2.9 mm² K/W, Teledyne achieved a value close to 1.8 mm² K/W, and GE a best value of 0.7 mm² K/W. To that end in goal four performers provided samples that improved substantially on the SOA. GE NTIs were the only ones that consistently met the DARPA goals offering 1 mm² K/W. YFA efforts are paving the way for further reductions in resistivity toward 0.1 mm² K/W.¹⁴

¹⁴ <https://doi.org/10.1115/1.4031602>

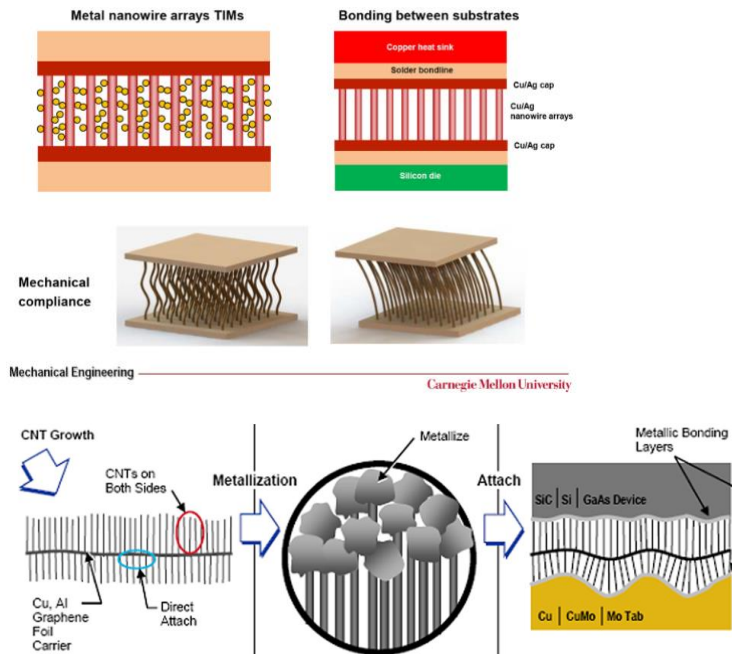
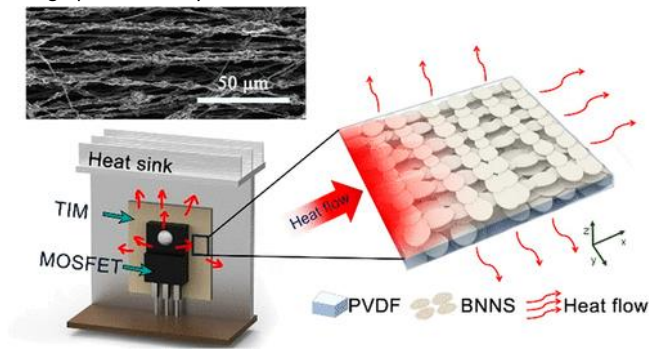
Next Generation Thermal Interface Materials

Fig. 2 Raytheon nTIM device overview. Multiwalled CNTs grown on both sides of a graphene or metallic foil; ends of CNTs are metallized to enhance adhesion.

14. **Boron nitride (BN) nanofibers and pure indium (In):** novel TIMs consisted of boron nitride (BN) nanofibers and pure indium (In) solder for heat dissipation applications. The BN nanofibers are fabricated by electrospinning process and nitridation treatment. After surface metallization by sputtering, the porous BN film is infiltrated with liquid indium by squeeze casting to form the final solid composites. The new composites show the in-plane and through-plane thermal conductivity respectively of 60 and 20 W/m K. The direction dependence thermal properties of the TIM are due to the anisotropic thermal performance of BN nanofibers in the composite. A low thermal contact resistance of 0.2 K mm²/W is also achieved at the interface between this new composite and copper substrate. These competent thermal properties demonstrate the great potential of the BN-In TIMs in thermal management for electronic system.¹⁵
15. **Polymer nanocomposites containing orientated boron nitride nanosheets (BNNs):** simultaneously exhibit high thermal conductivity enhancement, excellent electrical insulation, and outstanding flexibility. These nanocomposite films can be easily constructed by electrospinning polymer/BNNs nanocomposite fibers, vertically folding the electrospun nanocomposite fibers and the subsequent pressing. The nanocomposite films exhibit thickness-dependent in-

¹⁵ <https://doi.org/10.1007/s10854-014-1880-8>

plane thermal conductivity, which can reach $16.3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ in the $18 \mu\text{m}$ thick nanocomposite film with 33 wt % BNNSs. In addition, the nanocomposite films have superior electrically insulating properties compared with the pristine polymer, such as reduced dielectric loss, increased electrical resistivity, and enhanced breakdown strength. The strong thermal management capability of the nanocomposite film was demonstrated in switching power supply, which showed the importance of high in-plane thermal conductivity in thermal management of high-power density electronic devices.¹⁶



4.1.2 Bewertung der Ergebnisse der Literaturrecherche hinsichtlich Anwendung in der Leistungselektronik

Inwiefern können Nanotechnologien die Eigenschaften und Anforderungen in der Anwendung verbessern? Die Recherche zeigte deutlich, dass vor allem bei Themen der Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungselektronik viel geforscht wird. Durch Materialien mit höheren Wärmeleitfähigkeiten wird ein verbessertes Wärmemanagement adressiert. Dies betrifft sowohl elektrisch leitfähige Verbindungen (Löten/Sintern) als auch elektrisch isolierende Übergänge (TIM).

Lötverbindungen sind meist sowohl nicht sehr gut wärmeleitend als auch eine mechanische Schwachstelle im System. TLP-Systeme bieten bessere mechan. Eigenschaften, was sich angeblich durch Einsatz von CNTs und Nanopartikel aus Kupfer noch verbessern lässt (1). Andererseits verlangt das TLP-bonden eine präzise Prozesssteuerung, weshalb üblicherweise "normale" Lote verwendet werden, die also beim Abkühlen normal erstarren und keine intermetallischen Phasen bilden.

Sintern statt Löten hat sich in den letzten Jahren als eine Alternative zum Löten bei mechanisch stark beanspruchten Verbindungen wie dem Bonden der Leistungshalbleiter verbreitet. Nanopartikel aus Kupfer zum Sintern sind naheliegend. Interessant ist, dass das mechanische Verhalten der Nano-Teilchen anders als bei Makropartikeln ist. Das bietet Potential, die mechanischen Eigenschaften derartiger Sinterschichten und damit die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu verbessern. Auch Kombinationen aus Graphen und nano-Cu zeigten in Versuchen in Summe bessere Effekte als allein (5, 7).

¹⁶ <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b06290>

Auch nicht starre Wärmeübergangsschichten müssen einen guten Wärmedurchgang ermöglichen, dürfen also keine Poren oder Luftschichten aufweisen, müssen verformbar sein, um sich den Oberflächenunebenheiten anzupassen, und möglichst dünn sein. Die Wärmeleitfähigkeit ist natürlich ebenfalls ein wichtiges Kriterium. Mehrfach wird über CNTs als Füller in Polymeren berichtet. CNTs weisen jedoch einen hohen Grenzflächenwiderstand auf und verbessern dadurch die Wärmeleitfähigkeit von Polymeren deutlich weniger als erwartet. Das Potential wird dennoch als hoch eingestuft; mit einer geeigneten Funktionalisierung der CNT-Oberfläche könnte das Problem gelöst werden (4, 8,11).

