



*MAX-Phasen sind atomar geschichtete, ultrastabile Carbido- oder Nitrid-Verbindungen. Sie sind elektrische Leiter, manche Zusammensetzungen sind selbstheilend, andere magnetisch oder supraleitend. Wie lassen sich diese neuartigen Materialien für die Energieumwandlung und Sensorik nutzen?*

# Natürlich atomar geschichtet

MAX-Phasen sind ultrastabile Materialien mit einstellbaren Funktionen

Von Ulf Wiedwald

Materialien mit speziell eingestellten Eigenschaften spielen in unserem täglichen Leben eine wichtige Rolle, obwohl wir uns dessen oft gar nicht bewusst sind. Die Funktionen sind sehr vielfältig, jeder Mensch hat sie, und reichen zum Beispiel von leichten, kratzfesten und selbstreinigen Brillengläsern bis zu den energiespeichernden Akkumulatoren, die das Mobiltelefon oder das Elektroauto mit Strom versorgen. Wir als Forschende suchen ständig nach neuen Materialien mit einzigartigen Eigenschaften, die das Potenzial haben, uns das Leben zu vereinfachen, günstiger sind oder – heute wichtiger denn je – nachhaltig hergestellt werden können.

Eine relativ neue Klasse von Materialien, die so genannten MAX-Phasen, hat in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit unter den Forschenden auf sich gezogen. Die atomar geschichteten Materialien sind hochstabile Keramiken, aber meist auch gleichzeitig Metalle. Diese ungewöhnliche Kombination der Eigenschaften macht sie insbesondere für den Einsatz unter extremen Bedingungen wie hohen Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius oder in chemisch aggressiven Umgebungen, zum Beispiel in einem Säurebad, interessant. Die reaktions-trägen MAX-Phasen können auch als Beschichtungen zum Oxidationsschutz eingesetzt werden, während ihre metallischen Eigenschaften, wie gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, zusätzlichen Nutzen versprechen. Diese einzigartige Kombination eröffnet Anwendungen in verschiedensten Gebieten:

- als Beschichtungen zum Oxidationsschutz
- zum Einsatz in Brennstoffzellen oder Lithium-Ionen-Batterien
- als Katalysatoren
- als elektrische Zuleitungen in elektronischen Anwendungen bei hohen Temperaturen
- als Wärmeleiter und Kühlkörper
- als magnetische Sensorschichten
- als Ausgangsmaterial zur Herstellung von 2D-Materialien.

Diese antizipierten Anwendungen sind jedoch noch in einem frühen Stadium der Erforschung und Entwicklung, und weitere Untersuchungen werden zeigen wie das volle Potenzial der faszinierenden MAX-Phasen auszuschöpfen ist.

### Was sind MAX-Phasen?

MAX-Phasen sind hexagonale Verbindungen und bestehen aus mindestens drei Elementen. Die Bezeichnung „MAX“ ist eine Abkürzung, die sich aus der chemischen Formel  $M_{n+1}AX_n$  ergibt (Abb. 1). M bezeichnet ein frühes Übergangsmetall (Rechteck), A ein Hauptgruppenelement (Kreis) und X steht für Bor, Kohlenstoff oder Stickstoff (Dreieck). Die einfachste strukturelle Ordnung ergibt sich für  $n = 1$ , die sogenannte 211-MAX-Phase, die aus zwei M-Lagen, einer A-Lage und einer X-Lage besteht. Je nach Anzahl der Schichten entlang der hexagonalen c-Achse, die zwischen den A-Schichten liegen, werden sie als 211-, 312-, oder 413-MAX-Phasen bezeichnet [1].

Sie weisen kovalente (starke M-X-Bindungen), ionische (relativ schwache M-A-Bindungen) und metallische Bindungen auf. Dabei wird die elektronische Zustandsdichte, die die elektrischen, optischen und magnetischen Eigenschaften bestimmt, von den d-Orbitalen der M-Atome in diesen Metallen dominiert. Die unterschiedlichen Bindungstypen, vereint in einem Material, sind der Grund für das gleichzeitige Auftreten der oben genannten Eigenschaften und eine allgemein starke Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) der physikalischen Eigenschaften.

