

Nicht nur für HF-Anwendungen interessant: GaN-HEMTs

WOLF-DIETER ROTH – DL2MCD

„Exotische“ Verbindungshalbleiter wie GaAs, SiC oder GaN werden nicht nur in LEDs von Infrarot bis Ultraviolett verwendet, sondern bekanntermaßen auch für Bauelemente in HF-Verstärkern. Doch diese Materialien sind deutlich vielseitiger einsetzbar und spielen deshalb z. B. ebenso bei der Entwicklung besonders kompakter und verlustarmer Netzteile eine Rolle. Die wichtigsten Fakten für das Verständnis der Zusammenhänge liefert der nachstehende Beitrag.

Die Anfangsjahre der Elektronik waren von leistungslos gesteuerten Bauelementen geprägt, den Röhren. Sowohl das lineare Verstärkerelement, die Elektronenröhre mit geheizter Katode, als auch der Schalter für höhere Leistungen, das gasgefüllte Thyatron – beide hatten den Vorzug, über die Gitteranschlüsse hochohmig und spannungsgesteuert zu arbeiten. Zudem war für damalige Verhältnisse zumindest die reguläre Elektronenröhre durchaus für HF-Anwendungen geeignet. Erst im UHF-Fernsehtuner waren Halbleiter später die bessere Wahl, in diesem Fall bipolare Transistoren, die strom- und nicht spannungsgesteuert arbeiten.

■ Schneller, kleiner, leistungsfähiger

Im Vergleich zur Röhrentechnik hat sich heute nicht nur die Anzahl der Bauelemente in einer Schaltung um etliche Zehnerpotenzen erhöht, sondern auch die Arbeitsfrequenz. Computer arbeiten längst mit Taktfrequenzen im Gigahertzbereich und somit genau wie unsere Mobiltelefone mit Frequenzen, die einst als unbrauchbar galten, so wie die Kurzwelle am Anfang des vorigen Jahrhunderts.

Moderne Netzteile nutzen ebenfalls nicht mehr die herkömmlichen 50-Hz-Transformatoren und linearen Regelschaltungen, sondern Schaltregler mit Arbeitsfrequenzen von 50 kHz bis in den Megahertzbereich. Das hat zur Folge, dass die Kapazitäts- und Induktivitätswerte der Bauelemente sowie ihre Baugröße geringer werden. Gleichzeitig steigen der Wirkungsgrad und bei schlechter Konstruktion allerdings auch die Funkstörungen.

■ Spannungssteuerung bevorzugt

Geblichen ist jedoch, dass Entwickler spannungsgesteuerte aktive Bauteile bevorzugen. Das ist kein Problem, denn viele Halbleiterbauelemente, die längst den Platz der Röhren eingenommen haben, sind ebenfalls feldgesteuert. Das Prinzip des FET, des spannungsgesteuerten unipolaren Feldeffekttransistors, wurde schon in

den 1920er-Jahren definiert, damals jedoch mangels der Möglichkeit, diese Bauteile herzustellen, nicht weiter verfolgt.

Die ersten marktreifen Transistoren waren bipolare Ausführungen. Der FET in all seinen Varianten ist heute jedoch im Vergleich zu dem mit P-N-Sperrschichten stromgesteuerten bipolaren Transistor weiter verbreitet. Eine Kombination aus beiden, der IGBT (Bipolartransistor mit isoliertem Gate-Anschluss, engl. *Insulated-Gate Bipolar Transistor*), hat den Thyristor, das Halbleiteräquivalent zum Thyatron, in der Leistungselektronik außerhalb einfacher Glühlampendimmer abgelöst.

Der FET wurde beständig weiterentwickelt. War er zunächst als Kleinleistungs-JFET (engl. *Junction Field Effect Transistor*) wie ein bipolarer Transistor mit einer Sperrschicht ausgerüstet, die bei falscher Anschlusspolung leitete, folgte in der technologischen Entwicklung der MOSFET mit einem durch Siliziumoxid isolierten Gate. Dieser ist inzwischen auch als Leistungs-MOSFET verfügbar.

HEMTs, also Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit (engl. *High-Electron-Mobility Transistors*) auf GaN-Basis erreichen schließlich aufgrund ihrer besonderen Materialeigenschaften mit und ohne isoliertes Gate eine noch bessere Schaltcharakteristik und höhere Schaltgeschwindigkeiten als Silizium-Halbleiter, seien es nun JFET, MOSFET oder IGBT.