Interessanter könnte der Einsatz von Graphen sein, das als monolithisches Material sowohl hohe Wärmeleitfähigkeiten auch bei erhöhten Temperaturen aufweist, als auch kompressibel ist und sich so an Oberflächenunebenheiten anpassen kann (9, 10). Die elektrische Leitfähigkeit von Graphen könnte jedoch den Einsatz einschränken: sie ist zu hoch für elektrische Isolation, zu niedrig im Vergleich zu Kupfersinterschichten.

Bornitridschichten sind möglicherweise die bessere Alternative, da sehr gut elektrisch isolierend bei gleichzeitig sehr guter Wärmeleitfähigkeit. Ein Artikel berichtete über einen Polymer-BN-Verbundwerkstoff (15) als TIM-Werkstoff in der Leistungselektronik.

Magnetische Kernmaterialien stellen einen weiteren möglichen Einsatzbereich für Nanotechnologie/Nanomaterialien dar, der bisher noch nicht erwähnt wurde. Tatsächlich sind sog. „nanocrystalline Kern“ bereits Stand der Technik. Allerdings erfolgt die Herstellung durch gezielte Kristallisation eines amorphen Metallbandes in einer Wärmebehandlung – also ohne Zusatz von Nanopartikeln.

Andere Methoden zur Herstellung von Magnetkernen wurden durch die Recherche erfasst: einerseits lassen sich über nanometer dünne Schichten winzige Magnetkerne herstellen (2, 3). Es wurde aber auch berichtet, dass über Mischungen aus geeigneten Mikro- und Nano-Partikeln verbesserte Kernmaterialien mit deutlich erniedrigten Verlusten gerade für Hochfrequenzanwendungen hergestellt werden können (3).

4.2 Expertenaussagen: Interviews mit Seminarteilnehmern

4.2.1 Vorgehensweise und Umfang

Für tiefergehende Informationen wurden ausgewählte Seminarteilnehmenden (insgesamt 14) persönlich kontaktiert und interviewt (Dauer/Interview: ca. 20-30 Minuten). Hierbei wurden stets dieselben – im Vorfeld ausgearbeitete – Fragen gestellt. Durch den persönlichen Kontakt gab es die Möglichkeit, bei Bedarf flexibel auf die Kerninteressen der Interviewpartner einzugehen.

Gleiche oder ähnliche Antworten wurden im Folgenden zusammenfasst.

4.2.2 Über die Teilnehmenden

- **Bestand im Vorfeld bereits Wissen über die Leistungselektronik oder die Nanotechnologie?**
Ca. 50 % der Teilnehmenden geben an, bereits Erfahrungen zum Einsatz von Nanotechnologien in der Leistungselektronik gemacht zu haben (bspw. aus Entwicklungs-Projekten oder durch Informationen aus Fachzeitschriften). In nahezu allen Fällen bezeichnen sich die

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Befragten aber auch als Laie oder Anfänger im jeweils anderen Bereich. Auffällig ist dabei auch, dass Bedenken bzgl. der Sicherheit von Nanomaterialien nur bei Teilnehmenden mit geringem Wissensstand über die Nanotechnologie vorliegen.

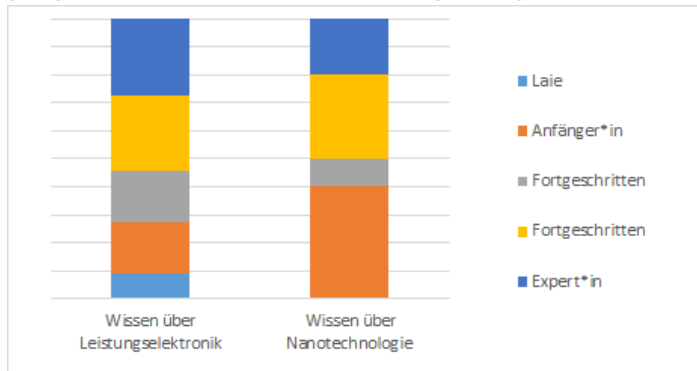


Abbildung 7: Wissenshintergrund derjenigen Personen, die interviewt wurden

- **Was waren die Gründe für die Teilnahme am Seminar?**
 - Meist: Wissen und Know-How ausbauen
 - Meist: Überblick zu aktuellen Entwicklungen erhalten
 - Meist: Netzwerken & Kontakte knüpfen, Austausch mit Industrie (auch Konkurrenz)
 - Überwiegend: Horizont erweitern (Über den Tellerrand schauen und Suche nach neuen Einsatzgebieten)
 - Vereinzelt: Suche nach Kooperationspartnern

4.2.3 Interview: Beurteilung der wirtschaftlichen Situation in den Branchen Nanotechnologie und Leistungselektronik

- **Wie ist Deutschland in der Nanotechnologie im internationalen Vergleich aufgestellt? Wie schätzen Sie die Entwicklung in den nächsten 10 Jahren ein.**
 - Die Situation wird überwiegend gut empfunden (auch im wissenschaftlichen Bereich) und der Entwicklung werden gute Aussichten und hohes Potenzial zugetraut. Besonders im europäischen Vergleich wird die Kompetenz Deutschlands im Bereich Nanotechnologien herausgehoben.
 - Hindernisse werden im Bereich Regularien und einer negativen Einordnung des Begriffs "nano" gesehen.
 - Allerdings wird auch eine Verlagerung von Kompetenzen und Produktionen nach China befürchtet.
- **Wie ist Deutschland in den Bereichen Leistungselektronik im internationalen Vergleich aufgestellt? Wie schätzen Sie die Entwicklung in den nächsten 10 Jahren ein.**
 - Die Situation wird durchschnittlich bewertet jedoch tendenziell gut empfunden.
 - Generell sind in Deutschland viele große und global aktive Hersteller ansässig. Auch hier wird die Situation in dem nächsten Jahre als positiv beschrieben.

- Nach einzelnen Meinungen ist jedoch eine Abwanderung vieler Akteure zu beobachten (Outsourcing der Modulherstellung, aber auch Werkstoffe).
- Die Situation im wissenschaftlichen Bereich wird mit wenig Veröffentlichungen hingegen eher schlecht bewertet.

4.2.4 Interview: Technologische Potenziale

- **Wo glauben Sie, dass Nanotechnologie zu Verbesserungen in der Leistungselektronik führen kann? / Wo sehen Sie Einsatzgebiete in der Leistungselektronik?**
 - Aufbau- und Verbindungstechnik: thermischer Pfad/Wärmemanagement, höhere Leistungsdichten, ...
 - Optimierung des Sinterprozesses: Taktzeiten optimieren, Sintertemperatur reduzieren (von 230 auf 180 °C) --> thermische Verspannung gering halten (speziell bei Keramiken und Gläsern)
 - Funktionalisierung von Leistungsmodulen mittels pastöser Pasten (z.B. aufgedruckter Temperatursensor; auch auf 3D-gedruckten Keramiken; Ausblick: Multimaterialdruck).
 - Oberflächen-Behandlung
 - Anbindung und Verguss
 - Direct Bonded Copper (DCB)-Design: flexiblere Struktur
 - Dünne Schichten (2D-Systeme): Leistungsdichte, Barriereigenschaften
 - Temperaturmanagement (Entwärmung durch hohe Oberflächen/ Nanotechnologien)
 - Chemische Beständigkeit
- **Wo sehen Sie die größten Hürden bei der Umsetzung von Potenzialen?**
 - Kosten (nur bei geringen Mengen relevant) --> aber: Preis/Leistung muss passen
 - Regulatorisch (eigene Erfahrung: Genehmigung zur Einarbeitung von nanotubes).
 - Handhabbarkeit von Nanopulvern: Prozessierbarkeit bzw. Verarbeitbarkeit (Probleme beim Druck und bei der Formulierung), Stabilitätsprobleme (Mikropasten sind stabiler)
 - Handhabbarkeit von Nanopulvern: Arbeitssicherheit (Auffällig ist, dass Bedenken bzgl. Sicherheit von Nanomaterialien nur bei Teilnehmenden mit geringem Wissen über die Nanotechnologie vorliegen.)
 - Skaling (Qualitätsfragen, aber auch Reaktivitäten)
 - Akzeptanz eines fremdartigen Prozesses: Überzeugung notwendig; auch neue, angepasste Diagnosemethoden und Validierungstests nötig
- **Themenvorschläge für Folgeveranstaltung:**
 - **Verständnis für Oberflächen und Anbindungen** zu Substrat, Loten, Cu, Hartmould: wie sind Grenzschichten ausgebildet? Wie entstehen Spannungen? Welche Relevanz hat dies in Bezug auf lange Haltbarkeit; Hilft Strukturierung von Oberflächen?