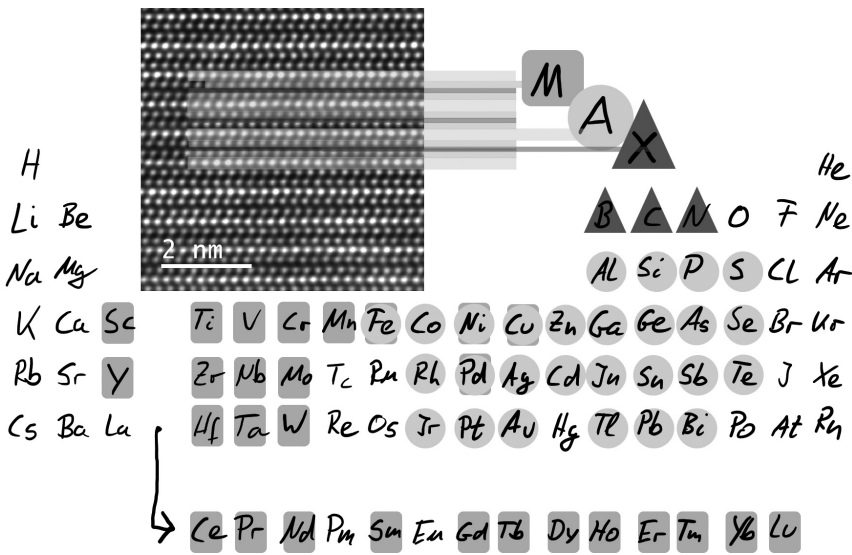
Die Materialklasse der MAX-Phasen umfasst heute mehr als 342 verschiedene Verbindungen [1]. Die erste erfolgreiche Synthese gelang Kudielka und Rhode in den 1960er Jahren mit den Verbindungen  $Ti_2SC$  (Ti: Titan, S: Schwefel, C: Kohlenstoff) und  $Zr_2SC$  (Zr: Zirkonium), während kurz danach Nowotny

und Jeitschko eine ganze Reihe dieser hexagonalen Verbindungen als „H-Phasen“ klassifiziert haben. Das wissenschaftliche Interesse an diesen Verbindungen war jedoch in den folgenden Jahrzehnten, abgesehen von ihrer Synthese und Struktur, eher gering.

Dies änderte sich 1996, als Michel Barsoum und sein Team verschiedene physikalische Eigenschaften von  $Ti_3SiC_2$  (Si: Silizium) untersuchten. Es zeigte sich, dass  $Ti_3SiC_2$  ein besserer elektrischer und thermischer Leiter ist als metallisches Ti oder TiC. Das Material war relativ spröde, aber trotzdem leicht maschinell bearbeitbar. Das Elastizitätsmodul liegt mit 320 GPa (Gigapascal) zwischen den Materialklassen der duktilen Metalle und der spröden Keramiken. Die MAX-Phase  $Ti_3SiC_2$  war oxidationsbeständig und konnte thermisches Abschrecken von 1400 °C auf Umgebungstemperatur schadlos überstehen. Zusammenfassend kann man sagen, dass nicht eine physikalische Eigenschaft die MAX-Phasen zu einer besonderen Materialklasse macht, sondern die ungewöhnliche Kombination der mechanischen, thermischen, elektrischen (und magnetischen) Eigenschaften.

Nach der Entdeckung der ersten magnetischen MAX-Phase ( $Cr_{0.75}Mn_{0.25}GeC$  (Cr: Chrom, Mn: Mangan, Ge: Germanium) im Jahr 2013 und folgenden Arbeiten haben wir  $Mn_2GaC$  als die erste magnetische MAX-Phase mit hoher Ordnungstemperatur (> 200 °C) im Jahr 2018 identifiziert [2]. Werden in der MAX-Phase  $Mo_2AlC$  (Mo: Molybdän, Al: Aluminium) ein Drittel der Mo-Atome durch eine seltene Erde ersetzt, so erhält man MAX-Phasen mit elementreinen, atomaren Reihen in den M-Lagen. Diese doppelt geordneten Materialien mit seltenen Erden zeigen bei tiefen Temperaturen unter -240 °C magnetische Ordnung [3].