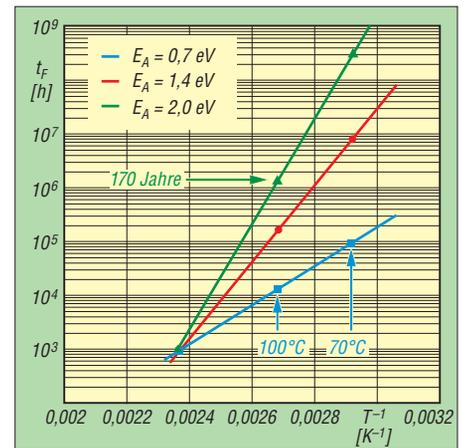
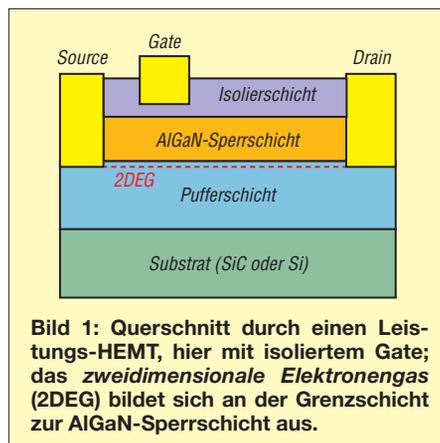


Bild 2: Eine höhere Aktivierungsenergie E_A des Materials führt, ebenso wie niedrige Arbeitstemperaturen, zu höherer Lebensdauer t_f des betreffenden Bauelements.

■ Basismaterial Galliumnitrid

Der Verbindungshalbleiter Galliumnitrid (GaN) wurde zunächst als Grundlage für blaue und damit auch weiße LEDs bekannt, was 2014 zur Verleihung des Nobelpreises an deren Erfinder führte [1]. Zum Abstrahlen blauen Lichts sind größere Bandabstände bzw. -lücken (engl. *Band-gaps*) im Halbleiter erforderlich, doch andere Wide-Bandgap-Verbindungshalbleiter wie Siliziumkarbid (SiC) hatten sich zuvor als nicht geeignet herausgestellt. Trotz Preisen in seinerzeit dreistelligen DM-Bereich und Produktion in Deutschland hatten blaue LEDs aus SiC nur eine kurze Lebensdauer. Danach entdeckte man ähnlich zu Galliumarsenid (GaAs) die besonderen Fähigkeiten des Materials Galliumnitrid für HF-Transistoren, die HEMTs.

Als dritte Entwicklungsstufe, die es bei GaAs-Halbleitern nicht gab, sind die GaN-HEMTs inzwischen jedoch ebenso in der klassischen Leistungselektronik heimisch geworden. Bei dem vom Distributor *Hy-Line Power Components* [2] vertretenen Hersteller *Transphorm* entwickelten eben jene Mitarbeiter, die zuvor bereits GaN-LEDs und GaN-HF-Bauteile produziert hatten und deshalb auf viele Jahre Erfahrung mit diesem Material zurückblicken können, nun die ersten GaN-HEMTs für die Leistungselektronik.

Wide-Bandgap-Halbleitermaterialien wie GaN haben den Vorteil geringer Leckströme und hoher Temperaturfestigkeit. Im Gegensatz zu Germaniumtransistoren, die wegen ihrer geringen Temperaturbeständigkeit und hoher Ruhestrome bereits wenige Jahre nach ihrer Einführung durch Siliziumhalbleiter ersetzt wurden, können *Transphorm*-GaN-Halbleiter bis 175 °C Sperrschichttemperatur betrieben werden. Diese liegt deutlich höher als die von Silizium. Bei einem Betrieb bis maximal 150 °C, wie in Datenblättern spezifiziert, steigt die Zu-

verlässigkeit weiter an. Dabei fallen dank des hohen Wirkungsgrads und der ausgeprägten Elektronenbeweglichkeit im Halbleiter die Schaltzeiten geringer und die Eigenerwärmung des Bausteins niedriger aus. Bei geringeren Temperaturen bringt die höhere Aktivierungsenergie von GaN ebenso eine erhöhte Lebensdauer mit sich (Bild 2).