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Oberflächeneffekte z.B. DCB (Cu-Keramik), Die-Oberflächen, Unterschiede bei ENIG-Oberflächen

- **Charakterisierung von Stabilität und Zuverlässigkeit** (Diagnosemöglichkeiten und Relevanz bzw. Übertragbarkeit auf Nanosysteme (bestehende Methoden geben bei neuen Technologien häufig "falschen Alarm"), Alterungstests)
- **Sicherheit und Gesundheitsaspekte**
- **Grundlagen und aktuelle Forschungsbefunde** zu Leistungsmodulen, Sintern, flat-welding, Vergussmassen/Klebstoffen
- Marktüberblick, Trends und Neuentwicklungen im Bereich Vergussmassen/Klebstoffe (speziell Leitfähigkeit)
- Überblick zu Verfahren / Materialien (ggf. Materialroadmap, inklusive Gaps)
- Anforderungen zu den elektrischen Eigenschaften der Materialien für die LE
- Funktionalisierungsmöglichkeiten durch Nanotechnologien
- Porenverschluss z.B. mit Nanomaterialien
- Packaging von neuen Wide Bandgap Halbleitern(WBG)
- Aufbringen dünner Schichten
- Aktuelle Entwicklungen im Bereich GaN
- Kompositmaterialien
- Resiliente Lieferketten
- Bonden auf Ni als neuer Trend
- Prozessverständnis hinsichtlich Löt-/Sinterbarkeit
- Druckloses Sintern

Kommentiert [Ga1]: raus nehmen?

Kommentiert [BB2R1]: ich würde es stehen lassen

4.3 Analyse und Priorisierung

4.3.1 Analyse der bisherigen Ergebnisse aus Recherchen und Expertenaussagen

Bei den Gesprächen mit Experten aus verschiedenen Industriebranchen der Leistungselektronik (Kap. 2.1) wurde der Schwerpunkt von Anfang an auf isolierende Stoffe gelegt (Isolationsschichten, Vergussmassen, TIM o.ä.). Für viele Experten stand der Preis an erster Stelle für diese Materialien, die z.T. einen merklichen Anteil der Herstellkosten ausmachen. Aber auch die Verarbeitbarkeit muss geeignet sein, hier vor allem: blasenfreies Applizieren, ausreichend niedrige Viskosität und hohe Standfestigkeit für hohe Genauigkeit beim Applizieren durch z.B. Dispensen.

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein wichtiges Kriterium und sollte mind. 1.5 W/mK aufweisen. Materialien mit > 3 W/mK wären wünschenswert.

Daneben spielen die mechan. Eigenschaften, Alterungsverhalten, hohe Spannungsfestigkeit, Stabilität gegenüber Teilentladung, keine schädli. Reaktionsprodukte bei Überlastung (z.B. keine Fluorgase), und die Eignung für hohe du/dt eine Rolle.

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

© Cluster Leistungselektronik, Cluster Nanotechnologie

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

Im Automotive-Bereich gilt zudem die Forderung, dass die Isolationsstoffe z.T. auch bei -40°C noch weichelastisch sein müssen.

Dielektr. Eigenschaften sind weniger relevant, weil deren Auswirkungen durch den Systemaufbau beeinflusst werden können.

Dünne Isolationsstoffe (bei gleicher Spannungsfestigkeit usw.) sind wünschenswert, um geometrisch dichter bauen zu können und weniger Wärmewiderstand zu haben, aber es besteht das Problem der kapazitiven Kopplung.

Die Cross-Industry-Recherche (Kap. 2.3) deckte einen breiteren Bereich ab. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit für Wärmeübergangsmaterialien (TIM u.a.) in der Leistungselektronik war dort ein konkretes Thema. Daneben wurde mit Löten und Sintern aber auch andere Anwendungen im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik betrachtet. Neben der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sind beim Löten und Sintern v.a. die mechanischen Eigenschaften der Verbindung entscheidend. Da diese Verbindungen im Betrieb thermomechanisch beansprucht werden, sind sie entscheidend für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Gesamtsystems.

Andere Themen der Cross-Industry-Recherche zeigten das Entwicklungspotential von Nanomaterialien, wie z.B. der Einsatz nanoskaliger Drucktinten für gedruckte Elektronik zum Aufbringen von Sensor-Leiterbahnen, die nur geringe Ströme transportieren müssen. Derartige Printed Electronics gibt es schon in einzelnen kommerziellen Anwendungen, in der Leistungselektronik muss jedoch noch ein geeigneter Use Case gefunden werden. Daneben existieren vielfältige Ideen, durch die die Wünsche der Entwickler von Leistungselektronik möglicherweise erfüllt werden können. Stichworte: Maßnahmen gegen kapazitive Kopplung, EMV-Schutz, Kleben statt Löten.

Die für die Potentialanalyse durchgeführte spezielle Recherche (Kap. 3.1) bestätigte und ergänzte die oben genannten Punkte. Zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bestehen viele verschiedene Konzepte, die mehr oder weniger gut für Anwendungen in der Leistungselektronik geeignet sind. Wie bereits erwähnt darf je nach Anwendungszweck entweder die Isolationseigenschaft des TIM-Materials durch die Füllstoffe nicht leiden, oder es muss eine hohe Stromtragfähigkeit gewährleistet sein, die derzeit nur durch Kupfer oder Silber-haltige Materialien erreicht wird. Durch den starken Preisverfall bei CNTs, bietet sich der Einsatz dieser Materialklasse als Füllstoff zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit an. Für den Einsatz von CNTs fehlt jedoch noch eine passende Funktionalisierung, um den hohen Wärmeübergangswiderstand in der Polymermatrix zu senken. Graphen oder Bornitrid-Schichten scheinen sehr vielversprechend, sind aber bisher nur in einer frühen Entwicklungsphase.

Magnetische Kernmaterialien könnten ein weiterer Einsatzbereich für Nanomaterialien sein. Auch hier muss noch Entwicklungsarbeit investiert werden, um konkrete Einsatzbereiche nennen zu können.

