Leibniz Online 08/2010
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e. V.
ISSN 1863-3285
http://www.leibniz-sozietaet.dejournal/archive/08_10/michalowsky_goernert.pdf

Lothar Michalowsky und Peter Görnert

Werkstoffe für Halbzeuge zur effektiven Absorption und Schirmung von Höchstfrequenzfeldern im Frequenzbereich 50 MHz bis 500 GHz

Vortrag in der Klasse für Naturwissenschaften am 11. Februar 2010

Zusammenfassung

Die technische Entwicklung von Geräten, Anlagen und Systemen in den letzten Jahren hat zu wesentlichen Fortschritten geführt. Basisinnovationen auf dem Gebiet der Mikroelektronik und die Verfügbarkeit der neuen Werkstoffe werden bereits in serienreifen Erzeugnissen weltweit wirksam. Die Weiterentwicklung der Mikrowellenkommunikation, wie der Ausbau und die Verbreitung von Nachtsichtgeräten, von sicherheitsrelevanten Prüftechniken wie die Nacktscanner sowie neue Informationssysteme, Navigationssysteme, dopplereffektbasierte Radartechnik, Millimeter- und Submillimeterwellentechnik und der Spinelektronik erfordern neue Materialien für den Strahlenschutz für Anwendungsfrequenzen von 0,05 bis 500 GHz. Angesichts der zunehmenden Belastung der Umwelt durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung sind Werkstoffe und Verfahren gefordert, die den Schutzbedürfnissen von Menschen, Tieren und Pflanzen bezüglich möglicher Gesundheitsschädigungen Rechnung tragen. Die breitbandige Abschirmung im MHz- und GHz-Bereich ist außerdem erforderlich, um empfindliche elektronische Hochfrequenzsysteme störungsfrei betreiben zu können. Der Innovationsprozess gewinnt durch die schnelle industrielle Umsetzung der Fertigung für III-V und II-VI Verbindungshalbleiter mit Arbeitsfrequenzen von 72 bis 76 GHz und Ge-Si Mischhalbleitern bis zu 500 GHz an Tempo.

Das physikalische Prinzip der Abschirmung beruht auf der Reflexion und der Absorption elektromagnetischer Wellen. Besonders wichtig ist hierbei die Absorption (Verluste), da diese zur Reduktion schädlicher Streustrahlung und elektro-magnetischer Interferenzen führt.

Es wurde ein breites Spektrum von Folien mit unterschiedlicher Absorption entwickelt, welche – je nach Frequenz durch die komplexe Leitfähigkeit, Permeabilität und Permittivität bestimmt wird. Etwa 1 mm dicke Folien moderater Leitfähigkeit gefüllt mit Ferrit, Carbon-Nanotubes und/oder amorphen Flakes absorbieren mehr als 30 % der einfallenden Leistung bei Frequenzen größer 40 MHz. Innovent ist in der Lage Absorber-Folien zu entwickeln, die optimal für vorgegebene Anwendungen sind.

Motivation und zur Mikrowellenabsorption - Technische applikationsorientierte Werkstoffentwicklung

Die technische Entwicklung von Geräten, Anlagen und Systemen in den letzten Jahren hat insbesondere in den Branchen:

- Automotiv-Elektronik
- drahtlose lokale und globale terrestrische Kommunikation
- elektrische Antriebstechnik
- Gebäudeautomation und Sensorik
- Industrieautomatisierung und neue regenerative Energien

zu wesentlichen Fortschritten geführt. Grundlage dieser anhaltenden Innovationswelle waren insbesondere :

Neue Konzepte der Mikroelektronik hinsichtlich der Funktionsintegration unter Verwendung funktionalisierter Kohlenstoff- Nanotubes
Reduzierung der Linearabmessungen von Speicherzellen in den 10 nm-Bereich
neue Bauelemente auf Basis der Spinelektronik mit Zellstrukturlängen <10nm und darunter
Konzept zur Nutzung von Spinströmen im molekularen bzw. im atomaren Bereich
Datenübertragungsraten von Tera-Bit/s
Neue Werkstoffe für die Herstellung passiver Bauelemente
Systematische Erhöhungen der Arbeitsfrequenzen von Halbleitern und von Mikroprozessoren unter Verwendung von Germanium-Silizium-Halbleitern
Neue Werkstoffe für die Herstellung passiver Bauelemente
Beherrschung der Technologien für nanostrukturierte Werkstoffe
Wireless LAN-Konzepte mit Arbeitsfrequenzen von mehr als 5 GHz
Verfügbarkeit von MEMS- Baugruppen und Mikrosystemen
Power MOSFET- Transistoren und IGBT mit Schaltspannungen bis 3000 V und Schaltströmen bis 3000 A
Navigationssysteme und verkehrsvorauseilende Informationen in bodengebundenen Verkehrsleitsystemen unter Einschluss der Mikrowellen- und Radartechnik.

Die Basisinnovationen auf dem Gebiet der Mikroelektronik, die Verfügbarkeit der neuen Werkstoffe werden bereits in serienreifen Erzeugnissen weltweit wirksam. Beispiele sind:

Laptops mit Prozessorfrequenzen von 3-4 GHz
Digitalkameras, Camcorder, Videorecorder
Wireless- Knoten mit Arbeitsfrequenzen von 5 GHz
Bluetooth- Module mit Arbeitsfrequenzen von 2,45 GHz
Satellitenkommunikation, Navigations- und Logistiksysteme mit Frequenzen von 14-18 GHz
Printboards für hohe Arbeitsfrequenzen bis 75 GHz
Integrierte und internetfähige Handyfunktionen für Ton, Bild und Film
Steuerungen für Kinderspielzeuge
Mikrowellenbaugruppen und Komponenten für die Radartechnik für Frequenzen von 2,5 GHz, 12-13 GHz, 28 GHz und nunmehr 60 GHz
Elektronische Transpondersysteme für die Identifikation, Traceabilität und Kommunikation im terrestrischen und galaktischen Dimensionen sowie militärische und sicherheitsrelevante Applikationen.

WirelessHD wird in den nächsten Jahren zweifellos zu einem ebenso gängigen Begriff werden wie Bluetooth oder Blueray und als 60-GHz-Funkstandard nahezu weltweite Akzeptanz erlangen. Nachdem Europa das 60-GHz-Band dieses Jahr für die unlizenzierte kommerzielle Nutzung freigegeben hat, ist für 27 EU-Staaten der Weg frei für die Vermarktung von Produkten, die das durchgehende 9-GHz-Spektrum zwischen 57 GHz und 66 GHz nutzen. Schon jetzt erscheinen auf europäischen Märkten die ersten WirelessHD-kompatiblen Produkte.

Das 60-GHz-Band ist im digitalisierten Haushalt für die drahtlose Videoübertragung mit 4 GBit/s und über eine Distanz von 10 m vorgesehen. In Nordamerika, in der asiatisch-pazifischen Region sowie in Brasilien, Russland, Indien und China ist es bereits für ähnliche Zwecke freigegeben. Unter den mehr als 40 Anbietern, die Mitglieder des WirelessHD-Konsortiums sind, finden sich bekannte Namen wie LG, Panasonic, Sony und Toshiba, seit neuestem aber auch Philips, ST Microelectronics, NXP Semiconductors, Funai und Yamaha. Allerdings steht Wireless HD keineswegs ohne Konkurrenz da.

Andernorts wird der IEEE-Standard 802.11n als großer Gewinner für die nächste Generation videofähiger Drahtlosnetzwerke propagiert. Markt-Erhebungen besagen, dass mehr als

100 Millionen Systeme mit HD- und videofähigen drahtlosen Schnittstellen ausgestattet sind. Diese Zahl werde bis 2013 auf nahezu 800 Millionen steigen, so heißt es, und der Großteil davon werde auf 802.11n-Technik basieren.

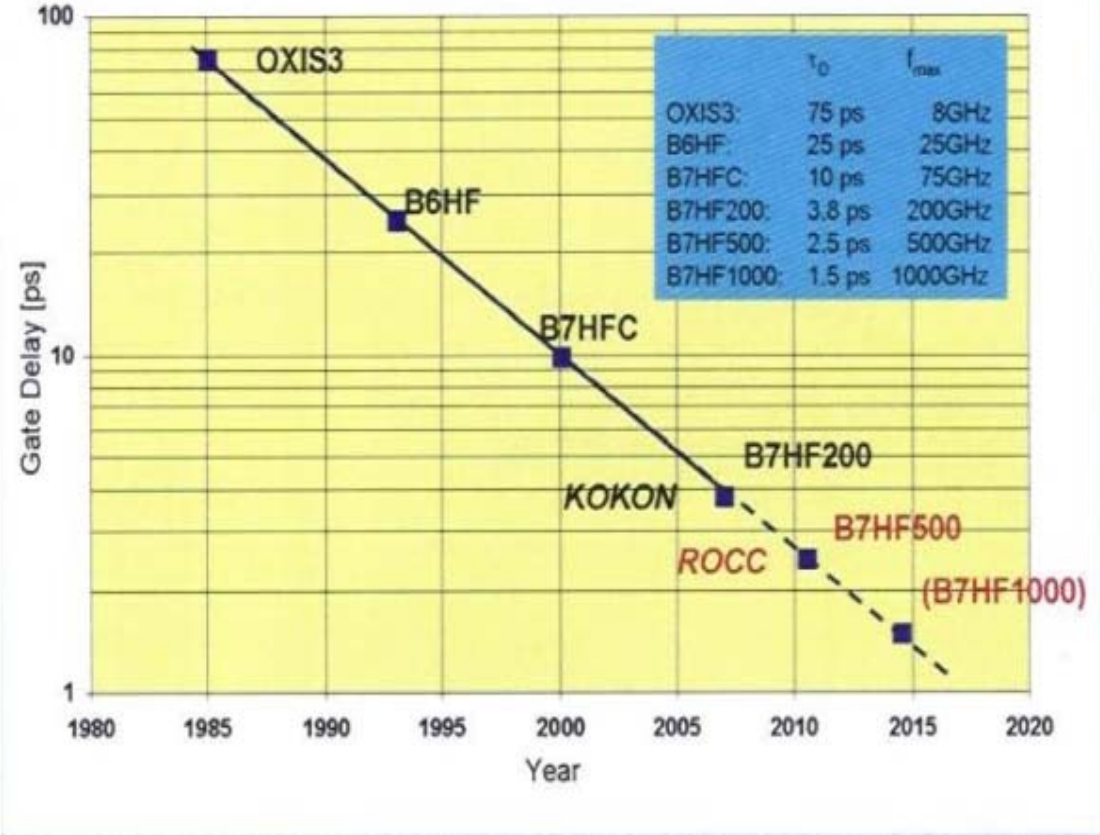

Bild 1: Technologie-Roadmap für schnelle Siliziumprozesse – nach 200 GHz (heute) steht als nächstes die 500-GHz-Grenze im Jahr 2012 an.

© automotive

Die Weiterentwicklung der Mikrowellenkommunikation, wie der Ausbau und die Verbreitung von Nachtsichtgeräten, der verkehrsvorauseilenden, sicherheitsrelevanten Prüftechniken wie die Nacktscanner sowie neue Informationssysteme, Navigationssysteme, dopplereffektbasierte Radartechnik, Millimeter- und Submillimeterwellentechnik und die Spinelektronik erfordern neue Materialien für den Strahlenschutz für Anwendungsfrequenzen von 0,05 bis 500 GHz. Der Innovationsprozess gewinnt durch die schnelle industrielle Umsetzung der Fertigung für III-V und II-VI Verbindungshalbleiter mit Arbeitsfrequenzen von 72 bis 76 GHz und Ge-Si Mischhalbleitern bis zu 500 GHz an Tempo (Bild1).

Dies trifft auch auf den Betrieb von Mikrowellenkomponenten für hohe Leistungen zu. Vergleichend rasante Entwicklungen laufen auf dem Gebiet der elektronischen Speichertechnik ab, wie die nachfolgende Aufstellung zeigt:

1952-1972: Ferritkernspeicher
1966-2010 ff.: Halbleiterspeicher
2010- ?: Terrabitspeicher auf Basis der Spintronik

Entscheidende Voraussetzung für höchste Speicherdichten ist die Verringerung der Linearabmessungen der Speicherzellen im Abmessungsbereich < 100nm nach Bild 2.