■ „Elektronengas“

Die hohe Elektronenbeweglichkeit im Halbleitermaterial der HEMTs entsteht wiederum dadurch, dass diese mindestens zwei unterschiedliche Verbindungshalbleitermaterialien mit unterschiedlicher Bandlücke nutzen, neben GaN beispielsweise noch AlGaIn. An der Grenzschicht zwischen beiden Materialien entsteht dann das sogenannte *zweidimensionale Elektronengas*, eine Zone, in der sich Elektronen entlang der Grenzfläche (und nur entlang dieser!) besonders schnell bewegen können (Bild 1).

Ein Problem der normalen GaN-HEMTs besteht darin, dass sie ursprünglich ohne Steuerspannung leitend sind. Es handelt sich um selbstleitende Verarmungstypen. Damit ähneln sie zwar wiederum den Elektronenröhren, doch war dieses Verhalten schon bei diesen lästig. Ein Bauteil, das ohne Steuerspannung den Stromfluss ermöglicht, ist bereits in Kleinleistungsschaltungen gewöhnungsbedürftig, in der Leistungselektronik jedoch durchaus problematisch, weil ein Ausfall der Ansteuerung zum Durchschalten aller Leistungsstufen führt und damit Kurzschlüsse hervorrufen kann.

■ Selbstsperrende Ausführungen

Selbstsperrende Anreicherungstypen sind im Schaltungsdesign wesentlich angenehmer, doch beim GaN-HEMT eher als p-Typ realisierbar, bei denen Elektronenlücken (Löcher) den Strom darstellen, nicht Elektronen. Diese haben leider gegenüber dem n-Typ bislang noch die schlechteren technischen Daten. Andere Design-Lösungen, die zu HEMTs führen, welche ohne angelegte Steuerspannung sperren, haben teils funktionelle Nachteile. Sie erreichen beispielsweise nur 200 V Sperrspannung oder besitzen kein isoliertes Gate.

Transphorm hat dieses Problem aktuell durch eine Kaskodenschaltung aus einem selbstsperrenden Niederspannungs-MOSFET in Silizium-Technik und einem normalen n-Typ-HEMT gelöst (Bild 3). Bei geringen Spannungen ist der konventionelle MOSFET noch schnell genug und die Kaskode somit ebenfalls selbstsperrend. Ein Miller-Plateau (Effekt im Zusammenhang mit der Ladekurve der Gate-Kapazität) tritt nicht in Erscheinung und 650 V

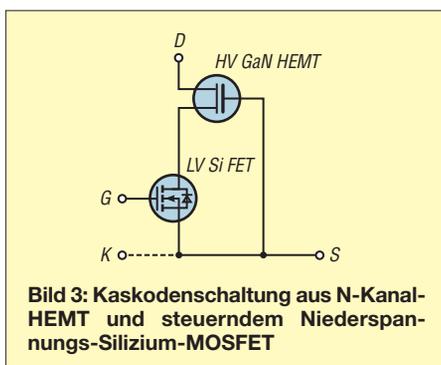


Bild 3: Kaskodenschaltung aus N-Kanal-HEMT und steuerndem Niederspannungs-Silizium-MOSFET

Sperrspannung wie bei IGBTs und MOSFETs zu erreichen, ist kein Problem. Der Kaskoden-HEMT kann nun prinzipiell wie ein normaler Silizium-Leistungsmosfet eingesetzt werden. IGBT- und MOSFET-Treiberschaltungen sind daher für GaN-HEMTs verwendbar und Steuerspannungen bis zu ± 18 V mit ihrem erhöhten Störabstand möglich.

■ Kein 1:1-Ersatz für MOSFETs

Den HEMT ohne Weiteres anstelle des MOSFET in eine vorhandene Schaltung einzubauen, ist nicht sinnvoll, weil er dann seine Vorzüge nicht ausspielen kann. HEMTs sollten schon eigens für sie entwickelte Schaltungen erhalten, welche die höhere Schaltgeschwindigkeit, die geringere Verlustleistung und andere Unterschiede bei den „inneren Werten“ berücksichtigen.