4.3.2 Priorisierung auf bestimmte Anwendungsfelder

Priorisierung und Identifikation von Innovationsthemen:

Wärmemanagement in leistungselektronischen Systemen ist das Thema, was sowohl die Anwender aus der Leistungselektronik, als auch die Entwickler im Bereich Nanotechnologie am meisten beschäftigt, sowie in der Literatur-Recherche viele Resultate brachte. Damit sind die folgenden zwei Themen am höchsten priorisiert:

a) **elektrische + thermische Anbindung:**

z.B. des Leistungshalbleiters an die Kupfer-Unterlage; über Löten oder Sintern

b) **elektr. isolierende + thermische Anbindung:**

z.B. des Leistungsmoduls über Wärmeleitpasten/TIM an den Kühlkörper

Generell gilt das Überthema Wärmemanagement für fast alle Isolationsmaterialien, die in der Leistungselektronik verbaut werden, denn auch über z.B. ein Kunststoffgehäuse muss entstehende Verlustwärme abgeführt werden. Damit stellt die **Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit die wichtigste Eigenschaftsverbesserung** dar, auf die ja bereits der Fokus der recherchierten Entwicklungen in der Nanotechnologie liegt. Natürlich muss dabei stets sichergestellt werden, dass neue Materialentwicklungen auch die übrigen Randbedingungen erfüllen.

Ein weiteres Thema mit hoher Priorität ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit der thermomechanisch stark beanspruchten festen Anbindung des Leistungshalbleiters auf der Kupferunterlage dar. Hier steht v.a. die **Verbesserung der Zyklfestigkeit von Lot- oder Sinterverbindungen** im Fokus.

Eng im Zusammenhang zu derartigen fehlerfreien und festen Verbindungen ist das **Thema Oberflächen** zu sehen. In den Interviews wurde der Wunsch nach Knowhow über Oberflächen und deren Analyse angesprochen.

Ebenfalls aus den Interviews kam die Anregung, die Themen **Verarbeitbarkeit, Stabilität und sicherer Umgang von/mit Nanomaterialien** zu behandeln. Offensichtlich besteht bei Personen, die keine eigene Erfahrung mit Nanomaterialien haben eine Unsicherheit darüber. Diese Unsicherheit behindert zusätzlich den Einsatz von Nanomaterialien.

Maßnahmen gegen kapazitive Kopplung und EMV-Schutz über funktionalisierte Oberflächen wären ebenfalls interessant.

Gedruckte Elektronik und **Kleben statt Löten** ist in der Leistungselektronik kein Thema. Im Leistungsmodul können die elektr./therm./mechan. Anforderungen sicher nicht durch Drucken oder Kleben erreicht werden. Für benachbarte Hilfskomponenten wie z.B. Sensoren oder mechatronisch integrierte Schaltungen (MID) könnten möglicherweise jedoch über diese Technologien hergestellt werden. Diese Themen sollten nicht ganz fallen gelassen werden.

5 Zusammenfassung der beiden Seminare

5.1 Seminar I Nanomaterialien in der Leistungselektronik: Anwendungen, in denen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Alterungsbeständigkeit gefordert sind

Der offizielle Startschuss für die gemeinsamen Aktivitäten des Clusters Leistungselektronik und des Clusters Nanotechnologie fällt am 12. Juli 2022 in Nürnberg. Das Kooperationsseminar adressiert die Stakeholder aus beiden Clustern mit dem Ziel Materialhersteller mit Anwendern zusammenzubringen, um gegenseitig technische Informationen auszutauschen und das gemeinsame Potenzial zu identifizieren und auszunutzen. Es gelingt schon in diesem Auftaktseminar Vertrauen aufzubauen, so dass die Akteure in einem geschützten Raum offen diskutieren und Probleme ansprechen, um Lösungen entwickeln zu können. Dr.-Ing. Bernd Bitterlich stellt den bayerischen Cluster Leistungselektronik und das europäische Netzwerk ECPE und deren Serviceangebote vor. Er betont, dass die Aufgabe der Leistungselektronik darin besteht, elektrische Energie mit Hilfe von Halbleiterbauelementen möglichst effizient in die jeweils benötigte Form umzuwandeln und den Leistungsfluss zu steuern. Dr.-Ing. Peter Grambow stellt den Cluster Nanotechnologie und seine Subnetzwerke vor. Er zeigt den industriellen Entwicklungstrend in der Nanotechnologie am Beispiel der Nanokohlenstoffmaterialien. Der Preis von CNT (Kohlenstoffnanoröhren) ist in den letzten Jahren deutlich gesunken, wodurch neue Anwendungen möglich werden. Darauf folgen die eingeladenen sechs Fachvorträge, deren Vortragsinhalte im Folgenden kurz zusammengefasst werden:

Alterungsverhalten von (modifizierten) Vergussmassen bei Hochtemperaturanwendungen

Dr.-Ing. Felipe Wolff Fabris, Leiter des europäischen Zentrums für Dispersionstechnologien (EZD)

Funktionen von Vergussmassen bei elektrischen Bauteilen:

- Schutz vor äußeren Einflüssen
(Temperatur-, Medienbelastung, mech. Belastung etc.)
- Abfuhr der inneren Wärme
- Elektrische Isolation



Quelle: www.Sonderhoff.com

Anwendungen:

Mikroelektronik-Komponenten im Bereich von Motoren und Getrieben
(hohe Temperaturen, Vibrationen, Verschmutzung etc.)

Herr Wolff Fabris stellt zunächst vor, welche Herausforderungen moderne Vergussmassen im Automobilbereich genügen müssen:

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

	Epoxid	Polyurethan	Silikon
Mechan. Festigkeit	hoch	von niedrig bis hoch	niedrig
Einsatztemperaturen	ca. 150 °C	ca. 100 °C	ca. 180 °C
Glasübergangstemperatur	Hoch	Mittel	Niedrig
Vorteile	Chemikalienbeständig	Chemikalienbeständig, Abriebfest	Hohe T-beständigkeit, Dämpfungsfunktion
Nachteile	exaktes Mischverhältnis muss eingehalten werden	wenig T-beständigkeit	Kosten

Er präsentiert die üblicherweise verwendeten Vergussmassen und geht detailliert auf die Eigenschaften der verwendeten Materialien ein:

Dann berichtet er über die Ergebnisse des IGF-Projekts **Alterungsverhalten von Vergussmassen bei Hochtemperaturanwendungen (AlVerHo)**. Ungefüllte Vergussmassen werden dabei Temperaturen zwischen 125°C und 250°C für 100 bis 1000 Stunden ausgesetzt und anschließend thermisch, mechanisch und optisch bewertet. Verschiedene Harzsysteme, Polyurethane, und Silikon-Systeme werden systematisch miteinander verglichen. Das Epoxidharz Altropol EN1072 stellt sich im direkten Vergleich bis 185°C als am besten geeignet im Sinne der thermischen Alterung.

Im nächsten Schritt werden mit Additiven modifizierte Harzsysteme untersucht. Dabei spielen die verwendeten Additive selbst (Al_2O_3 und SiO_2), der Einarbeitungsprozess und die Höhe des Füllgrades eine wichtige Rolle. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch den Einsatz der beiden Füllstoffe Al_2O_3 und SiO_2 eine maßgebliche Verbesserung der Silikon-Vergussmasse erreicht werden konnte und ein Einsatz über 1000 Stunden bei 250°C möglich ist.

Es soll ein Folgeprojekt entstehen, bei dem das Alterungsverhalten von Vergussmassen unter elektrothermischen Belastungen bei rechteckförmiger Spannung untersucht werden soll.