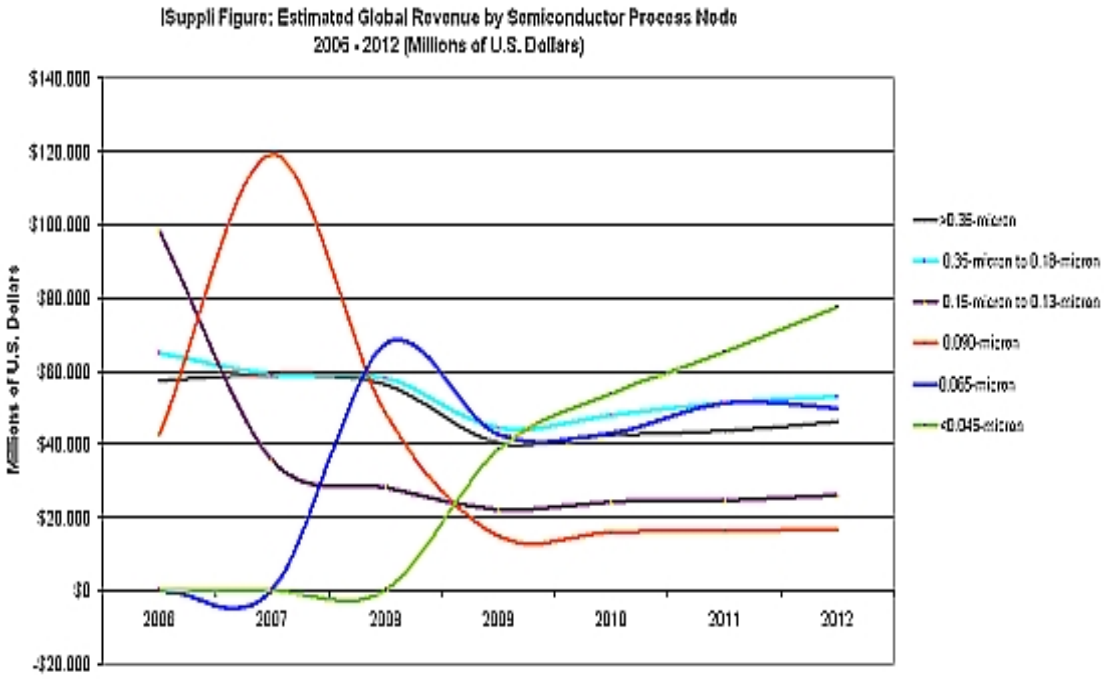

Bild 2: Entwicklung der Strukturbreiten für künftige Halbleiterprozesse mit Abschätzung der Investitionskosten

Das Moor`sche Gesetz scheint für die kommenden Jahre auch weiterhin Potential zur Erhöhung der Speicherdichte (Bild 2) zu besitzen.

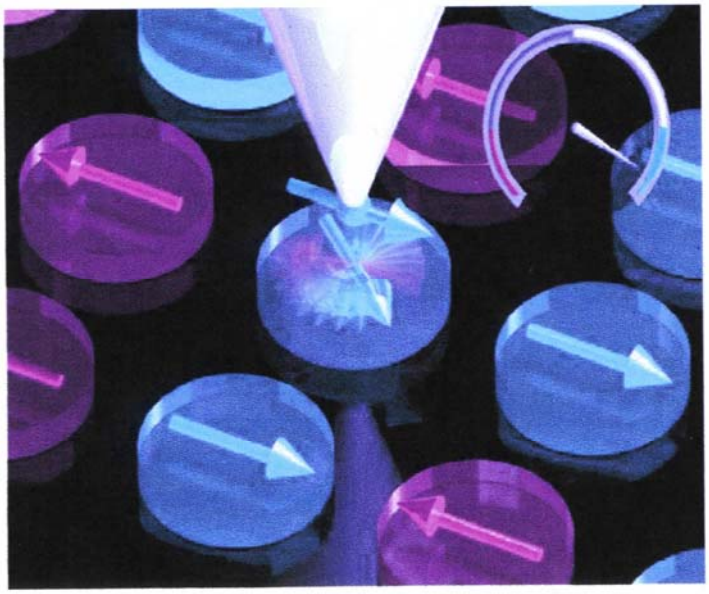

Bild 3: Nano- Inselbereiche mit planarer Magnetisierung (Einbereichsteilchen), Rastertunnelmikroskopspitze zur Erzeugung der Spinorientierungen „1“ und „0“ in atomaren Größenordnungen

Wissenschaftler der Universität Hamburg haben ein neues Verfahren zur magnetischen Speicherung von Informationen vorgestellt, das gänzlich auf magnetische Felder verzichtet und damit extrem hohe Speicherdichten ermöglicht. Es wurde der Nachweis erbracht, dass die Magnetisierung von Nanoinseln durch die Anwendung von Spinströmen gezielt und berührungsfrei geschaltet werden kann. Die Umsetzung des neuen Prinzips könnte bei der Anwendung in Festplatten gegenüber aktuellen Systemen zu einer zehntausendfach höheren Speicherkapazität in Verbindung mit einer drastischen Reduzierung des Volumens einer Speicherzelle im Nanometerbereich führen.

Damit eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten zur Beherrschung großer Datenflüsse. Die Integration der Speicherung großer Photoalben, Videos und Musiksendungen werden zukünftig auf Handys und Medienplayern zur Realität. Genutzt werden Erkenntnisse aus der Entwicklung der spinpolarisierten Rastertunnelelektronenmikroskopie mit einem Auflösungsvermögen für die magnetischen Eigenschaften im atomaren Bereich (siehe Bild 3). Die Einstellung der digitalen Informationszustände „0“ und “1“ erfolgt durch Steuerung (Erhöhung) des Sondenstromes (strominduziertes Schalten der Magnetisierung, Quelle: Kompetenzzentrum Nanotechnik, Universität Hamburg, Prof. Wiesendanger).

Angesichts der zunehmenden Belastung der Umwelt durch hochfrequente elektromagnetische Strahlungen sind Werkstoffe und Verfahren gefordert, die den Schutzbedürfnissen von Menschen, Tieren und Pflanzen bezüglich möglicher Gesundheitsschädigungen Rechnung tragen. Die breitbandige Abschirmung im MHz- und GHz-Bereich ist außerdem erforderlich, um empfindliche elektronische Hochfrequenzsysteme störungsfrei betreiben zu können.

Das physikalische Prinzip der Abschirmung beruht auf der Reflexion und der Absorption von elektromagnetischen Wellen. In den Geräten der Elektrotechnik und der Elektronik entstehen auf Grund dynamischer Schaltvorgänge, mit sich ständig vergrößernden Taktfrequenzen, leitungsgebundene Funkstörspannungen und strahlungsgebundene Funkstörfeldstärken. Man spricht von Elektromagnetic Interferences (EMI), das ist eine Funktionsminderung einer Einrichtung durch elektromagnetische Störgrößen. Zur Durchsetzung von in entsprechenden Normen vorgegebenen Grenzwerten ist seit dem 01.01.1996 das "Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG)", das im Sommer 1998 novelliert wurde, für alle Gerätehersteller bzw. -vertreiber verbindlich und wurde im Jahre 2005 erneut aktualisiert. Dieses Gesetz ist in allen Staaten des Europäischen Wirtschaftsraumes inhaltsgleich gültig und trat 2009 in Kraft. Das EMVG gilt für Geräte, die elektromagnetische Störungen verursachen können oder die gestört werden können (§ 1 Abs.1 EMVG). Laut § 2 Abs. 4. EMVG sind „Geräte alle elektrischen und elektronischen Apparate, Anlagen und Systeme, die elektrische oder elektronische Bauteile enthalten.“ Bild 4 beinhaltet die genormten ISM (Industrial-Scientifical-Medical) Frequenzbereiche für die industrielle Nutzung mit Genehmigung der behördlich erlassenen Funkzulassungsvorschriften.

Die zunehmende Packungsdichte mikroelektronischer Integrationskonzepte und die ständige Erhöhung der Operationsfrequenzen erfordern wirksame Maßnahmen zur Sicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in folgenden Bereichen:

- Kabelindustrie / Schirmung von Kabeln, Streufeldunterdrückung
  - Potentielle Partner: Kabelindustrie, Produkte:
    - USB- Kabel
    - Kabelbäume Automotiv
    - Spezialkabel für die Hochfrequenztechnik
    - Kabelbäume für die Flugzeugindustrie
- Gehäuse- und Geräteindustrie / Abschirmung hochfrequenter elektromagnetischer Felder
  - Potentielle Partner:
    - Gehäusehersteller
    - MEMS- Produzenten

Mikrosystem- Produzenten
Gehäuse- Produzenten für elektronische Spielzeuge
GPS- System- Produzenten
Wireless Communication- Schnittstellen- Produzenten
Laptop- Produzenten
Mikrocontroller- Produzenten
Digitalkamera- Produzenten
Camcorder- Produzenten.

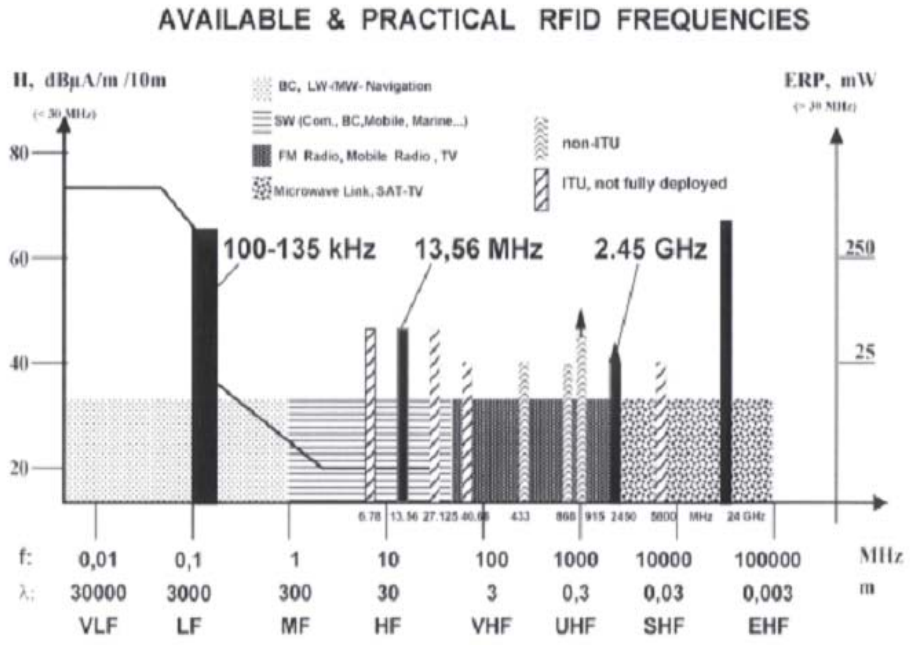

Bild 4: Technisch genutzte Frequenzbereiche mit der starken Tendenz zur Erschließung der elektromagnetischen Frequenzen für die Kommunikationstechnik bis in den optischen Wellenlängenbereich

EMV- Schirmungen und Absorption für die elektronische und elektrische Geräteindustrie:

Mikrowellenofenabschirmungen / industrieller Bereich
- Nahrungsgütertrocknung
- Trocknungstechnologien
- Hybridsintertechnologien
- Industrieöfen

Mikrowellenerwärmungsgeräte im Homebereich
Schirmung der Prozessorstrahlung von Laptops
Schirmung von Bluetooth Schnittstellen
Schirmung von Wireless LAN-Schnittstellen bis 60 GHz
Schirmung von Handyabstrahlungen
Schirmung von Digitalkameras und Camcordern
Schirmung GPS- Systeme
Schirmung von Printboards gegen vagabundierende Hochfrequenzfelder
Radartechnische Lösungen (Abstandsradar, Radar-Doppler-Effekt-Anwendungen)
Leistungsfähige Nachtsichtgeräte, Scanner

Satellitenkommunikationstechnik im Frequenzbereich von 12 bis 16 GHz
Magnetrons für Arbeitsfrequenzen von 5, 12 und 28 GHz
Medizintechnik / Tomographie

Zu beachtende Standards zum elektrischen und elektronischen Geräteschutz sind: CISPR 22 (CISPR/I/65/CDV und CISPR/I/66/CDV, TC/SC Title: EMC of information technology, multimedia equipment and receivers), die Grenzwerte von 54 dBµV/m (average) und 74 dBµV/m (peak) für den Frequenzbereich 1 GHz bis 6 GHz bzw. 18 GHz.

Die Absorberentwicklung ist auf eine wirksame breitbandige Schirmung bzw. Absorption ausgerichtet, um den Anforderungen zu einem wirksamen Strahlenschutz entsprechen zu können.

Die Absorption hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung im Frequenzbereich von 30 MHz bis 20 GHz wird durch folgende Werkstoffeigenschaften (Wechselwirkungen) unterstützt:

hohe komplexe Permeabilität
moderate komplexe elektrische Leitfähigkeit
hohe komplexe Dielektrizitätskonstante
großes Aspektverhältnis der absorbierenden Werkstoffpartner (Filler)

Die Maxwellschen Gleichungen ermöglichen die Modellierung der Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsprozesse. Wichtige Beziehungen werden nachstehend beschrieben.