So enthält der HEMT keine problematische langsame Body-Diode mit einem hohen Wert für Q_{rr} (Umkehr-Erholungsladung, eng. *Reverse Recovery Charge*) und benötigt keine externen Freilaufdioden (Bild 4). Dies macht Schaltungen mit GaN-Leistungshalbleitern schneller. IGBTs verarbeiten höchstens Signalfrequenzen im zweistelligen Kilohertz-Bereich und benötigen zusätzliche Freilaufdioden. 600-V-MOSFETs liefern wegen des hohen Q_{rr} ihrer Body-Dioden in Brückenschaltungen keine besseren Ergebnisse. Aktuell lieferbare GaN-HEMTs erreichen hingegen Einschaltzeiten von nur 3,5 ns.

■ Masse an Source oder Drain

Wirkungsgrad und Leistungsdichte für Stromversorgungen und Spannungswandler mit GaN-Leistungshalbleitern liegen

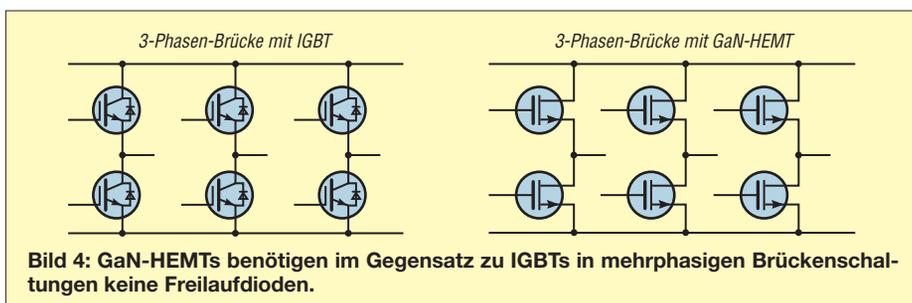


Bild 4: GaN-HEMTs benötigen im Gegensatz zu IGBTs in mehrphasigen Brückenschaltungen keine Freilaufdioden.

deutlich über denen optimierter Lösungen mit Siliziumhalbleitern. Dabei muss das schnellere Schalten nicht zu erhöhten Funkstörungen führen. Um diese zu minimieren, gibt es *Transphorm*-HEMTs in unterschiedlichen Bauformen mit Source oder Drain an der Kühlfahne, um an dieser in Brücken- und Gegentaktschaltungen stets ein stabiles Potenzial ohne schnelle Spannungswechsel zu haben.

Neben SMD-Gehäusen sind die HEMTs aktuell im TO-220- und TO-247-Gehäuse lieferbar, die an Kühlkörper geschraubt werden können. So sind gegenwärtig mit dem Typ TPH3207 bereits bis zu 220 A Spitzenstrom möglich und dies bei 650 V Schaltspannung, 41 m Ω Durchgangswiderstand und einem $Q_{rr} = 175$ nC bei voller Einhaltung der JEDEC-Qualifikationen (Standardisierungsvorgaben für Halbleiterbauelemente).

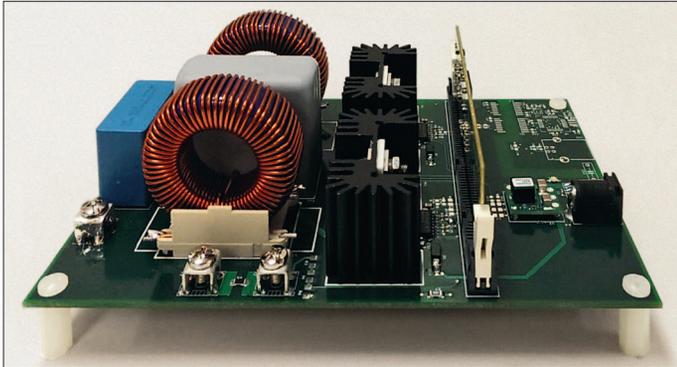
Dabei wird es jedoch nicht bleiben. 2017 sollen im TO-247-Gehäuse Durchgangswiderstände unter 30 m Ω erreicht werden, im SMD- und TO-220-Gehäuse unter 50 m Ω und damit bis zu 2,5 kW Leistung in der Applikation. 2018 folgen dann höhere Sperrspannungen von 900 V und 1200 V sowie nativ selbstsperrende HEMTs. Dies übrigens nicht, um höhere Geschwindigkeiten gegenüber der MOSFET-HEMT-Kaskode zu erreichen, sondern um die Chipfläche und Bauteileanzahl und damit die Kosten zu reduzieren und die Zuverlässigkeit zu erhöhen.