Silber Nanodrähte im industriellen Einsatz

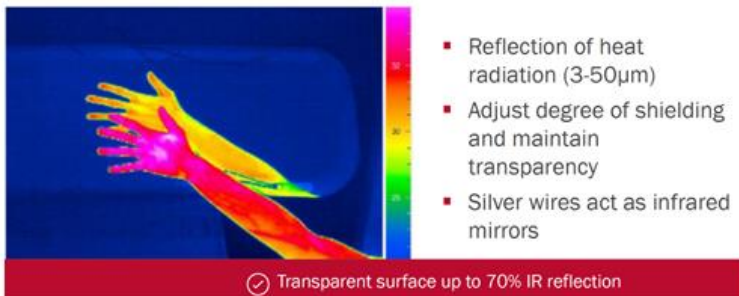
Oliver Zech, Chairman of the Executive Board, CEO bei HEIQ RAS AG

HEIQ, früher RAS AG ist einer der wichtigsten Hersteller von Silbernandrähten in Europa. Herr Zech konzentriert sich zunächst auf die Präsentation der technischen Eigenschaften von Silbernandrähten: Länge 10-40µm, Durchmesser 30-40nm, hohe elektrische Leitfähigkeit, hohe Transparenz.

Das Hauptprodukt ist ECOS[®]HC mit einem Füllgrad von 4 Gewichtsprozent Silberdrähten in einer Formulierung mit Wasser oder Alkohol-basiert. Das Material kann mit üblichen Beschichtungstechniken aufgebracht werden. Die wesentlichen Anwendungsgebiete sind:

Transparentes Heizen, transparente LOW E-Beschichtungen, transparente leitfähige Folien, Nutzung im ESD-Bereich.

Im folgenden Bild ist die Wirkung einer LOW E-Beschichtung zu sehen. Die Silberdrähte wirken wie ein Infrarotspiegel:



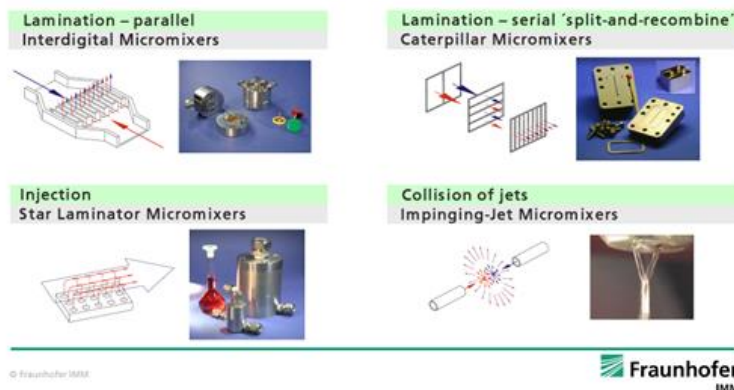
Weitere Anwendungsbeispiele für Transparenz und Leitfähigkeit werden ausführlich vorgestellt.

Herstellung und Charakterisierung von maßgeschneiderten Nanopartikeln für die Entwicklung von Funktionsmaterialien

Dr. Sperling, Fraunhofer Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme IMM

Nach einer kurzen Vorstellung des Fraunhoferinstituts IMM in Mainz legt Herr Dr. Sperling den Schwerpunkt auf die maßgeschneiderte Herstellung von Mikro- und Nanopartikulären Systemen und deren Anwendungen in der Medizin, Pharmazie und im Consumer-Bereich. Um die Systeme sorgfältig analysieren zu können werden aufwändige Charakterisierungs-Methoden eingesetzt. Im Vordergrund stehen zunächst sogenannte Mikroreaktoren in der deren Herstellung Fraunhofer langjährige Erfahrung hat:

Large Portfolio of Different Mixing Principles and Micromixers Concepts



Durch den Einsatz der Mikroreaktoren können sehr schnell verschiedenste Mischungen verschiedener Materialien hergestellt und später auch vergleichsweise einfach hochskaliert werden. Z.B. anorganische Halbleitersysteme wie CdSe, InP oder CuInS₂.

Am Beispiel der Herstellung von sogenannten Quantenpunkt-Systemen zeigt sich die Leistungsfähigkeit auf eindrucksvolle Weise. Beispielsweise kann die Größe der Nanosysteme durch die

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

Reaktionstemperatur exakt eingestellt werden. Dr. Sperling stellt darüber hinaus die Variabilität sogenannter Core-Shell-Systeme dar mit deren Hilfe Substanzen im Inneren durch einen speziellen Auslösungsmechanismus (PH-Wert, Temperatur, Licht usw.) gezielt freigesetzt werden können.

Vergussmassen: Eigenschaften, Anwendungen in der Leistungselektronik und Kundenanforderungen

Alexander Teufl, Von Roll Deutschland GmbH

Herr Teufl konzentriert sich auf die Verwendungsbereiche verschiedener Harzsysteme, die vergossen, beschichtet bzw. imprägniert werden. Die Hauptproduktbereiche sind: E-Mobilität, Electronics, Batteriespeicher und Spulen. Im Einzelnen sind die Anforderungen an Vergussmassen die chemische Stabilität, die Langzeitstabilität, die elektrischen Isolationseigenschaften und die Stabilität gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Außerdem sind die Wärmeverteilung sowie die Widerstandsfähigkeit gegen Luftfeuchte von Bedeutung.

Der wichtigste Parameter bei der Verarbeitung ist die Viskosität der Vergussmassen. Im Bild unten sind die wichtigsten Eigenschaften verschiedener Vergussmassen zusammengestellt:

Properties	Epoxy Cold Curing	Epoxy Hot Curing	Polyurethane	Next. Gen. Polyurethane
Mechanical strength				
Moisture resistance				
Oil resistance				
High temp. Resistance	180°C	220°C	155°C	150°C
Thermal shock				
Flexibility				
Adhesion				
Electrical strength				

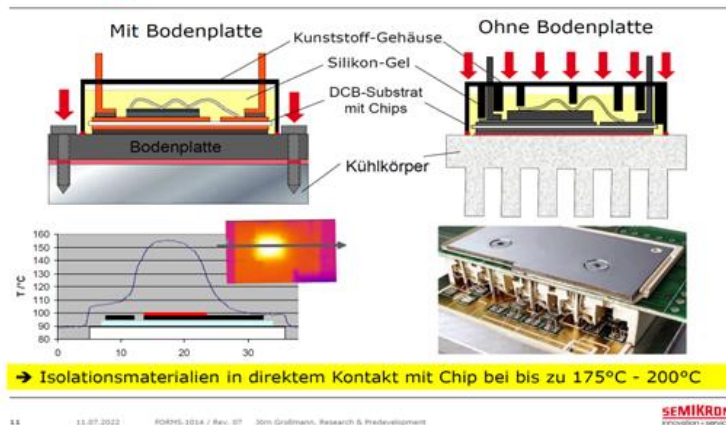
	Very good properties
	Good properties
	Medium properties

Anforderungen an Isolationsmaterialien in Leistungshalbleitern

Dr.-Ing. Jörn Großmann, Research and Predevelopment, Senior Engineer, Semikron

Herr Großmann stellt kurz die Fa. Semikron vor und widmet sich danach dem Aufbau leistungselektronischer Module (siehe Bild unten).

Aufbau eines leistungselektronischen Moduls: Silikonverguss als Isolationsmaterial



Er stellt die Anforderungen an die verwendeten Isolationsmaterialien in den Vordergrund. Übliche Betriebstemperaturen der Leistungsmodule liegen bei 125°C -175°C. Die Betriebsdauer bewegt sich zwischen 10.000 und 200.000 Betriebsstunden. Spezifische Kundenanforderungen, gesetzliche Vorgaben und Betriebsinterne Anforderungen ergeben das Gesamtbild.