In Auswertung der Fach- und Patentliteratur sind eine Vielzahl physikalischer Wechselwirkungen für die effektive Hochfrequenzschirmung heranzuziehen. Zwischen Absorption, Schirmdämpfung und Extinktion bestehen relevante Beziehungen, deren Verständnis im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen weiter vertieft werden konnte.

Nach einer Analyse müssen für die Entwicklung effektiv schirmender Schichten zu „**Funktionalen Kompositpulvern**" folgende Einflussgrößen untersucht werden:

- Optimierung der stofflichen und morphologischen Eigenschaften der in den Kompositen für die Abschirmung verantwortlichen Stoffe (Matrix, Filler)
- Ferrite mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung, leitfähige Keramiken und Kohlenstoffpulver, Keramiken mit Ladungspolarisation sowie Metallpulver
- Modifizierung granulometrischer, morphologischer und von Grenzflächen-Eigenschaften sowie Untersuchung des Einflusses auf die Abschirmwirkung im Kompositwerkstoff
- Zerkleinern, Klassieren, Oberflächenmodifizierung
- Herstellung von Versuchsmustern, die der Verlustmessung im GHz-Bereich zugänglich sind.

Folgende physikalische Grundlagen und Bewertungsgrößen sind für die Erreichung einer hohen Schirmdämpfung von besonderer Bedeutung:
Die Maxwellschen Gleichungen, insbesondere die Materialgleichungen

$$\frac{\partial}{\partial r} xE = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial r} xH = \frac{\partial D}{\partial t} + j$$

$$\frac{\partial}{\partial r} D = \rho \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial r} B = 0 \qquad \text{(differentielle Form).}$$

Mit den Materialgleichungen ergibt sich ergänzend:

$$j = \sigma \cdot E\,, \qquad D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E\,, \qquad B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H$$

mit E elektrische Feldstärke — H magnetische Feldstärke
D dielektrische Verschiebung — j Stromdichte
ρ Ladungsdichte — σ elektrische Leitfähigkeit
ε_0 Dielektrizitätskonstante des Vakuums — μ_0 Vakuumpermeabilität
ε relative Dielektrizitätskonstante — μ relative Permeabilität

Die Maxwellschen Gleichungen und insbesondere die Materialgleichungen ermöglichen die Berechnung der optischen Größen wie Brechungsindex n, Dämpfung oder Absorption a bzw. Extinktion χ

- Die Frequenzabhängigkeit von Permeabilität, Permittivität und elektrischer Leitfähigkeit
- Optische Eigenschaften von Festkörpern

Mit den Maxwellschen Gleichungen lassen sich die Wellengleichung für das elektrische Feld wie folgt ableiten

$$\frac{\partial^2 E}{\partial^2 r} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \mu_0 \cdot \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma \frac{\partial E}{\partial t}$$

Als Lösungen ergeben sich fortlaufende Wellen mit dem Wellenzahlvektor k und der Kreisfrequenz ω :

$$E = \hat{E} \exp\left[i(k \cdot r - \omega \cdot t)\right]$$

Mit den bekannten Beziehungen zwischen Lichtgeschwindigkeit c und Phasengeschwindigkeit v des Lichtes ergibt sich:

$$c^2 = v^2 \cdot \varepsilon \cdot \mu \quad \text{und} \quad n^2 = \varepsilon \cdot \mu$$

Es lassen sich die Dispersionsrelation zwischen k und ω sowie der komplexe Brechungsindex n' wie folgt berechnen:

$$k = \frac{\omega}{c}\left(\varepsilon + i\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0}\right)^{1/2} \quad \text{und} \quad n' = \frac{k}{k_0} = \left(\varepsilon + i\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0}\right)^{1/2}.$$

In analoger Weise berechnet sich die Absorption in magnetischen Festkörpern.(siehe dazu auch C. Weißmantel und C. Hamann „Grundlagen der Physik, VEB Verlag der Wissenschaften Berlin 1979, S 685-3 ff).

Interessant ist eine Betrachtung des Zusammenhangs zwischen der Schirmdämpfung und der Extinktion zu den Fillermaterialien wie folgt:

Definition der Schirmdämpfung in Dezibel (dB):

$a = 10 * \lg(P_{MW0}/ P_{MW1})$

a = Schirmdämpfung einer Schicht

P_{MW0} = eingestrahlte Mikrowellenleistung

P_{MW1} = hinter einer Absorptionsschicht wirksame Mikrowellenleistung

Extinktionsgesetz :

$E = \ln(P_{MW0}/ P_{MW1}) = a_{abs}*c_{abs}*l = a_{abs} * m_{abs}/A$

E	Extinktion
a_{abs}	Extinktionskoeffizient
c_{abs}	Konzentration
I	Schichtdicke
m_{abs}/A	Masse pro Flächeneinheit A

Zusammenhang Extinktion und Schirmdämpfung:

$a_{abs} = (10/\ln 10)*E = 8{,}686*E$

Zusammenhang zwischen Schirmdämpfung, Extinktion und Absorptionsintensitäten

Die experimentellen Übereinstimmungen sind überraschend gut, wenn Mehrfachreflexionen auszuschließen sind.

Für den Frequenzanwendungsbereich 30 MHz bis 20 GHz eignen sich Kompositwerkstoffe mit gezielt hoher Absorption in Verbindung mit ausgewählten und optimierten Fillern sehr gut. Folgende Varianten sind für die Werkstoffauswahl unter Beachtung der spezifischen Anwendungsbedingungen möglich:

Fillerkomponenten
- pulverisierte weichmagnetische Ferrite (Mangan-Zink-Ferrite, Nickel-Zink-Ferrite)
- Metallpulver hoher intrinsischer Leitfähigkeit
- Leitruß
- Metallische amorphe oder nanokristalline Flakes
- Nanotubes (CNT)

Matrixwerkstoffe:
- Duro- und Thermoplaste
- Polyethylene (ULDPE)
- niedrig schmelzende anorganisch nichtmetallische Werkstoffe
- niedrig schmelzende metallische Werkstoffe
- Dünnschichten und Multilayer auf isolierenden Trägern.

Wichtige Formgebungsprozesse für die produktnahen Anwendungsausführungen sind Extrusion, Kalandrieren, Formpressen und Injection Moulding.

Anwendungsformen sind:

flexible Folien Platten, Formteile, Gehäusebauteile, Mono- und Multilayer-Substrate, Extrusion von Zylinderbauformen und Schläuchen.

Grundverfahren der Absorberherstellung

Als Herstellungsverfahren für Absorber bzw. Absorberkomposite über Dünn- und Dickfilmkonzepte sind folgende ohne Anspruch auf Vollständigkeit prädestiniert:

- Elektronstrahlverdampfung (dünne metallische Schichten)
- Hochvakuumbedampfung (dünne metallische Schichten)
- CVD- und MOCVD- Verfahren
- Sputterverfahren (dünne metallische und anorganisch- nichtmetallische Schichten)
- Plasmaspritzverfahren (dicke metallische und anorganisch- nichtmetallische Schichten)
- Sol-Gel-Verfahren (dicke metallische und anorganisch- nichtmetallische Schichten)
- Glaskristallisation
- Multilayertechnik (metallische und anorganisch- nichtmetallische Pasten)
- Foliengießtechnik (anorganisch- nichtmetallische Träger, gedruckte Metall- und Funktionskeramik für Verdrahtungen bzw. Funktionsschichten)
- Kalandrieren (Polymere mit definierten anorganisch- nichtmetallischen oder metallischen Fillern)
- Pulvermetallurgische Formgebungsverfahren mit Sinterprozessen für ausgewählte Metalle und Legierungen (MIM) sowie für Keramiken (CIM)
- Dickfilmtechnologien auf isolierendem Träger (druckfähige Pasten)
- Mechanische Zerkleinerungsverfahren mit Auflegierung von Metallen
- Polymerbeschichtung von nanoscaligen Metallpulvern (Paryleneprozess)
- Galvanik für metallische Schichtsysteme auf isolierendem Träger
- Komposite auf Basis Epoxideinbindung
- Niederdruck- und Hochdruckspritzverfahren auf Basis Thermo- und Duroplaste PIM).

Für die Herstellung von Prüfmustern sind in Kenntnis der Prüfmöglichkeiten für den Mikrowellenfrequenzbereich zu bevorzugen:

Polymermischungen mit definierten Fillergehalt und Endmaßen
Pressformgebung, Kalandrierung und Extrusion für schichtförmige Messproben
Streifenleiteranordungen
Massive Proben für Hohlleitermessungen.

Ein hohes verfahrenstechnisches Potential für schirmende Deckschichten besitzen die Polymerkomposite mit ausgewählten metallischen und anorganisch- nichtmetallischen Fillern, die sich durch eine hohe Leitfähigkeit, definierte magnetische und dielektrische Eigenschaften auszeichnen.

Kriterien für die Auswahl keramischer Absorberwerkstoffe

Die keramischen Werkstoffe nehmen in der Absorbertechnik, insbesondere für die Auslegung von Absorberschichten, eine Sonderstellung für Anwendungen unter extremen Bedingungen ein. Während die Korundwerkstoffe (α-Al_2O_3), die Zirkonate, Siliciumkarbide schon seit Jahren in der Mikrowellentechnik als Absorber (Suszeptoren) in Hochtemperaturöfen verbrei-

tet Anwendung finden, besitzen keramische Nitride, Karbide, Boride und hochschmelzende Oxide nunmehr verstärktes Interesse als hochfrequenzselektive Werkstoffe. Neben der chemischen Bindung bildet der definierte Gefügeaufbau dieser Werkstoffe die Grundlage für das Hochfrequenzverhalten, aber auch die mechanischen und thermischen Eigenschaften wie mechanische Festigkeit, Bruchzähigkeit, Kriechbeständigkeit bei hohen Temperaturen und die Thermoschockbeständigkeit. Dazu zählt auch das Vermögen zur Ankopplung und Wechselwirkung der Werkstoffe in Mikrowellenfeldern bis in den Ultrarotbereich. Zur Klärung komplizierter, die Absorption bestimmender Wechselwirkungen im cm- und mm-Wellenbereich, sind Kenntnisse atomarer und molekularer Anregungs- und Relaxationsprozesse erforderlich. Über den gesteuerten Gefügeaufbau und die Wahl der chemischen Zusammensetzung lassen sich zum Teil sehr extreme Eigenschaften in metallischen, keramischen Werkstoffen vereinen, wie:

- hohe Wärmeleitfähigkeit und hohes elektrisches Isolationsvermögen
- hohe mechanische Festigkeit und Bioverträglichkeit
- Abrasionsfestigkeit und Chemikalienbeständigkeit
- Halbleitung, Ferrimagnetismus, Ferroelektrizität und Piezoelektrizität
- Transparenz und wellenlängendispersive Absorption
- kleine Wärmedehnung und hohe Thermoschockbeständigkeit.

Wechselwirkung mit Einfluss auf die Absorption elektromagnetischer Wellen zeigen, in Ferriten:

Mangan-Zink-Ferrite (breitbandig)

10 MHz Blochwandresonanzen, inhomogene Drehungen, Resonanzverluste, dielektrische Verluste
500MHz -3GHz Spinwellenrelaxationen (Magnonen/Phonen-, Wechselwirkungen)
1 GHz und höher: Elektronenresonanzen, Spinrelaxationen

Nickel-Zink-Ferrite (schmalbandig bis 3 GHz)

Blochwandresonanzen, inhomogene Drehungen, Resonanzverluste, dielektrische Verluste
Spinwellenrelaxationen (Magnonen/Phonen-Wechselwirkungen

Hexagonale Ferrite Co-Ti-Ba-Ferrite mit magnetischer Vorzugsachse

Blochwandresonanzen, inhomogene Drehungen, Resonanzverluste, dielektrische Verluste bis 1 GHz
Spinwellenrelaxationen (Magnonen/Phonen- Wechselwirkungen
Elektronenresonanzen, Fe^{2+}/Fe^{3+}-Elektronen- Hoppingprozesse)

Polymerabsorption: nahes und fernes Ultrarot, rote Lichtstrahlung dazu liegen eine Vielzahl von Messdaten vor, die der systematischen Auswertung bedürfen

Nanokristallines La-Hexaborid für nahes Ultrarot

Anorganisch nichtmetallische Filler mit

Polaronen - Anregung
Excitonen – Anregungen
Ionen- und Elektronenrelaxationen
Dipol-, Quadrupolwechselwirkungen, Multipolbildungen, ferroelektrische Ordnungen.

Auch zu diesem Werkstoffbereich liegen umfangreiche experimentelle Untersuchungen vor, die bezüglich der Hochfrequenzabsorption ergänzend zu bewerten sind.

Aluminiumoxid, Zirconiumdioxid, Ferroelektrika, Piezoelektrika, Halbleiter, Varistorkeramiken, GMR-Materialien u.a. bedürfen der weiteren Sichtung und Selektion.