■ 40 MHz Schaltfrequenz?

Schaltfrequenzen von 40 MHz und mehr in Schaltnetzteilen, wie mit selbstsperrenden HEMTs ohne Kaskode erreichbar, werden auf absehbare Zeit noch nicht Realität, so Zan Huang von *Transphorm*, da dies nicht nur bei den Halbleitern, sondern ebenso bei den passiven Bauelementen entsprechend kürzere Verdrahtungswege und damit kompaktere Bauteile erfordert. Für derart hohe Leistungsdichte und Frequenz geeignete Ferrit- und Keramikwerkstoffe stehen gegenwärtig noch nicht zur Verfügung.

Zudem können die höheren Frequenzen gar nicht in allen Schaltungen genutzt werden. Inverter lassen sich mit geeigneten passiven Bauelementen kleiner bauen,

für reine Leistungsfaktorkorrektur-Schaltungen (engl. *Power Factor Correction*, abgekürzt PFC) sind die höheren möglichen Frequenzen dagegen irrelevant. Bidirektionale Wandler nutzen allerdings dieselbe Baugruppe für Inverter und PFC. Die Funkabstrahlungen würden bei höheren Schaltfrequenzen übrigens nicht automatisch zunehmen, da die Baugruppen dann kleiner werden und sich besser abschirmen und abblocken lassen. Noch sind aber zweistellige Megahertz-Taktfrequenzen ohnehin kein Thema.



■ Gehäusefrage

Für die aktuell möglichen Konfigurationen ist die MOSFET-HEMT-Kaskode dagegen mehr als ausreichend, ebenso wie die bedrahteten Gehäuseformen TO-220 und TO-247. Letztere sind zwar wenig HF-tauglich, haben sich aber in Leistungsanwendungen bewährt und so die hohe Zuverlässigkeit der *Transphorm*-Produkte nach JEDEC-Spezifikationen unter Beweis gestellt.

Nichtsdestotrotz werden 2017 neben den bereits existierenden HEMTs im PQFN-Gehäuse weitere SMD-Bauformen kommen, wie SO-8/SO-16, TO-263 (D2PAK), TO-268 (D3PAK) und andere SMT-Gehäuseausführungen. Später folgen komplette Intelligent-Power-Module (IPM) wie beispielsweise Halbbrücken.

Die Entwicklung der GaN-Halbleiter schreitet schnell voran: Siliziumkarbid (SiC) in HF-Verstärkern wurde innerhalb von nur drei Jahren durch GaN abgelöst. GaN in Leistungshalbleitern gilt noch als gegenüber der Silizium-Technologie eingeschränkt, doch nach den 600-V-Baureihen wird *Transphorm* nun 1200-V-Varianten auf den Markt bringen, die damit ein Pendant zur gängigsten IGBT-Sperrspannungsklasse darstellen. Ebenfalls interessant sind Vier-Quadranten-HEMT-Schalter, die bislang übliche, weit komplexere Konstruktionen ersetzen können.

Die etwas höheren Preise für GaN-Halbleiter schrecken zwar noch manchen Entwickler ab, Marktforscher gehen jedoch davon aus, dass ein 15-A-GaN-HEMT bald preislich mit seinem Silizium-Pendant

gleichziehen wird und schon jetzt durch die technischen Vorteile punkten kann.

■ Musteraufbauten

Vorhandene Schaltungslayouts sind für die höheren Schaltgeschwindigkeiten und Taktfrequenzen der GaN-HEMTs oft ungeeignet. Sie können durch ungewollt gekoppelte Spulen und zu hohe parasitäre Induktivitäten zu Fehlfunktionen und im Extremfall zur Zerstörung der Halbleiterbauelemente führen. Um dem Entwickler frustfreies Testen der GaN-HEMTs mit unterschiedlichen

Bild 5: Diese Wechselrichterbaugruppe spiegelt die kompakteren Layouts wider, welche GaN-Halbleiter gegenüber Silizium-IGBTs ermöglichen.