Die resultierenden Anforderungen an Isolationsmaterialien in leistungselektronischen Modulen und Systemen sind im Folgenden zusammengefasst:

Kritischste Prüfungen leistungselektronischer Module:

- Temperaturwechsel (z.B. bis zu 500 Wechsel –40 °C / 150 °C)
- Beschleunigte Prüfung der Dauerbetriebstemperatur (z.B. nach UL 1557)
 - Fehlerströme in feuchter Wärme bei 85 °C & 85 % r.F. mit $V_{\text{Prüf}} = 1000\text{V}$ („HV-H3TRB“)
 - Fehlerströme im Dauerbetrieb z.B. bei $T = 150\text{ °C}$ mit $V_{\text{Prüf}} = 1200\text{V}$ („HTRB“)
- Tief- oder Hochtemperaturlagerung (z.B. 1000h @ 150 °C, 1000 h @ -40 °C)

Wichtige Eigenschaften von Isolationsmaterialien in der Leistungselektronik:

- Flammgeschützte Kunststoffe: UL-94 V-0 gelisteter Werkstoff mit hohem relativem Temperaturindex ($RTI_{\text{elektr}} > 130\text{ °C}$ nach UL 746 B) & maximale Dauergebrauchstemperatur (z.B. $RTI_{\text{elektr}} = 200\text{ °C}$) sowie CTI 600 V (IEC 60112)
- Vergussmaterialien: Konstante Durchschlagfestigkeit $>20\text{ kV/mm}$ und elastische Eigenschaften im gesamten Einsatzbereich z.B. bei Extrembedingungen –60 °C bis 225 °C (SiC)
- Konform mit Umweltrichtlinien (RoHS, REACH, GADSL)

Eine Evaluierung der Verwendbarkeit von Isolationsmaterialien durch Vortests mit elektrischen Feldern u.a. auch bzgl. Verträglichkeit ist somit erforderlich. Es ist festzustellen, dass bereits kleinste Konzentrationen von freigesetzten Inhaltsstoffen Effekte im Leistungshalbleiter hervorrufen können. Daher sind Methoden, wie die Ionenchromatographie erforderlich, um die Freisetzung anorganischer

Akteursbericht Nanomaterialien für die Leistungselektronik

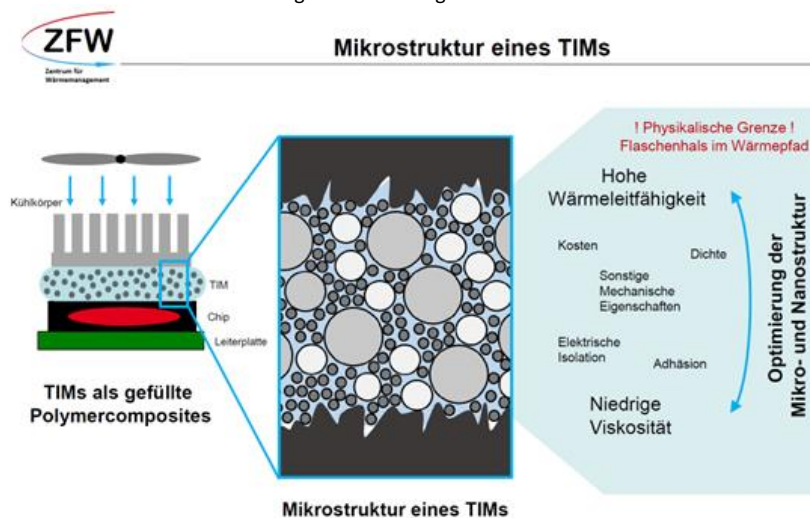
© Cluster Leistungselektronik, Cluster Nanotechnologie

Ionen aus Kunststoffen erfassen zu können. Außerdem ist ein tieferes Verständnis dieser elektrochemischen Reaktionen nötig.

Thermische Interfacematerialien (TIM) als Flaschenhals im Wärmepfad, Möglichkeiten zur Optimierung der Mikro- und Nanostruktur

OLIVER Roser; Zentrum für Wärmemanagement (ZFW)

Im abschließenden Vortrag werden die Möglichkeiten vorgestellt sogenannte thermische Interface-materialien (TIM) mittels Simulation zu optimieren. Dabei spielt die Mikro- bzw. Nanostrukturierung die entscheidende Rolle. Die Auswirkung der Strukturierung auf die Wärmeleitfähigkeit, Viskosität und andere Parameter ist im folgenden Bild dargestellt:



Es zeigt sich, dass neben der Größenverteilung und dem Dispergierverhalten der Partikel auch die Form von erheblicher Bedeutung ist. In der Simulation kann zwischen Fasern/ Stäbchen, Plättchen, Körnern und Kugeln unterschieden werden. Durch vergleichende Untersuchungen z.B. bezüglich der optimierten Packungsdichte entstehen durch numerische Berechnungen neue Möglichkeiten den Wärmetransport und die Viskosität zu optimieren.

Abschlussdiskussion:

Die Auftaktveranstaltung der beiden Cluster Nanotechnologie und Leistungselektronik wird als sehr positiv wahrgenommen. Eine Fortsetzung der Aktivitäten wird von den Teilnehmern außerordentlich befürwortet. Es zeigt sich, dass großes Interesse für die Funktionalisierungsmöglichkeiten von Kunststoffen besteht. Darüber hinaus wird die Aufbau- und Verbindungstechnik hinterfragt. Die Rolle der Prozesstechnik wird ebenfalls betont und detailliert diskutiert. Insgesamt werden einige bestehenden Probleme offen angesprochen und in einer angenehmen, sachlichen Art und Weise besprochen.

5.2 Seminar II Nanomaterialien in der Leistungselektronik: funktionalisierte Kunststoffe sowie Aufbau- und Verbindungstechnik

Nach dem sehr erfolgreichen ersten Seminar im Juli befasste sich das Folge-Seminar am 8. November 2022 nun mit den Schwerpunkten Strategien für die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) bzw. Funktionalisierung von Kunststoffen.

Ein Übersichtsvortrag von Heraeus stellte verschiedenen Trends und Beispiele für Materialsysteme in der AVT von Leistungselektronik vor. Die anschließenden drei Vorträge befassten sich ebenfalls mit der AVT: mit der Dickschichttechnik sowie der Verbindungstechnik mittels Sintern. Ganz andere Anwendungsbereiche waren Inhalt der letzten beiden Vorträge: elektrisch leitfähig gemachte Kunststoffe ermöglichen die Integration von elektronischen Komponenten wie Sensoren. Die Ultraschall-dispersion stellt eine Methode zur Herstellung derartig funktionalisierter Polymere dar. Die Inhalte der sechs Beiträge werden im Folgenden kurz beschrieben:

Materialien in der Aufbau- und Verbindungstechnik für die Leistungselektronik

Anton Z. Miric, Head of Market Strategy, BL Power Electronic Materials, Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG

In der AVT von Leistungselektronik wird eine Vielzahl verschiedener Materialsysteme eingesetzt. Trends seien u.a. kleinere Halbleiter, was erhöhte Temperaturen in den umgebenden Materialien bedingt und auch eine bessere Wärmeableitung durch die Kapselung erfordert, denn Zuverlässigkeit und Lebensdauer dürfen nicht verschlechtert werden.

Eine der vielen Themen des Vortrages war das Fügen durch Lote oder durch Sintern. Derzeitige Lotpasten haben Partikel im Bereich von grob 50µm. Der Trend geht zu kleineren Partikeln, weil auch die Bauteile kleiner werden. Sinterfügen statt Löten führt zu einer deutlichen Verbesserung der elektrischen und Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit und der maximalen Einsatztemperatur. Derzeitige Sinterpasten enthalten Partikel im Mikronbereich. Als Ausblick nannte Hr. Miric u.a. das großflächige Sintern, um beispielsweise Module direkt auf den Kühlkörper anzusintern und damit eine sehr gute Wärmeableitung zu erreichen.