Für die Anwendung von flexiblen Absorptionsfolien werden in Verbindung mit der Einführung bleifreier Lötverfahren höhere Arbeitstemperaturen bis 280°C zu beachten sein, die die Polymerauswahl für Kompositwerkstoffe einschränken.

Eine Klassifizierung der Filler wird in der Literatur wie folgt vorgenommen:

Typ I : Ni-Zn- Ferrite K10, K14, K40 und K1500/K2000

Typ II : Mikrowellenferrite

Typ III : $CoFe_2O_4$, $BaFe_{12}O_{19}$, $SrFe_{12}O_{19}$, aus der Fachliteratur geht hervor, das im System $Ba(Co,Ti)_xFe_{12-x}O_{19}$ für $1,1<x<1,5$ hohe breitbandige Absorptionen erreichbar sind (D. Autissier, D. Rousselle, A. Podemski, CEA-DAM, BP12, 91680 Brueres-le-Chatel, France)

Typ IV : Mangan-Zink-Ferrite (Leistungsferrite K2006), Magnetit, Karbonyleisen

Typ V : amorphe oder nanokristalline Fe-Basislegierungen (magnetische Abschirmfolien auf Basis weichmagnetischer und hartmagnetischer Filler durch die Vacuumschmelze Hanau)

Typ VI : Siliciumkarbid, Bornitrid (ESK Kempten, H.C. Stark Goslar als Lieferanten, Materialien : SiSiC, SiC, BN jeweils gemahlen)

Typ VII: Perovskite (Dielektrika, Ferroelektrika), Isolierkeramiken.

Zu ergänzen sind:

Ionenhalbleiter:

$MgO-ZrO_2$, $CaO-ZrO_2$, $Y_2O_3-ZrO_2$, ThO_2, β- Al_2O_3, Inselsilikate

Halbleiter:

Fe_2O_3- TiO_2, CoO, NiO-CuO- Fe_2O_3, ZnO-CoO-Bi_2O_3, SiC

V_2O_3, SnO_2, $REMnO_3$, RE: La, Pr, Nd, Ga, …
$Cr_{2-x}Re_xO_3$, RE: La, Pr, Nd, Ga,

deren Potenzial für die Höchstfrequenzabsorption weitgehend unerforscht ist**.**

Die Anwendungen zu entwickelnder Schirmfolien sind auf eine breitbandige Absorption >20 dB im Frequenzbereich von 0,5 bis 94 GHz (eingeschränkt 0,5 bis 18 GHz) gerichtet. Motiviert sind diese Arbeiten durch notwendige Maßnahmen zur Sicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit und der wirksamen Entstörung von elektrischen und elektronischen sowie optischen Geräte- und Anlagensystemen im Zusammenhang mit dem weiteren Ausbau der Mikrowellentechnik (Wärmeerzeugung, Richtfunktechnik, Bluetooth-Schaltungen, wireless communication technischer Systeme, Transpondertechnologien und RFID- (siehe K. Finkenzeller, RFID-Handbuch, Carl Hanser Verlag München Wien, 2. aktualisierte Auflage 2000) Lösungen in allen Bereichen der Wirtschaft.

Bild 4 beinhaltet den in Betracht zu ziehenden Frequenzbereich und die bekannten Frequenzen, die in Standards für industrielle Anwendungen reserviert sind. Aus physikalischer Sicht lässt sich an dieser Stelle bereits die Feststellung treffen, dass die Breitbandigkeit von 10 MHz bis 100 GHz nur mit Kompositen mit unterschiedlichen metallischen, magnetischen, dielektrischen, ferroelektrischen, piezoelektrischen und halbleitenden Fillern erreichbar sein wird. Insbesondere die Absorptionsprozesse unterhalb einer Wellenlänge von 1mm erfordern nanoscalige Absorpentien.

Ferromagnetische Resonanz

1946 entdeckte Griffith das Phänomen der ferromagnetischen Resonanz, indem er die. Frequenzabhängigkeit der komplexen Permeabilität bis in den Frequenzbereich zu einigen GHz untersuchte. Die spektrale Abhängigkeit der komplexen Permeabilität der Werkstoffe erzeugt dabei typische Dispersionsgebiete, die mit Relaxationsverlusten verbunden sind (vgl. Bild 5). Das niederfrequente Relaxationsgebiet ist auf Blochwandverschiebungen und die partielle Vernichtung von magnetischen Bereichen und Blochwänden beim Magnetisierungsprozess, auf Nachwirkungseffekte bzw. instabile induzierte Anisotropien, thermische bzw. magnetische Fluktuationen zurückzuführen. Das mittelfrequente Relaxationsgebiet ist Blochwandresonanzen zuordenbar, verbunden mit einem zweiten Maximum des Imaginärteiles der komplexen Permeabilität. Bei Frequenzerhöhung tritt ein weiteres Dispersionsgebiet auf, welches auf die natürliche ferrimagnetische Resonanz zurückgeführt wird. Diese ist auch für den Fall einheitlicher Magnetisierungen von Festkörpern durch eine senkrecht oder parallel angelegtes Gleichfeld zum Wechselfeld zu beobachten und ist als erzwungene ferrimagnetische Resonanz in die Fachliteratur eingegangen (Senkrecht- und Parallelanregung). Dieser Verlustmechanismus ist auf Spinwellen- bzw. Magnon- Phonon Wechselwirkungen mit Energieabsorption beruhend, verbunden:

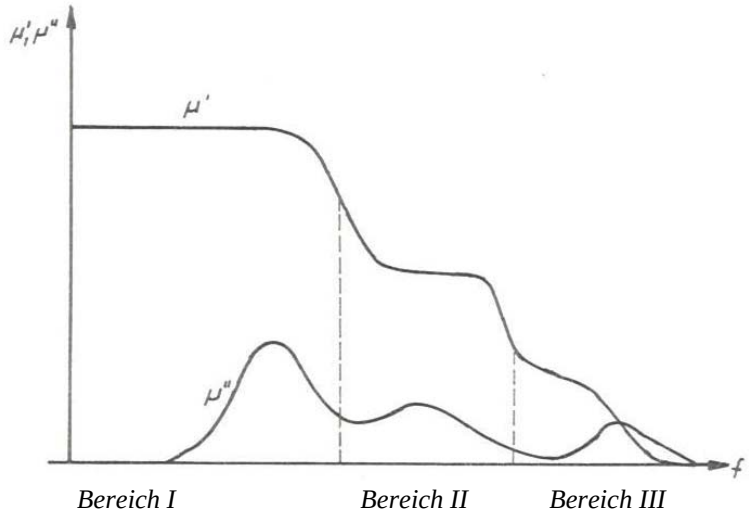

Bild 5: Relaxationsbereiche der komplexen Permeabilität als Funktion der Frequenz

Bereich I	*Bereich II*	*Bereich III*
Relaxationen	*Wandresonanz*	*ferromagnetische Resonanz*
Hysterese		
Wirbelströme		
Nachwirkungen		

Die homogene Rotation

Die homogene Rotation des Magnetisierungsvektors um ein magnetisches Gleichfeld, angeregt durch ein hochfrequentes Wechselfeld wurde erstmals von Landau und Lifschitz in Analogie zur Larmor-Präzession beschrieben. Für die ungedämpfte Präzession wurde die Gleichung

$$\omega = \gamma \cdot H$$

abgeleitet mit

$$\gamma = \frac{e}{2mc} \cdot g \text{ dem gyromagnetischen Verhältnis und}$$

e:	Elektronenladung	m:	Elektronenmasse
c:	Lichtgeschwindigkeit	g:	Landé Faktor.

Die physikalische Situation ist im nachstehenden Bild dargestellt. Die Rotation des Magnetisierungsvektors im Wechselfeld erfolgt ungedämpft.

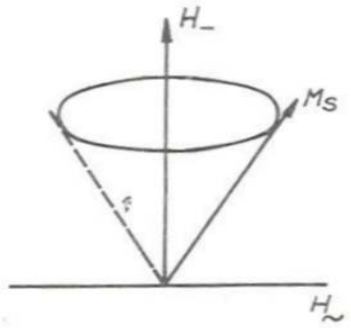

Bild 6: Homogene Rotation der Magnetisierung im Wechselfeld um ein sättigendes magnetisches Gleichfeld

Die inhomogene Präzession

In der Praxis verbinden sich mit der inhomogenen Rotation Verlustmechanismen. (Bild 7).

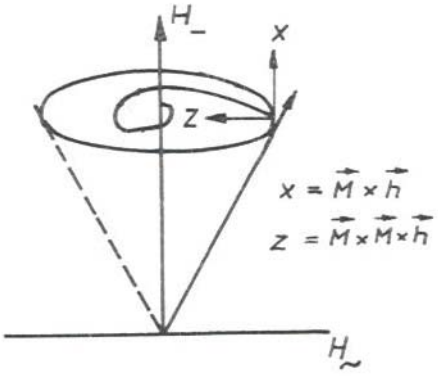

Bild 7: Inhomogene Präzession des Magnetisierungsvektors um ein magnetisches Gleichfeld

Bewegungsgleichungen für den Magnetisierungsvektor sind nach

Landau Lifschitz: $\frac{dM}{dt} = \gamma MxH - \lambda Mx(MxH)$ mit $M =$ Magnetisierungsvektor und H Feldvektor, λ Dämpfungskonstante

Gilbert-Gleichung: $\frac{dM}{dt} = \gamma(1+\alpha^2)\underline{M}x\underline{H} - \frac{\alpha}{M}\underline{M}x\frac{d\underline{M}}{dt}$ mit α Gilbert- Dämpfungskonstante

Für den Fall der Resonanz einer Kugel gilt die Beziehung

$$\omega = \gamma \cdot H$$

Bei Abweichungen der Probengeometrie von der Kugelform sind die Entmagnetisierungsfaktoren zu beachten und es gilt nach Kittel:

$$\omega = \gamma\left[\left(H - \left(N_z - N_x\right)M\right)\cdot\left(H - \left(N_z - N_y\right)M\right)\right]^{1/2}$$

Hier wird schon sichtbar, dass offensichtlich die Probengeometrie der Filler (Fasern, Whisker, Platelets, Flakes, Nanotubes) einen großen Einfluss auf die Absorption und die Lage der Resonanzfrequenz nehmen können. In Proben sehr kleiner Geometrie wird die Richtung des Magnetfeldes durch die Vorzugsachse festgelegt, die wiederum durch die Größe der magnetischen Form- und Kristallanisotropieenergie bestimmt wird.

Das Aufrechterhalten der Präzessionsbewegung erfolgt durch die eingespeiste Hochfrequenzenergie. Die entstehenden Verluste durch das präzedierende Spinsystem wandeln sich in Wärme um.

Spinwellen, Linienbreite der ferromagnetischen Resonanz

Die Magnetisierungsvorgänge und Verlustprozesse lassen sich mit der Spinwellentheorie mathematisch weitestgehend geschlossen beschreiben. Polder (Phil Mag 40, 99-115, 1949) untersucht als erster die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in magnetischen Festkörpern, indem er den Tensorcharakter der Permeabilität des Werkstoffes berücksichtigte und die Maxwellsche Gleichung in der Differentialform

$$\Delta H = -grad \cdot divH - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\cdot\frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

löste.

Die Dispersionsbeziehung für den Wellenvektor k_w ergibt dann bei Zugrundelegung des Permeabilitätstensors

$$\mu_{ik} = \begin{pmatrix} \mu - ik \cdot\cdot 0 \\ ik - \mu \cdot\cdot 0 \\ 0 \cdots 0 \cdot\cdot 1 \end{pmatrix}$$

$$k_w{}^2 = \frac{\omega^2\varepsilon}{c^2}\left(\mu \pm k\right)$$

Dieser Lösung entsprechen zirkular polarisierte Wellen, deren Drehsinn der natürlichen Präzession des Magnetisierungsvektors einmal gleich und zum anderen entgegengesetzt ist.

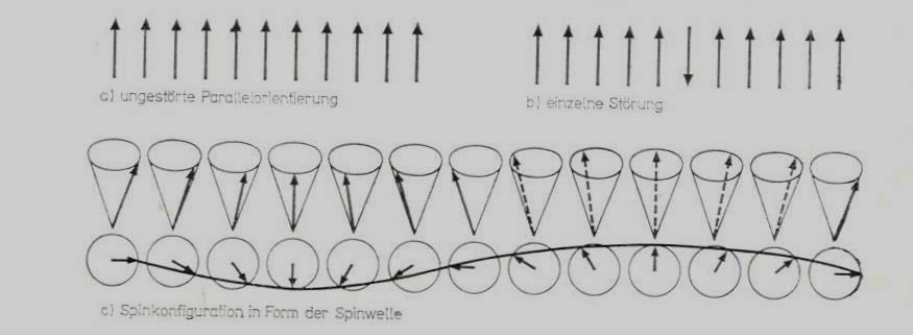

Bild 8: Spinwellenkonfiguration

Die exakte Analyse des Wellenvektors zeigt, dass in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz zwei Wellengrundtypen auftreten:

- elektromagnetische Wellen bei vernachlässigbarer Austauschenergie
- Spinwellen (siehe Bild 8) bei Beachtung der Austauschenergie und magnetischen Energie.