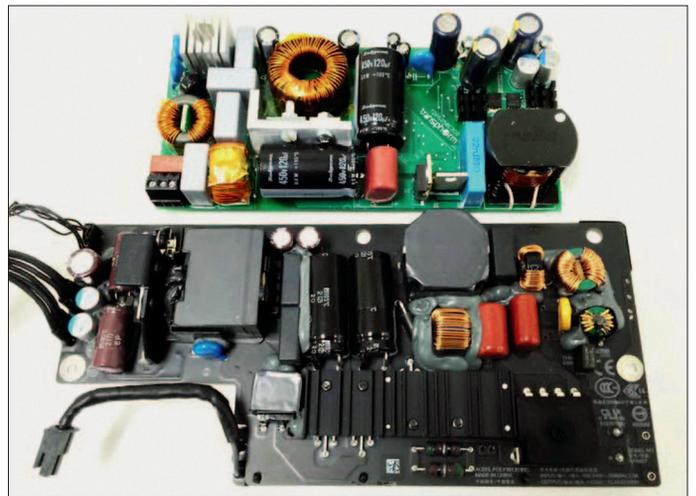


Bild 6: Referenzplatine mit GaN-HEMTs für ein 250-W-All-in-One-Computernetzteil (oben) im Vergleich zur herkömmlichen Lösung mit Silizium-Halbleitern (unten)
Fotos: Werkfotos

Wandlertopologien zu ermöglichen, hat *Transphorm* eigene Musteraufbauten entwickelt, die als Prototypen zu Test- und Demonstrationszwecken erworben werden können.

Selbstverständlich stehen Layout und Stücklisten einzeln zur Verfügung. Wegen der als notwendig betrachteten eingehenden Beratung des Entwicklers über die speziell zu beachtenden Besonderheiten der flinken Schalter werden diese jedoch erst bei direktem Kontakt herausgegeben und nicht zum allgemeinen Download angeboten. Damit möchte man verhindern, dass vermeidbare Fehler oder individuelle Anpassungen zu schlechten Leistungsparametern oder Ausfällen führen.

Der Photovoltaik-Wechselrichter in Bild 5 stellt ein typisches Einsatzgebiet von GaN-Halbleitern dar. Hier sind sowohl der höhere Wirkungsgrad als auch das geringere Volumen von Vorteil. Das japanische Unternehmen *Yaskawa* entwickelte dazu mit *Transphorm*-GaN-HEMTs eine Lösung, die mit 50 kHz Taktfrequenz und einer Reduzierung von Größe und Verlusten

um 40 % gegenüber herkömmlichen Ausführungen punktete.

Die Musterbaugruppe TD-PV1000E0C1 von *Transphorm* – wie alle anderen Bauteile des Herstellers bei *Hy-Line Power Components* erhältlich – ermöglicht Entwicklern die Bewertung einer derartigen Lösung in Photovoltaik-Wechselrichtern oder USV-Anlagen. Sie enthält vier als Vollbrücke konfigurierte GaN-HEMTs, die mit 100 kHz oder noch höherer Taktfrequenz schalten können, um aus 400 V Gleichspannung 100 V bis 240 V Wechselspannung zu erzeugen. 1000 W Ausgangsleistung sind mit Konvektionskühlung erreichbar, mit zusätzlicher Lüftung sind es 1500 W.

Ebenfalls interessant ist die Baugruppe vom Typ TDPS250E2D2. Hier wurde eine Stromversorgung mit Universal-Wechselstromeingang (100 V bis 240 V ohne Um-

schalten) für einen typischen *All-in-One-Computer* mit 250 W, also eine eher preisensitive Anwendung für den Endkundenmarkt, von Standardbauelementen auf Silizium-Halbleiterbasis auf GaN-Bauelemente umgestellt. Die Baugruppe enthält drei GaN-HEMTs in der PFC-Schaltung und den resonanten Brückenkreisen. In Letzteren ermöglicht die niedrige Ausgangskapazität der GaN-HEMTs eine schnellere Umladung und damit 200 kHz Taktfrequenz bei signifikant verringerten Verlusten.

Tatsächlich reduzieren sich die Abmessungen um 45 % (Bild 6) und die Verluste um 30 %, was wiederum einen Wirkungsgrad von über 95 % ermöglichte.

Das Netzteil kann bei 12 V Ausgangsspannung bis zu 20 A liefern, wobei am 230-V-Netz bis zu 95,4 % Wirkungsgrad erreicht werden.

dl2mcd@gmx.net

Literatur

- [1] Wikipedia: Liste der Nobelpreisträger für Physik. https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik
- [2] Hy-Line Power Components Vertriebs GmbH: www.hy-line.de/transphorm