STATE-OF-THE-ART POWER ELECTRONICS PACKAGING MATERIALS

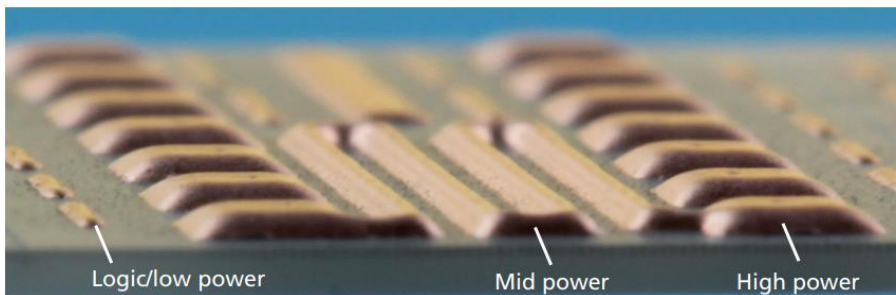


Source: Challenges of New Packaging Solutions for Power Modules, Prof. R. Eisele FH Kiel, Anton Miric HDE, PCIM Conference May 2021

(Nano-)Materialien in der Dickschichttechnik

Dr.-Ing. Lars Rebenklau, Richard Schmidt, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Abteilung Hybride Mikrosysteme

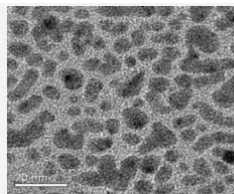
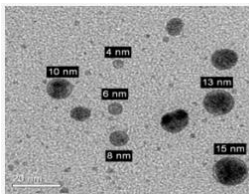
Ein Schwerpunkt in der Abteilung hybride Mikrosysteme sind Hybridschaltungen auf Dickschichtbasis: elektronische Module, die aus verschiedenen Komponenten, Materialien und Fertigungstechnologien bestehen und auf einem gesinterten Keramiksubstrat integriert sind. Die Pasten bestehen aus speziellen anorganischen Pulvermischungen, organischen Bindemitteln und Lösemittel und werden per Siebdruck oder ähnlichen Verfahren auf Substrate aufgebracht. Hr. Schmidt stellte mehrere Entwicklungsbeispiele für Dickschichttechnik in der Leistungselektronik vor. Als Alternative zu gängigen Substraten wie AMB/DCB lässt sich beispielsweise auf AlN eine spezielle Kupfer-Paste aufbringen. Mit Schichtdicken von 15 bis 300µm können Logik und Leistungsteil auf einem Substrat angebracht werden, und eine sehr gute Thermozyklrierbarkeit erreicht werden.



Silbersintern mit insitu-Nano-Partikeln

Dr. Battist Rábay, Geschäftsführer, Nano-Join GmbH

Das Sinterfügen, das im Vergleich zum Löten zu einer höherfesten Verbindung zwischen z.B. Halbleiterchip und Kupfer führt, wird üblicherweise mit normalen Silber-Pulvern unter erhöhter Temperatur und mit einem Anpressdruck durchgeführt. Die Besonderheit der Nano-Join-Technik liegt in der Verwendung von Metallsalzen, aus denen beim Erhitzen nano-skalierte Partikel entstehen, die die Lücken zwischen den normalen Mikro-Partikeln füllen. Dadurch lassen sich selbst mit drucklosem Sintern gleiche oder bessere Eigenschaften wie mit den normalen Sinterpasten erreichen. Außerdem enthält die Nano-Join-Paste nur sehr geringen Mengen an organischen Bindemitteln und Lösemitteln, wodurch das Risiko von Prozessdefekten bei der Trocknung minimiert wird. Auch auf vielen Substratmaterialien und ungünstigen Oberflächen können feste Verbindungen erzielt werden.

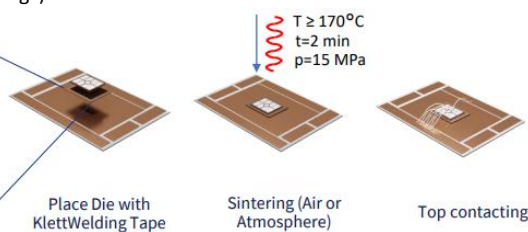
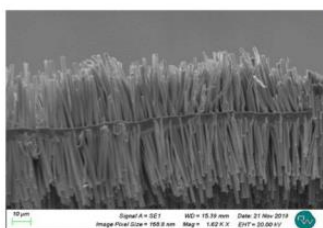


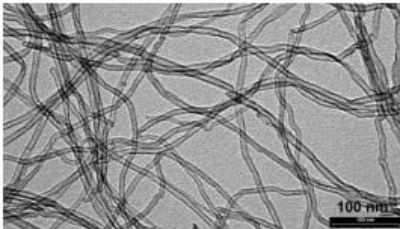
- Combustion of silver salt gives small nano particles

AVT (Aufbau- und Verbindungstechnik) mit Nanowires

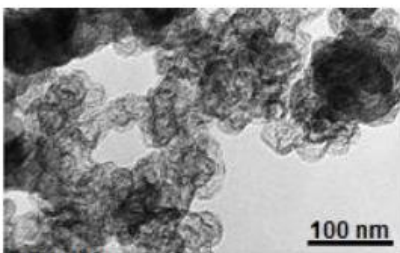
Sebastian Quednau, CSO, NanoWired GmbH

Wie der vorherige Vortrag zielt Nanowires auf eine Verbesserung des Sinterfügens ab. Dazu werden in einem separaten Prozess auf einem Kupfersubstrat (oder auf dünner Cu-Folie) senkrecht wachsende nano-Whisker aus Kupfer abgeschieden. Über Klettsintern (eine Oberfläche enthält Nanowires) erreicht man beim Sinterfügen mit Druckunterstützung gute Eigenschaften. Wenn beide Oberflächen mit Nanowires belegt sind, kann man sogar schon durch Anpressen bei Raumtemperatur eine Verbindung erreichen („Klettswelding“).





Carbon Nano Tubes



Carbon Black

Funktionalisierung von Kunststoffen durch den Einsatz von Nanowerkstoffen und Potenziale für die Leistungselektronik

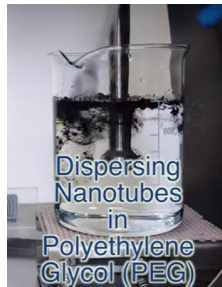
Ricardo Decker, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Aktive Werkstoffe und Verbundstrukturen an der Technischen Universität Chemnitz

Kunststoffe können elektrisch leitend gemacht werden durch Einarbeitung entsprechender Füllstoffe, wie z.B. Metallpartikel oder Fasern aus Kohlenstoff oder z.B. Stahl. Als Anwendungsbeispiel stellte Hr. Decker das Einbringen von Sensoren in die Faserstruktur eines Windrad-Flügels über einen 2-Komponenten-Spritzgussprozess vor, bei dem gleichzeitig die Kontaktierung und Verkapselung des Sensors erfolgt. Elektrisch leitfähige Klebstoffe können für funktionale Schichten eingesetzt werden. Als Anwendungsbeispiel dient wieder der Flügel eines Windrades: die über einen Druckprozess funktionalisierte Fläche weist einen definierten elektr. Widerstand auf, wodurch der Flügel gegen Eisbildung im Winter beheizt werden kann. Eine Herausforderung ist der hohe Anteil an Füllstoffen, der für eine elektrische Leitfähigkeit erforderlich ist. Teilweise lässt sich dies durch den Einsatz von Mischungen aus CNT (carbon nano tubes) und Ruß lösen. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht u.a. an einer verbesserten Stromtrag- und einer verbesserten Wärmeleitfähigkeit.