Für den Fall der Resonanz können Spinwellen oder die Quasiteilchen, die Magnonen, mit dem Gitter in Wechselwirkung treten und somit das Phononenspektrum beeinflussen. Mit der Quantisierung

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \hbar\omega$$

folgt nach Bloemberger und Suhl, Proc. I: R. E. 44, 1259-1269 und 1270-1284, 1956:

$$\Delta H = \alpha \cdot H ,$$

wobei α die Dämpfungskonstante der modifizierten Landau-Lifshitz Gleichung darstellt. Für die Energieabgabe des magnetisch angeregten Spinwellensystems an das Gitter kommen dabei folgende Prozesse zum tragen:

2 Magnonen- Phononen- Wechselwirkungen
3 Magnonen- Phononen- Wechselwirkungen
2 Magnonen-Magnonen- Wechselwirkungen
Magnonen- Leitfähigkeitselektronenstreuung.

Das nachstehende Schema nach Bild 9 unten zeigt die möglichen Wege der Energieabgabe der Spinwellen an das mechanische Gitter.

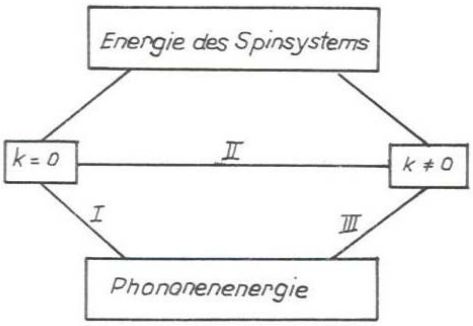

Bild 9: Mögliche Wege der Energiedissipation

Weg I homogene Mode: alle Spins in Phase
- Phononenanregung
- Phononenstreuung
- Leitfähigkeitselektronenstreuung

Weg II
- Auflösung der homogenen Mode
- Anregung von Spinwellen

Weg III
- Magnonenvernichtung
- Anregung von Phononen.

In der Fachliteratur ist eine Vielzahl von Substanzen untersucht worden im Hinblick auf geringe Verluste im Mikrowellenfrequenzbereich. Als Maß für die Verluste wird die Halbwertsbreite ΔH der ferromagnetischen Resonanz herangezogen. Dem Kriterium geringer Verluste nicht standhaltende Substanzen sind dementsprechend potenziell geeignete Absorberwerkstoffe. Siehe dazu auch die zusammenfassenden Werke:

"YIG Resonators and Filters", J. Helszajn, John Wiley and Sons, 1985
"Microwave Circulator Design" D.K. Linkhardt, Artech House 1989

FutureCarbon hat sich in Deutschland als Entwickler und Produzent von Kohlenstoff- Nano-Tubes auf der Basis einer CVD-Technologie mit optimierten Katalysatoren spezialisiert. Das Programm beinhaltet:

nanofibres (CNF) structures
herringbone (HBCNF) structures
screw (SCCNF) structures
platelet (PLCNF) structures
multiwall carbon nanotubes (MWCNT)

Die CNT-nanotubes sind funktionalisiert (=O-, -OH-, -OOH- Gruppen) oder beschichtet (Coating mit Metals wie Fe, Co, Ni, Cu, Pd, P u.a.) für Sensoranwendungen.
Carbonnanotubes stellen auch sensitive Absorber für elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von 1-100 GHz dar, wie erste experimentelle Untersuchungen zeigen.

Messtechnik

Zur Messung der elektromagnetischen Kennwerte der Verbundwerkstoffe wird folgende Messtechnik verwendet:

Bild 10: HILO-Test 2000 Koaxialmesssystem: Frequenzbereich 0.04 - 1GHz

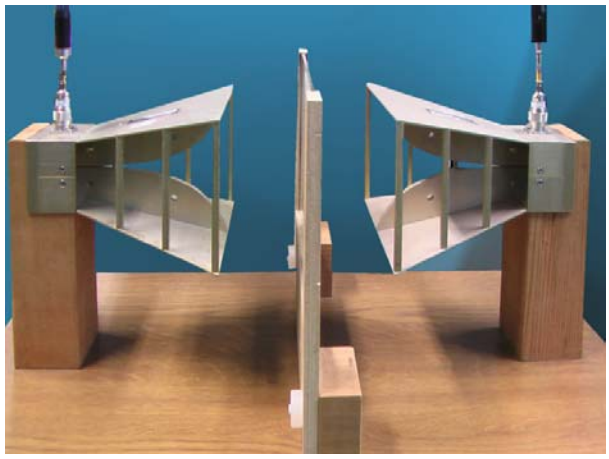

Bild 11: Horn Aerial SAS – 200/571: Frequenzbereich 700 KHz – 18 GHz

Bild 12: Linear Taper WR 12: 60 - 90 GHz

Messergebnisse

Tabelle 1 zeigt Ergebnisse technisch wichtiger Parameter wie die absorbierte Leistung (Verlust) in Prozent, die Reflexion in Prozent und die Transmissionsdämpfung a_t in dB bei 1 GHz für ausgewählte Folien mit der Dicke d bei Vernachlässigung der Reflexion an der Grenzfläche 2 (siehe Bild 13).

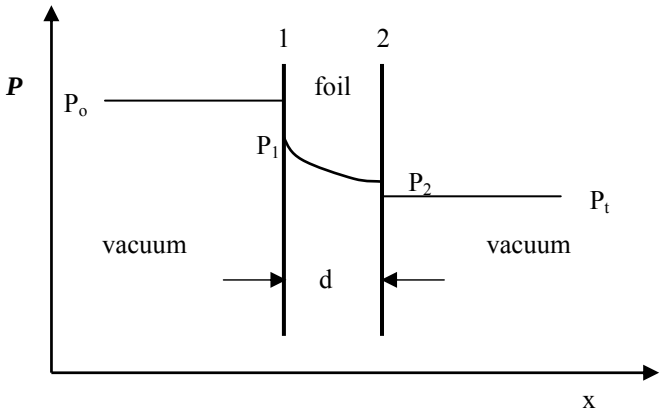

Bild 13: Schema der Änderung der Mikrowellenleistung P beim Durchgang einer elektromagnetischen Welle durch eine Folie. P_0: einfallende Leistung, P_t: durchgehende Leistung, 1: Grenzfläche 1, 2: Grenzfläche 2

Der obere Teil von Tabelle 1 charakterisiert Folien mit großer Transmissionsdämpfung und der untere Teil jene mit großen Verlusten.

Tabelle 1:
Absorbierte Leistung (Verlust) in Prozent, Reflexion in Prozent und Transmissionsdämpfung a_t in dB bei 1 GHz für ausgewählte Folien mit der Dicke d.

Folie	d [mm]	Verlust [%]	Reflexion [%]	a_t [dB]
N29/30	1.47	12.3	87.6	30.1
O31/32	1.47	12.5	87.4	30.5
P33/34	1.47	11.6	88.3	27.9
S39/40	1.49	8.5	91.5	31.5
BI59/60	1.49	8.3	91.0	21.9
QI101/102	1.45	10.3	89.7	33.6
SI105/106	1.50	9.3	90.6	33.8
EMVC6	1.44	9.1	90.5	23.3
II73/74	1.43	34.8	57.4	11.1
EI65/66	1.44	36.0	56.7	11.4
EMVCR F10	0.75	44.3	37.0	7.3
EMVCR F11	0.69	36.0	55.7	10.8
GI69/70	1.42	30.6	63.9	12.6
FI67/68	1.44	29.5	64.8	12.5
KI77/78	1.42	30.9	64.5	13.4
MI91/92	1.46	31.8	62.8	12.7
NI95/96	1.47	30.2	65.3	13.4

Bild 14 illustriert die entsprechende Frequenzabhängigkeit im Bereich von 40 MHz bis 1 GHz dreier Folien mit großer Transmissionsdämpfung und großer Reflexion.

Bild 15 demonstriert die Transmissionsdämpfung und die Reflexion von 700 MHz bis 18 GHz sowie von 40 MHz bis 1.2 GHz. Geringe Reflexion findet man für Folie EMVCRF10.

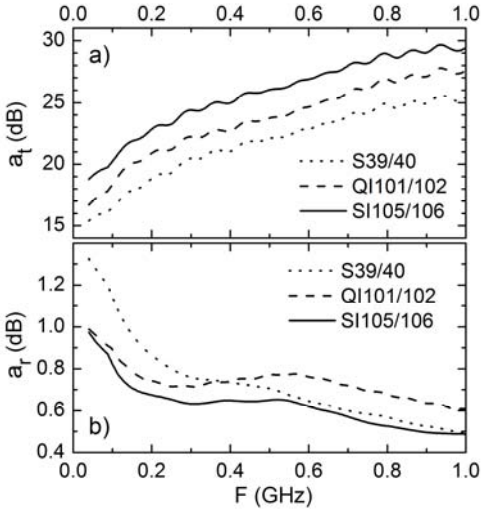

Bild 14: Drei Folien mit a) großer Transmissionsdämpfung a_t und b) geringer Reflexionsdämpfung a_r (großer Reflexion).

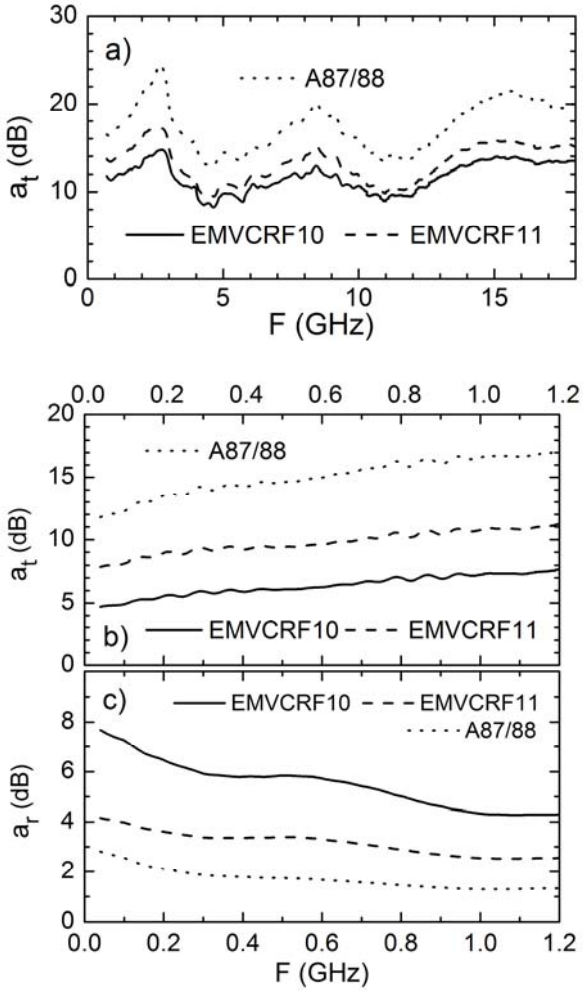

Bild 15: Transmissionsdämpfung a_t von drei Folien bei a) 700 MHz bis 18 GHz, b) 40 MHz bis 1.2 GHz und c) Reflexionsdämpfung a_r von 40 MHz bis 1.2 GHz in Abhängigkeit von der Frequenz F.

Die Verluste in Prozent und die Transmissionsdämpfung in dB sind in Bild 16 für ausgewählte Folien von 40 MHz bis 1 GHz dargestellt. Offensichtlich existieren Verlustmaxima von 38 bis 48 % für die Proben V2 und 2B. Die entsprechenden Maxima der Proben YI113 and 2A liegen bei niedrigeren und diejenigen der Probe KE050 bei höheren Frequenzen. Die Lage der Maxima hängt von Leitfähigkeit, Permeabilität und Dicke der Folien ab. Die besten Absorptionswerte erhielten wir für Carbon-Nanotubes, VAC Legierungen und Tridelta-Ferrite.

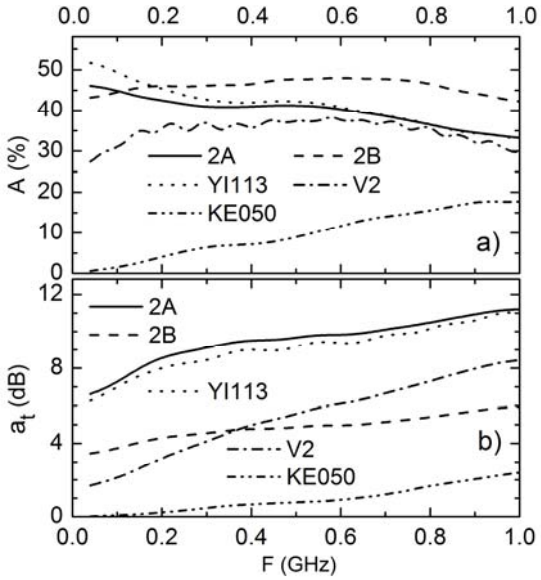

Bild 16: a) Verluste A in Prozent und b) Transmissionsdämpfung a_t in dB für ausgewählte Folien im Frequenzbereich F von 40 MHz bis 1 GHz.
2A: 66 Gew.% Tridelta-Ferrit und 2.8 Gew.% Carbon-Nanotubes
2B: 66 Gew.% Tridelta-Ferrit und 1.4 Gew.% Carbon-Nanotubes
YI113 : 66 Gew.% Tridelta-Ferrit und 5.2 Gew.% Printex
V2 : 66 Gew.% VAC amorphe Flakes und Carbonyl-Eisen
KE050: Referenz-Probe

Bild 17 zeigt die Frequenzabhängigkeit des Absorptionsfaktors normalisiert auf die Foliendicke a_a/d in dB/mm, welche mittels Koaxialtechnik und Lineartaper-Messungen ermittelt wurde. Die gestrichelte Region zwischen diesen Bereichen wurde interpoliert. Es ist klar zu erkennen, dass die Absorption deutlich mit der Frequenz ansteigt.

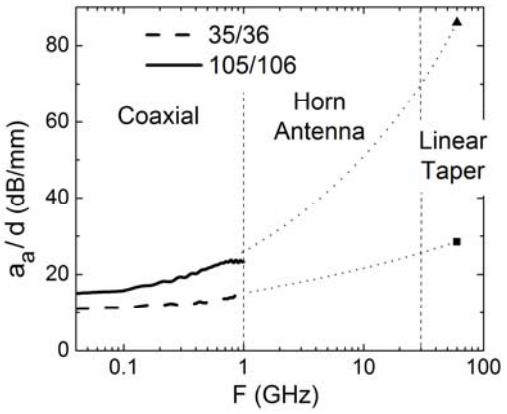

Bild 17: Frequenzabhängigkeit des Absorptionsfaktors a_a normalisiert auf die Foliendicke d.
35/36: 66 Gew.% VAC Pulver mit < 28 μm Korngröße und 9 Gew.% Printex
105/106: 66 Gew.% VAC amorphe Flakes und 9 wt.% Printex

Beispielanwendungen sind nachstehend dargestellt:

Digitalkamera: Jenoptik
GPS Navigation : BMW oder Daimler Crysler
Laptop: Siemens Fujitsu
Printed Circuit Board: Vogt AG oder Jenoptik
Wireless LAN- Schnittstelle
Kabelabschirmung
Geschirmtes Gehäuse (Hybridmiroelektonik oder Rittal)
Microstrip
Mobile phone : Vodaphone über Carbon Future
DVD Player: Grundig

Mikrowellenofenabschirmungen / industrieller Bereich

Nahrungsgütertrocknung
Trocknungstechnologien
Hybridsintertechnologien
Industrieöfen
Mikrowellenerwärmungsgeräte im Homebereich
Radartechnische Lösungen (Abstandsradar, Radar-Doppler-Effekt- Anwendungen)
Leistungsfähige Nachtsichtgeräte
Satellitenkommunikationstechnik im Frequenzbereich von 12 bis 16 GHz
Magnetrons für Arbeitsfrequenzen von 5, 12 und 28 GHz
Medizintechnik / Tomographie

Beispieldarstellungen beinhalten die nachstehenden Bilder:

Anwendungsbeispiele:

Handy

Laptop / Prozessorbereich

Digitalkamera

Navigationssysteme

DVD-Player

USB-Kabel

Antennen

Multilayer Printboard

Absorption by shielding

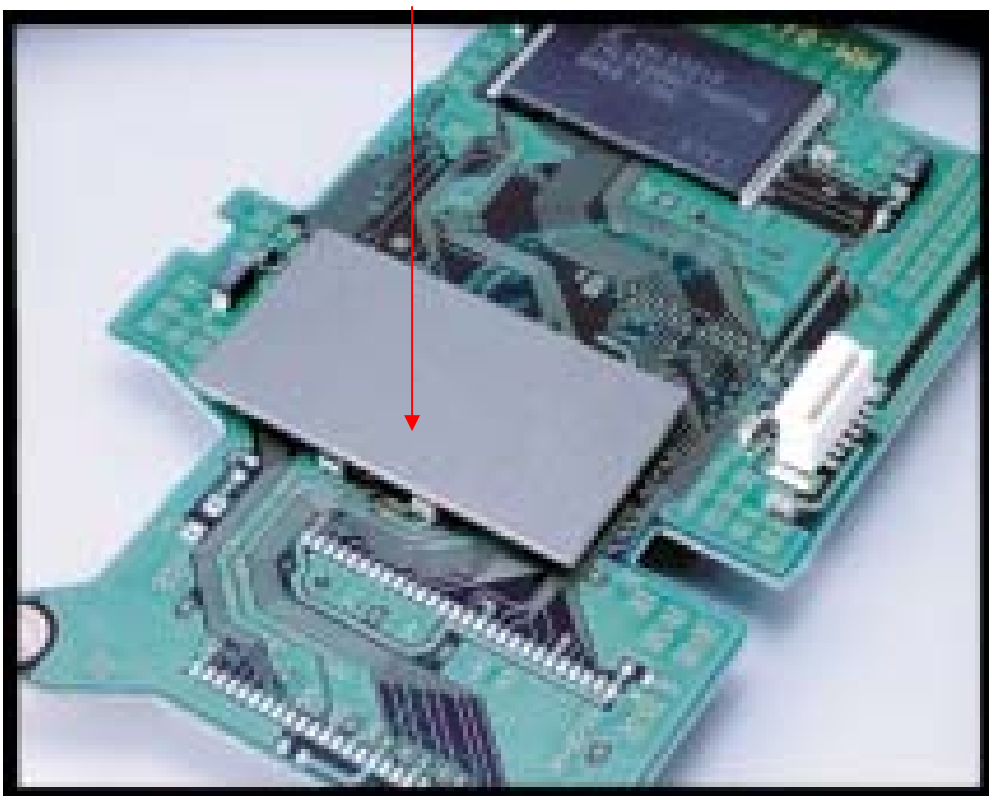

Bild 2: SiGe-basiertes Single-Chip Radarfrontend: Vorderseite mit Transceiver (oben), Rückseite mit Signalverarbeitung (unten) im Long-Rage Radar Radar-Sensor LRR3 der Firma Bosch.

© automotive

Radarfrontend

Die Kompositwerkstoffe für die Absorber- Erzeugnisse besitzen RoHS Konformität (Richtlinie2002/95/EG) und genügen der EG vom 24.03.2005 sowie zu umweltschädigenden Substanzen entsprechende der EU-Richtlinie wie:

Blei und Bleiverbindungen
Quecksilber und Quecksilberverbindungen
Cadmium und Cadmiumverbindungen
sechswertiges Chrom und Verbindungen mit 6-wertigem Chrom
Polybromierte Biphenyle
Polybromierte ozonvernichtende Substanzen
Polychlorierte Naphtalene
Asbest
Polychlorierte Paraffine
Tributyl-Zinn, Triphenyl-Zinn.

Kriterien für die Auswahl keramischer Absorberwerkstoffe für Anwendungen im Mikrowellenbereich

Die keramischen Werkstoffe nehmen in der Absorbertechnik, insbesondere für die Auslegung von Absorberschichten, eine Sonderstellung für Anwendungen unter extremen Bedingungen ein. Während die Korundwerkstoffe (α-Al_2O_3), die Zirkonate, Siliciumkarbide schon seit Jahren in der Mikrowellentechnik als Absorber (Suszeptoren) in Hochtemperaturöfen verbreitet Anwendung finden, besitzen keramische Nitride, Karbide, Boride und anderer Oxide nunmehr verstärktes Interesse als hoch-frequenzselektive Werkstoffe. Neben der chemischen Bindung bildet der definierte Gefügeaufbau dieser Werkstoffe die Grundlage für das Hochfrequenzverhalten, aber auch die mechanischen und thermischen Eigenschaften wie mechanische Festigkeit, Bruchzähigkeit, Kriechbeständigkeit bei hohen Temperaturen und die Thermoschockbeständigkeit.

Dazu zählt auch das Vermögen zur Ankopplung und Wechselwirkung der Werkstoffe in Mikrowellenfeldern bis in den Ultrarotbereich. Zur Klärung komplizierter die Absorption bestimmender Wechselwirkungen im cm- und mm-Wellenbereich, sind Kenntnisse atomarer und molekularer Anregungs- und Relaxationsprozesse erforderlich.

Über den gesteuerten Gefügeaufbau und die Wahl der chemischen Zusammensetzung lassen sich zum Teil sehr extreme Eigenschaften in metallischen und keramischen Werkstoffen vereinen, wie:

- hohe Wärmeleitfähigkeit und hohes elektrisches Isolationsvermögen
- hohe mechanische Festigkeit und Bioverträglichkeit
- Abrasionsfestigkeit und Chemikalienbeständigkeit
- Halbleitung, Ferrimagnetismus, Ferroelektrizität und Piezoelektrizität
- Transparenz und wellenlängendispersive Absorption
- kleine Wärmedehnung und hohe Thermoschockbeständigkeit.

Die Anwendungen zu entwickelnder Schirmfolien sind zur Zeit auf eine breitbandige Absorption >20 dB im Frequenzbereich von 0,5 bis 94 GHz (eingeschränkt 0,5 bis 18 GHz) gerichtet. Motiviert sind diese Arbeiten durch notwendige Maßnahmen zur Sicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit und der wirksamen Entstörung von elektrischen und elektronischen Geräte- und Anlagensystemen im Zusammenhang mit dem weiteren Ausbau der Mikrowellentechnik (Wärmeerzeugung, Richtfunktechnik, Bluetooth-Schaltungen, wireless communication technischer Systeme, Transpondertechnologien und RFID- (siehe K. Finken-

zeller, RFID-Handbuch, Carl Hanser Verlag München Wien, 2. aktualisierte Auflage 2000) Der Übergang zur digitalen Fernsehübertagungstechnik wird diesen Prozess in der nächsten Zeit beschleunigen.

Aus physikalischer Sicht lässt an dieser Stelle bereits die Feststellung treffen, das die Breitbandigkeit von 10 MHz bis 100 GHz nur mit Kompositen mit unterschiedlichen metallischen, magnetischen, dielektrischen, ferroelektrischen, piezoelektrischen und halbleitenden Fillern erreichbar sein wird. Insbesondere die Absorptionsprozesse unterhalb einer Wellenlänge von 1 mm erfordern nanoscalige Filler.

Literatur:

L. Michalowsky (Hrsg.), Magnettechnik, Vulkanverlag)

“Physik der Ferrite“, S. Krupicka, Vieweg 1973

“Ferrites“, J. Smit , H.P.J. Wijn, Phillips Technical Library, 1959

“Magnetic Garnets“, G. Winkler, Vieweg 1981

„Soft Ferrites – Properties and Applications“, E.C. Snelling, Butterworths 1988

“Handbook Of Modern Ferromagnetic Materials“, A. Goldmann, Kluwer 1999

Proceedings of the 9. International Conference on Ferrites in San Francisco 2004

C. Weißmantel und C. Hamann „Grundlagen der Physik, VEB Verlag der Wissenschaften Berlin 1979, S 685-3 ff

Kaschke Katalog 2004

L. Michalowsky (Hrsg.) Neue Keramische Werkstoffe, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart, (1994).

D. Autissier, D. Rousselle, A. Podemski, CEA-DAM, BP12, 91680 Brueres-le-Chatel, France

K. Finkenzeller, RFID-Handbuch, Carl Hanser Verlag München Wien, 2. aktualisierte Auflage 2000

“Magnetic Garnets“, G. Winkler, Vieweg 1981

“Handbook Of Modern Ferromagnetic Materials“, A. Goldmann, Kluwer 1999

Polder (Phil Mag 40, 99-115, 1949)

“Bloemberger und Suhl, Proc. I: R. E. 44, 1259-1269 und 1270-1284, 1956

“YIG Resonators and Filters, J. Helszajn, John Wiley and Sons, 1985

“Microwave Circulator Design D.K. Linkhardt, Artech House 1989

"Magnettechnik", L. Michalowsky (Hrsg.), Vulkan-Verlag ISBN 10: 3-8027-2139-7, 3. Auflage

P. Görnert, P. Payer, O. Surzhenko, L. Michalowsky, H. Heegn, E. Madai, M. Langer, 2007 Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, EMC 2007, 8-13 July 2007, Honolulu, Hawaii (USA)

Anlage 1:
Information über die Anwendung von Carbon-Nano-Halbzeugen in Kompositwerkstoffen zur gezielten Eigenschaftsverbesserung von multifunktionalen Werkstoffen