Nano-verstärkte Hochleistungs-Klebstoffe: Nano-Dispersion und Formulierung mittels Ultraschall

Thomas Hielscher, Geschäftsführer, Hielscher Ultrasonics GmbH

Der Vortrag ging detailliert auf die Möglichkeiten Ultraschalltechnologie zum Mischen, Dispergieren, Funktionalisieren von Dispersionen ein. Ein Video beispielsweise die Dispergierung von CNTs in Hochviskose Dispersionen benötigen zur Ultraschall einen Durchflussreaktor, durch den das wird. Das Technikum von Hielscher bietet u.a. Machbarkeitsstudien und Lohnfertigung als an.



der
Entgasen und
zeigte
Polyethylenglykol.
Behandlung mit
Medium gepumpt
Dienstleistungen

Abschlussdiskussion:

In der Abschlussdiskussion kam das Thema Sicherheit im Umgang mit potenziell gefährlichen Nanomaterialien auf. Beispielsweise sind Silber-Nanopartikel in entsprechenden Pasten sicher eingebunden. Aber Reste, die an den Verarbeitungsanlagen eintrocknen, könnten Stäube verursachen, die von Mitarbeitern eingeatmet werden könnten. Mehrere Teilnehmer erläuterten ihre speziellen Methoden dagegen, die jedoch nur für Kleinmengen praktikabel sind. In einer zukünftigen Veranstaltung soll daher auf das Thema Sicherheit und Verarbeitung eingegangen werden.

5.3 Referentenliste

- Dr.-Ing. Felipe Wolff Fabris
Leiter des europäischen Zentrums für Dispersionstechnologien (EZD)
 - <https://www.ezd.eu/>
 - Bereich / Branche: Nanotechnologie
 - Über: Das EZD ist ein interdisziplinäres Forschungs- und innovationszentrum dessen Hauptaugenmerk auf der Herstellung und Charakterisierung von Dispersionen liegt. Dabei beschäftigt sich das EZD besonders mit Themen der Formulierung, Dispergierung, Beschichtung und Analytik. Weiterhin werden auch Weiterbildungen in diesen Bereichen angeboten.
- Oliver Zech
CEO bei HEIQ RAS AG
 - www.ras-ag.com
 - Bereich / Branche: Nanotechnologie
 - Die HEIQ RAS AG unterstützt und übernimmt Forschungs- und Entwicklungsprozesse. Weiterhin stellt HEIQ RAS Dispersionen von Silbrenanodrähten zur Herstellung von

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

leitenden Beschichtungen, antimikrobielle Formulierungen und Additive zum Schutz von Oberflächen und antimikrobielle Additive für Kunststoffe her.

- Dr Ralph Sperling
Fraunhofer Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme IMM
 - <http://www.imm.fraunhofer.de/>
 - Bereich / Branche: Nanotechnologie
 - Das Fraunhofer IMM ist ein F&E-Dienstleister, der sich größtenteils mit den Themen saubere Energie, Nachhaltigkeit und Gesundheit in den Bereichen Energie, Chemie und Diagnostik beschäftigt.
- Alexander Teufl
Von Roll Deutschland GmbH
 - <https://www.vonroll.com/de/>
 - Bereich / Branche: Leistungselektronik
 - Von Roll ist Hersteller von Isoliersystemen und Harzen für elektrische Anwendungen, Verbundwerkstoffen für industrielle Anwendungen, Isolierungen in der Elektromobilität und Harzen für die Luftfahrt.
- Dr.-Ing. Jörn Großmann
Semikron Danfoss
 - <https://www.semikron-danfoss.com/de.html>
 - Bereich / Branche: Leistungselektronik
 - Semikron Danfoss ist ein Hersteller von Halbleiterbauteilen, -leistungsmodulen, -stacks und -systemen, die in den Bereichen Automobil, Industrie und erneuerbare Energien Anwendung finden.
- Oliver Roser
Zentrum für Wärmemanagement (ZFW)
 - <https://www.zfw-stuttgart.com/>
 - Bereich / Branche: Leistungselektronik
 - Das ZFW ist ein Dienstleistungsunternehmen, dessen Hauptaugenmerk auf der Bereitstellung von Wissen im Bereich des Wärmemanagement liegt. Dazu zählen Beraten, Prüfen, Gutachten erstellen sowie Schulungen anbieten.
- Anton Z. Miric
Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG
 - <https://www.heraeus.com/de/group/home/home.html>
 - Bereich / Branche: Nanotechnologie
 - Zur Heraeus Gruppe gehören weltweit viele Unternehmen aus verschiedenen Bereichen, darunter Stahl, Elektronik, Chemie, Automotive und Telekommunikation. In Deutschland wird unter anderem synthetisches Quarzglas, Keramiken sowie Speziallampen zur Verwendung in der Wissenschaft und Medizin hergestellt.
- Dr.-Ing. Lars Rebenklau und Richard Schmidt
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Abteilung Hybride Mikrosysteme

Cross-Cluster-Projekt **nano4LE**

- https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/elektronik_mikrosystem_biomedizintechnik/hybride_mikrosysteme.html
- Bereich / Branche: Leistungselektronik und Nanotechnologie
- Das Fraunhofer IKTS ist ein F&E-Dienstleister, der sich mit der Entwicklung von Hochleistungskeramiken und industriellen Herstellungsverfahren beschäftigt. Weitere Kompetenzen hat das IKTS im Bereich der Werkstoffdiagnose und -prüfung.
- Dr. Battist Rábay
Nano-Join GmbH
 - <https://nano-join.de/>
 - Bereich / Branche: Leistungselektronik und Nanotechnologie
 - Die Nano-Join GmbH ist ein junges Unternehmen, das silber-basierte Verbundmaterialien für elektronische Hochleistungsbauteile in den Bereichen der Optoelektronik, E-Mobilität und erneuerbaren Energien herstellt.
- Sebastian Quednau
NanoWired GmbH
 - <http://nanowired.de/>
 - Bereich / Branche: Leistungselektronik und Nanotechnologie
 - Nanowired ist ein Unternehmen, das darauf spezialisiert ist, metallische oder metallisierte Oberflächen innerhalb kurzer Zeit miteinander zu verbinden.
- Ricardo Decker
Aktive Werkstoffe und Verbundstrukturen an der Technischen Universität Chemnitz
 - <https://www.leichtbau.tu-chemnitz.de/research-area/awv/>
 - Bereich / Branche: Nanotechnologie
 - Die TU Chemnitz ist ein Forschungs- und Entwicklungspartner für kleine und mittelständige Unternehmen. Arbeitsschwerpunkte liegen u.a. auf Leichtbauorientierter Bauweise- und Integrationskonzepte für Verbundstrukturen mit Glas-, Kohlenstoff-, Kunststoff- und Naturfasern, Verarbeitungstechnologien für faserverstärkte aktive duroplastische Strukturen (Harzinjektion, Harzinfusion, Vakuumassistent und Pressen) sowie Verbindungstechniken für Faserverbundstrukturen und Hybridbauteile und die Entwicklung von Aktor- und Elektronikschnittstellen
- Thomas Hielscher
Hielscher Ultrasonics GmbH
 - <https://www.hielscher.com/de/ultrasonic-homogenizers-for-liquid-processing-3.htm>
 - Bereich / Branche: Nanotechnologie
 - Hielscher Ultrasonics ist ein Hersteller von Ultraschallgeräte für den Einsatz in Forschungslaboren oder industriellen Anwendungen.