Die erkannten Potenziale nanostrukturierter Kohlenstoffhalbzeuge, wie

- Kohlenstoffnanofasern (CNF)
  - Fischgrätenstruktur (NBCNF)
  - verdrillte Strukturen (SCCNF)
  - Platelets (PLCNF)
- Carbon Nanotubes (CNT)
  - einschalige Nanoröhren (SWCNT)
  - mehrschalige Nanoröhren (MWCNT)

lassen einen volkswirtschaftlich bedeutsamen Innovationsschub in vielen Bereichen der Volkswirtschaft auf dem Gebiet der Hochleistungswerkstoffe erwarten. Die Halbzeuge mit ihren teilweise sehr extremen Werkstoffeigenschaften, wie sehr niedrigem elektrischen Widerstand 10 bis 100 Ω/cm, der hohen Wärmeleitfähigkeit bis 400 W/mK, der sehr hohen spezifischen Oberflächen von 200 bis 600 m²/g, der variierbaren Dichte im Bereich von 0,01 g/cm³ bis 1,3 g/cm³ , der sehr günstigen mechanischen Eigenschaften (E-Modul bis 2000 GPa, Zugfestigkeit bis 60000 MPa) ihrer Temperaturbeständigkeit bis 800°C an Luft und der ständig besseren Verfügbarkeit, eröffnet schrittweise die industrielle Nutzung in folgenden Branchen:

- Elektrische und elektronische Industrie hinsichtlich der Schaffung einer neuen Generation von Kompositwerkstoffen für die Sicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit von elektrischen Anlagen und Systemen mit hohen Verlusten bzw. Absorption im Frequenzbereich von 1 GHz bis 100 GHz
- Die Schaffung einer neuen Generation von Temperaturfühlern mit hoher Ansprechgeschwindigkeit, Temperatursensoren mit hoher thermischer Isolation und Temperaturtransmitter mit Eigenkalibrierung sowie Exschutzsicherheit
- Die Nutzung der hohen spezifischen Oberflächen in Verbindung mit metallischen Beschichtungen bei Carbon- Nanotubes zur Erhöhung der Ansprechempfindlichkeit in der Gassensorik sowie eine neue Generation hocheffektiver Katalysatoren für die Reaktionstechnik in der Synthese von organischen Rohstoffen.
- Metallische Composite (Multifunktionale Werkstoffe mit extremen mechanischen, thermischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften).

Projektpartner eines eventuellen leitungsfähigen Forschungsverbundes sind in Bayern und Thüringen:

FutureCarbon GmbH – Sprecher des Verbundes
Innovent e. V. Jena
Temperaturmesstechnik Geraberg GmbH
UST Umweltsensortechnik GmbH
Unternehmen mit pulvermetallurgischer Orientierung

In Thüringen angesiedelte Unternehmen stehen u. a. folgende Hochtechnologien zur Verfügung:

- Dünnschichttechnologien
- Dickfilmtechnologien
- Bondtechnologien
- CVD-Technologien
- Vakuum- und Schutzgassintertechnologien

- Rapid Quenching und High- Tech.- Wärmebehandlungen
- Mikrowellenunterstützte Technologien zur Beschichtung von Carbon-Nano-halbzeugen
- Hochauflösende analytische Verfahren.

Zum Stand von Wissenschaft und Technik

Nanotubes und Nanofasern

FutureCarbon's nanoskalierten Werkstoffe (möglicher Partner für die Nanohalbzeuge, Serienproduktion durch Bayer-Konzern Leverkusen) werden produziert auf der Basis einer im Hause CarbonFuture GmbH entwickelten CVD-Technologie mit eigenen Produktionsausrüstungen, die einen kontinuierlichen Produktionsprozess gestatten und die ständig im Einsatz befindlich sind. Die Katalysatoren, die für den Prozess erforderlich sind, werden ständig weiterentwickelt und durch Partner außer Haus hergestellt. Durch die Auswahl geeigneter Katalysatoren und Prozessparameter ist die Herstellung von Kohlenstoffnanofasern (CNF) mit Fischgrätenstruktur (NBCNF), verdrillten Strukturen (SCCNF) und von Platelets (PLCNF) als auch von Carbon Nanotubes (CNT), insbesondere von Multiröhrchen- Carbon Nanotubes (MWCNT) in größeren Mengen möglich (siehe Bild 1).
Die Materialien sind konditioniert für unterschiedliche Anwendungsgebiete bereits während der Synthese und/oder mit Hilfe physikalisch oder chemischer Behandlungen, die von FutureCarbon entwickelt worden sind. Zum Beispiel können CNT mit funktionellen Gruppen wie =O, -OH, -OOH modifiziert oder mit Metallen wie Fe, Co, Ni, Pd, Pt beschichtet werden. Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass die Nanofilamentsynthese der FutureCarbon GmbH auch die Herstellung modifizierter Graphite mit Hilfe der Plasmatechnologie ermöglicht.

Materialeigenschaften

In Bild 1 sind die Standardfilamenttypen dargestellt. Für CNF betragen die Durchmesser 80 bis 250 nm und die Längen variieren zwischen 2 und 30 µm, abhängig vom Typ. CNT werden in zwei Durchmesserbereichen produziert, nämlich 10 bis 20 nm und 40-60 nm mit Längen von 5 bis 10µm.
Auf die parallele Ausrichtung der Graphitoberflächen zur longitudinalen Filamentachse sind die extrem stabilen und flexiblen mechanischen Eigenschaften, die jeweils hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit zurückzuführen, die eine attraktive Option für Anwendungen im Automobilbereich, der Luft- und Raumfahrt sowie in der Elektronikindustrie darstellen.
Zum Beispiel ist die elektrische Leitfähigkeit der CNT vergleichbar mit Kupfer und die Wärmeleitfähigkeit in der Größenordnung des Diamants. Die CNF zeigen eine Verdrehung der Graphitschichten um einen spezifischen Winkel längs der longitudinalen Filamentachse. Die sehr raue Oberfläche von derartigen Fasern ist von Vorteil für katalytische Applikationen, d.h. die katalytische Immobilisierung über die Vergrößerung der spezifischen Oberflächen.
Der relativ geringe Scherungswiderstand der Graphitschichten führt zu selbstschmierenden Eigenschaften in rotierenden und gleitenden Systemen. Die geometrische Struktur der flachen Nanoscheiben nach dem Scherungsprozess ist vergleichbar zu jenen auf der Basis von Nano-Tonen.

Beispiele für die Neuheit der Lösungsansätze und Zielstellung
EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)

Die Weiterentwicklung der Mikrowellenkommunikation, wie der Aufbau der UMTS- Netze und -geräte, die Verbreitung von Nachtsichtgeräten, der verkehrsvorauseilenden Infor-

mationssysteme, Navigationssysteme, Dopplereffekt-basierte Radartechnik, Millimeter- und Submillimeterwellentechnik sowie der Spinelektronik erfordert neue Materialien für den Strahlenschutz für Anwendungsfrequenzen von 0, 1 bis 100 GHz. Der Innovationsprozess gewinnt durch die schnelle industrielle Umsetzung der Fertigung für III-V und II-VI Verbindungshalbleiter mit Arbeitsfrequenzen von 72 bis 76 GHz an Tempo. Dies trifft auch auf den Betrieb von Mikrowellenkomponenten für hohe Leistungen zu.

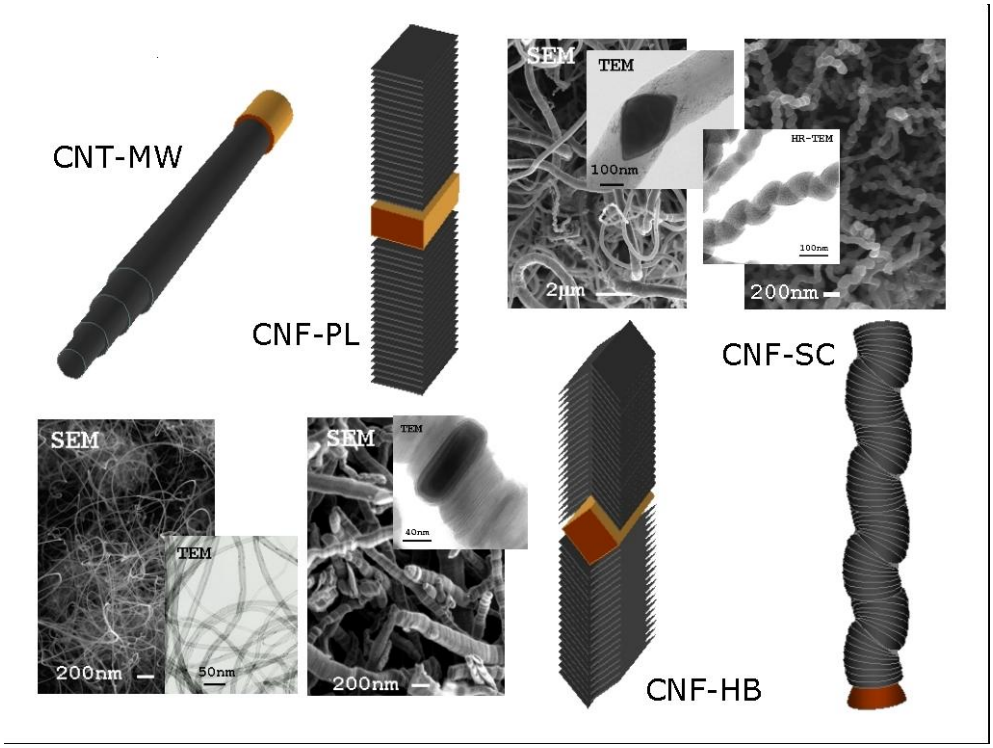

Bild 1: Standardtypen von Nanocarbon-Filamenten

Effektive breitbandige Höchstfrequenzschirmmaterialien sind auf der Basis von Multilayersystemen, Mehrfachreflexionen, metallischer und anorganisch- nichtmetallischer Dünnfilmsysteme und elektronisch aktiver Polymermatrices unter Nutzung der elektronischen Leitfähigkeitsprozesse, Ladungsverschiebungen, über die elektrische Polarisierbarkeit von Molekülgruppen und Faserkomposite (auch insbesondere leitfähige Carbon-Nanotubes mit und ohne Metallisierung und großem Aspektverhältnis) zu erwarten.

Der Strahlenschutz gewinnt mit der Erschließung des Frequenzbereiches von 30 bis 100 GHz für kommerzielle Anwendungen eine stark wachsende Bedeutung. Der Gesetzgeber ist bereits aktiv, die Gesetzgebung zur elektromagnetischen Verträglichkeit auf den aktuellen Erkenntnisstand zu erweitern.

Für Abschirmmaterialien, bestehend aus gefüllten Kunststoffen, sind nach theoretischen Betrachtungen zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, die komplexen physikalischen Kenngrößen Leitfähigkeit, Permeabilität sowie die Dielektrizität maßgeblich für die Dämpfungseigenschaften verantwortlich. Das heißt, durch gezielte Fillerkombinationen können die einzelnen Beiträge zur Transmissionsdämpfung, Absorption (Verluste) und Reflexion anwendungsorientiert gesteuert werden.

Durch die Bündelung des Expertenwissens von Erfahrungsträgern auf den für die Entwicklung von Abschirmmaterialien relevanten Gebieten sowie der vorliegenden technischen Möglichkeiten werden innovative, hochwirksame und applikations-freundliche Materialien in Form von Formteilen, von flexiblen Folien und Schläuchen entwickelt und über industrielle Entwicklungsprojekte zur Marktreife gebracht werden. Der Schwerpunkt der Entwicklung der neuen Materialien liegt dabei auf einer Dominanz der Absorption gegenüber der Reflexion

von elektromagnetischer Strahlung. Bevorzugt werden Polymerkomposite mit definierten elektromagnetisch aktiven Fillern.

Die für die Anwendung vorgesehenen wirksamen Stoffe – Nanotubes werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Abschirmwirkung im Kompositwerkstoff untersucht. Effektive Oberflächenbehandlungsverfahren, wie chemische Funktionalisierungen und Coating-Verfahren, werden inzwischen beherrscht.

Die hergestellten Abschirmfolien wurden Fernfeldmessungen (TEM-Welle) unterzogen. Es wurden dazu zwei verschieden Messtechniken angewandt. Im Frequenzbereich von 40 MHz-1GHz erfolgte die Messung mit einer geschlossenen Koaxial-Messtechnik von Hilo-Test (TEM 2000). Hierbei konnte die Bestimmung der Dämpfung getrennt nach Reflexion und Transmission durchführt werden. Den Anteil der Absorption an der Transmissionsdämpfung konnte somit berechnet werden. Als zweites Messverfahren wurde eine Antennen-Empfänger-Anordnung – SAS-200/571 Horn-Antenne – im Frequenzbereich 700 MHz-18 GHz angewandt. Es handelt sich um eine offene Anordnung, mit der folglich nur die Transmissionsdämpfung bestimmbar ist.

Für den höheren Frequenzbereich wurden Messungen am IPHT Jena durchgeführt. Dazu erfolgten an ausgewählten Proben mit Nanotube-Zusätzen Messungen im Hohlleiter (50-75 GHz) und mit Lineartaper (50-80 GHz).

Referenzmessungen wurden am Elektrotechnischen Institut der TU Dresden an vier Materialproben durchgeführt. Die Schirmdämpfungen bei Frequenzen > 160 MHz waren mit den durchgeführten Messungen an der TEM- Messzelle vergleichbar und zeigten eine gute Übereinstimmung.

Konkret wurden im Ergebnis dieses Projektes mit Fillern auf der Basis von

- Carbon- Nanotubes (2A, 2B)
- Eisenbasierte nanokristalline Flakes mit großem Aspektverhältnis (V2) und
- Fillergemische auf Ferrit- und Leitrußbasis (YI113)

Abschirmmaterialien entwickelt, die ein hohes Potential für die Herstellung von Hochfrequenzmaterialien mit Absorptionseigenschaften (hohe relative Verluste) zeigen.

In Bild . 2 wurden im Projekt entwickelte Abschirmfolien (Absorption orientiert) mit der Folie KE von NEC- Tokin verglichen, deren Optimum im Frequenzbereich von 3-7 GHz liegt.

Im Frequenzbereich von 40 MHz-1 GHz kann mit dem Einsatz von Nanotubes (Folie 2B) relativ geringer Konzentration (1,5 Gew.-%) eine Absorption der elektromagnetischen Energie von 42-48% bei moderater Transmissionsdämpfung von 75 % erzielt werden.

Im Gegensatz zu kommerziellen Abschirmmaterialien, die vorwiegend auf der Basis von Metallen die elektromagnetische Energie > 90% reflektieren, kann mit der Entwicklung von auf Absorption orientierten Materialien ein wichtiger Beitrag sowohl zur Vermeidung von Elektrosmog als auch elektromagnetischer Interferenzen geleistet werden.

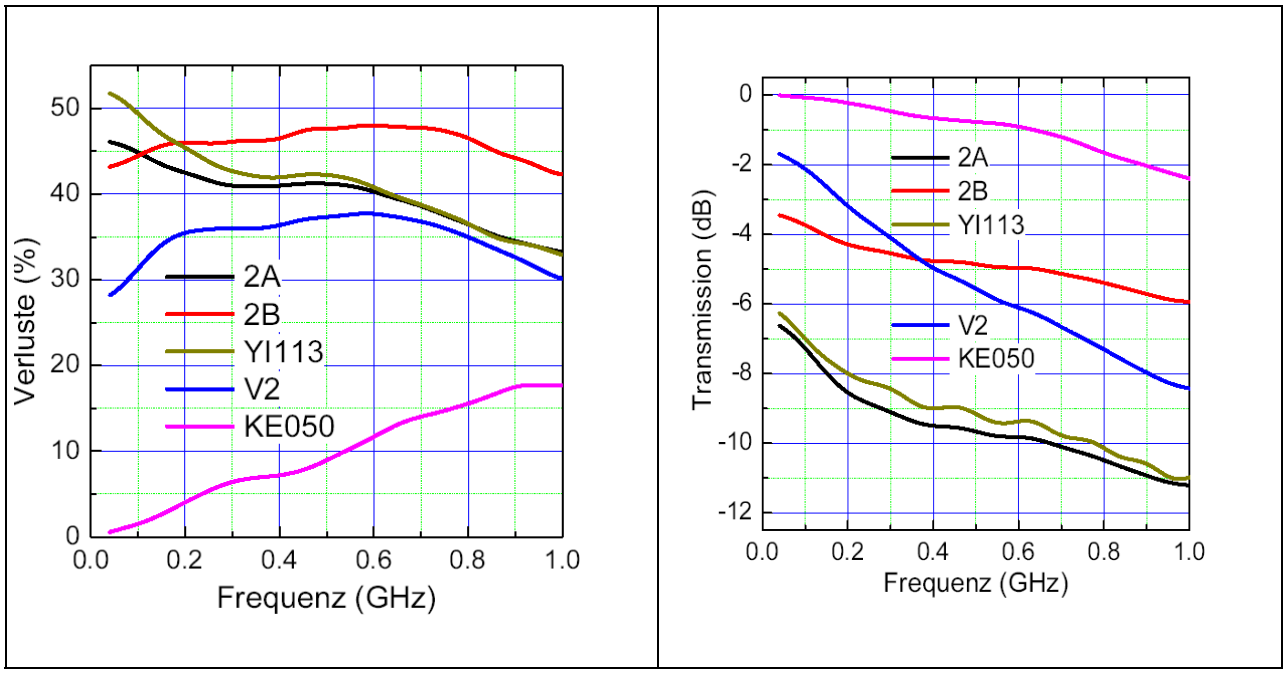

Bild 2: Verluste in % (Absorption) und Transmissionsdämpfung hergestellter Folien

Potentielle Neuentwicklungen unter Verwendung von Nanotubes:

<u>Gassensorik</u>

Die Gassensorik findet in den Wachstumsmärkten der Automobil-, Gebäude- und Industriemesstechnik zunehmend Anwendung. Innerhalb dieser Branchen spielen Gassensoren eine wichtige Rolle im Conveniencebereich, in der Prozesssteuerung und in Sicherheitsanwendungen.

Hinsichtlich Sensitivität, Selektivität und Stabilität sowie Energieverbrauch stellen die jeweiligen Anwendungsgebiete verschiedenste Anforderungen an die Gassensorik. Im Fall des Brandnachweises kann man mit breitbandig ansprechenden Sensoren eines Metalloxid-Gassensor-Arrays sehr gute Ergebnisse erzielen. In anderen Applikationen wie z.B. der Leckdetektion sind deutlich selektivere Sensoren notwendig. Bei vielen Anwendungsgebieten besteht das Problem, sehr geringe Konzentrationen reaktiver und toxischer Gase sowie anderer Gefahrstoffe selektiv nachzuweisen.

Ziel der Arbeiten soll sein, auf Vorentwicklungen im Bereich der Gassensorik aufzubauen und durch den Einsatz spezieller Carbon- Nanotubes empfindlichkeitsgesteigerte Sensorelemente mit niedrigstem Leistungsverbrauch zu schaffen. Basis sind resistive Metalloxid-Gassensoren, deren Eigenschaften durch nanoskalige Schichten bzw. Schichtsysteme modifiziert werden sollen.

In funktionalen Messungen wurden spezielle Carbon- Nanotubes auf unbeheizte Trägersubstrate aufgebracht und das resistive Verhalten bei Beaufschlagung von verschiedensten Gasen untersucht. Relevante Änderungen des Widerstandes ergaben sich u.a. bei NO_2, H_2, NH_3 und C_2H_5OH. Beispielhaft ist im nachstehenden Bild 3 das resistive NO_2-Ansprechverhalten dargestellt. Günstig im Vergleich zur derzeit bekannten Literatur erscheinen die kürzeren Ansprech- und Abklingzeiten der verwendeten Carbon Nanotubes.

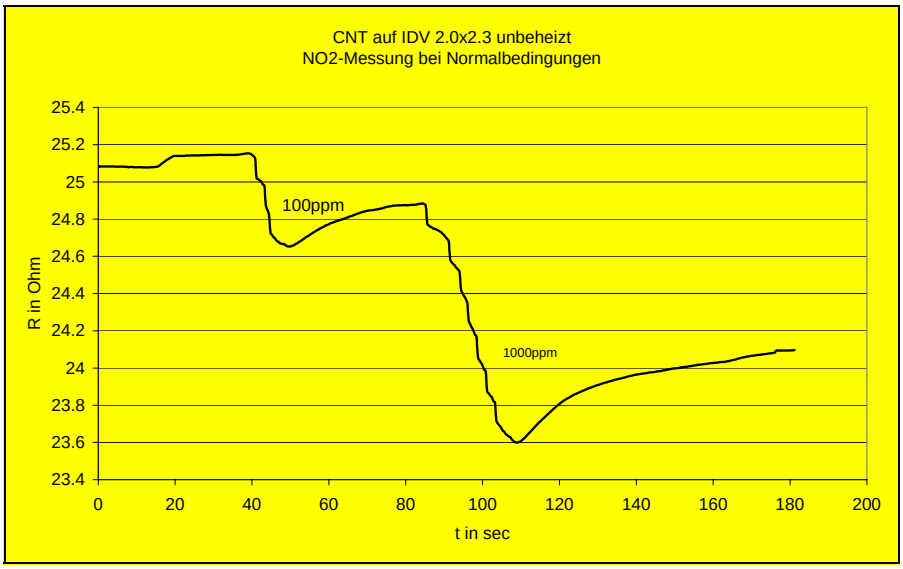

Bild 3: NO_2-Ansprechverhalten von speziellen CNT auf unbeheizten Trägersubstraten

Die Entwicklung soll die Herstellung neuartiger Gassensoren sowie deren funktionale Charakterisierung beinhalten. Bei erfolgreicher Bewertung ist die Umsetzung der Ergebnisse in eigene innovative Produkte möglich.

Die Verfügbarkeit von Carbon- Nanotubes soll in der Gassensorik und der Katalyse für Erdgas- und Erdölaufbereitungsprozesse wie

- höhere Empfindlichkeiten in der Gasanalytik
- selektive Gasanalyse in Gasgemischen

ermöglichen. Über bekannte Metallschichtsysteme mit spezifischen Dotierungen, beispielsweise der Selten Erdenmetalle und die Vergrößerung der Oberflächen für die Chemisorptions- bzw. Absorptionsprozesse der zu analysierenden speziellen Gasatmosphäre können

- katalytische Beeinflussung der Effektivität von chemischen Reaktionen
- selektive katalytische Beeinflussung der Effektivität von chemischen Reaktionen

sowie jeweils über die vergrößerten spezifischen Katalysatoroberflächen dotierter Platin-, Rhodium-, Palladium- bzw. Rutheniumschichten höhere Auflösungen erzielt werden. Als Substratwerkstoffe stehen stabilisiertes Zirkoniumdioxid, Aluminiumoxid und Saphir zur Diskussion.

Temperaturmeßtechnik

Die Verfügbarkeit konfektionierter Carbon- Nanotubes auf definierten Substraten lässt folgendes Potenzial erkennen:

- Anwendung in Systemen mit hoher thermischer Isolation
  - für Hochtemperaturdatenlogger
  - Sensorisolation zur Anwendungsumgebung
  - Raumtemperaturfühler
  - Sicherung der mechanisch spannungsfreien Konfektionierung.

Für diese Anwendungen werden Halbzeuge mit sehr geringer Dichte benötigt, die hohe mechanische Stabilität (Nutzung des hohen E- Modul und der hohen Zugfestigkeit) bei minimaler Wärmeleitfähigkeit (<0,05 W/mK) besitzen. Das Hauptproblem besteht in der elektrischen Isolation der Nanotube-Halbzeuge.

- Anwendung in Systemen thermisch leitend
  Prozessflexible Ankopplungen mit sehr kurzen Ansprechzeiten z. B. Anlegetemperaturfühler für hohe Prozesstemperaturen.
  Für diese Anwendungen ist bei hoher Verarbeitungsdichte der Carbon- Nanotubes die hohe Wärmeleitfähigkeit (400 W/mK) die Verbesserung der Temperaturmesssysteme zum Stand der Technik durch die Nutzung der großen Oberflächen der Carbon- Nanotubes auf geeigneten Substraten mit sehr hohem Wärmeübergang zu erschließen
  - sehr guter Wärmeübergang
  - Realisierung schwarzer Strahler mit Potenzial für kostengünstige Eigenkalibrierungen im System
  - Realisierung explosionsgehemmter Oberflächen für die Thermalsensorik.

Metallkomposite

- Realisierung von Kupferleitwerkstoffen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften, hoher Wärmeleitfähigkeit und elektrischer Leitfähigkeit

- Realisierung von Verbundwerkstoffen und Aluminium mit verbesserten mechanischen Eigenschaften auf Buntmetallbasis

- Realisierung von Verbundwerkstoffen mit verbesserten mechanischen und magnetischen Eigenschaften auf Eisen und Nickel-Eisenbasis

Voraussetzung zur komplexen Eigenschaftsoptimierung von metallischen magnetischen Kompositwerkstoffen sind:

Einlagerungskomposite unter Verwendung von Carbon Nanotubes
Dispersionswerkstoffe auf Basis hochschmelzender oxidischer Filler
Tränkwerkstoffe auf Basis von Überschwermetallen
Pulvermetallurgische Verfahren mit Schutzgassinterung und Powder Injection Moulding.

Adresse der Verfasser:

Innovent e.V., Prüssingstr. 27B, 07745 Jena
www.innovent-jena.de