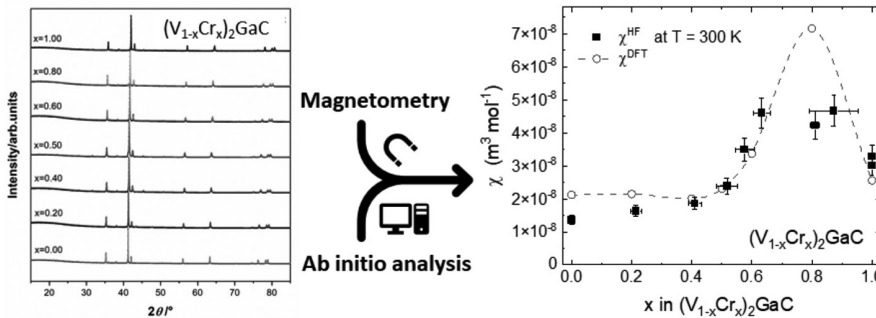


(1) Periodensystem der Elemente mit Symbolkodierung der MAX-Phasen bildenden Elemente M (Rechteck), A (Kreis) und X (Dreieck). Die Dunkelfeldaufnahme aus dem Transmissionselektronenmikroskop zeigt die atomar-geschichtete Struktur der Elemente in der so genannten 211-MAX-Phase Cr<sub>2</sub>GaC (Cr: Chrom, Ga: Gallium, C: Kohlenstoff). Der Kontrast entsteht dabei durch Streuung an Atomen mit stark unterschiedlicher Elektronenzahl.  
Quelle: eigene Darstellung

**Magnetische MAX-Phasen**

Im Sonderforschungsbereich/Transregio (SFB/TRR) 270 HoMMage interessieren uns magnetische Materialien für die Energiewende, insbesondere Permanentmagnete und magnetokalorische Materialien. Mit letzteren lassen sich zum Beispiel Kühlschränke und Klimaanlage ohne klimaschädliche Kühlmittel betreiben. Im Bezug auf neuartige magnetische MAX-Phasen haben wir es uns im SFB/TRR 270 zum Ziel gesetzt, durch die Wahl der M- und A-Schichten, die Magnetisierung und die Ordnungstemperatur einzustellen, um so systematisierte Regeln für das Auftreten ihrer magnetokalorischen, magnetostriktiven und magnetoresistiven Eigenschaften zu erhalten.

Die weitaus meisten MAX-Phasen wurden bisher mit den Elementen Ti (Titan), V (Vanadium), und Cr (Chrom) als M-Lagen präpariert. Viele davon sind sogenannte Pauli-Paramagnete, was bedeutet, dass ihre Antwort auf ein äußeres Magnetfeld durch die Elektronen dominiert wird, die für die metallische Bindung verantwortlich sind. Vor kurzem haben wir in Kooperation im SFB/TRR 270 das Mischsystem (V<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>)<sub>2</sub>GaC mit 0 < x < 1 mittels unkonventionellem Mikrowellenheizen phasenrein hergestellt und genauer untersucht [4]. Es zeigte sich eine starke Abhängigkeit der magnetischen Antwort (Suszeptibilität  $\chi$ ) in einem Magnetfeld von der Zusammensetzung. Die magnetischen Messungen ergaben, dass alle Proben zwar Pauli-Paramagnete sind, die erhaltenen Suszeptibilitäten jedoch nicht-linear um bis zu 400 Prozent mit einem Maximum bei x = 0,8 variieren. Rechnungen mittels Dichtefunktionaltheorie unter Berücksichtigung der sogenannten Stoner-Theorie bestätigten die experimentellen Daten und identifizieren das (V<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>)<sub>2</sub>GaC-System als einen prototypischen Band-Paramagneten, der nahezu magnetisch geordnet ist (Abb. 2).



(2) Die Röntgendiffraktometrie zur Strukturbestimmung (links) zeigt, dass das MAX-Phasen-Mischsystem (V<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>)<sub>2</sub>GaC mit 0 < x < 1 phasenrein herstellbar ist. In der Messung der magnetischen Antwort auf ein angelegtes Magnetfeld (Suszeptibilität  $\chi$ ) und durch Simulationen mittels Dichtefunktionaltheorie zeigt sich bei x = 0,8 ein stark erhöhter Wert, der fast zu langreichweitiger magnetischen Ordnung führt [4].  
Quelle: doi:10.1021/acs.chemmater.3c00591

Insgesamt bieten diese Ergebnisse einen notwendigen Ausgangspunkt für die anspruchsvolle Synthese neuer MAX-Phasen mit langreichweitiger magnetischer Ordnung. Durch Beimischung weiterer Elemente, die das sogenannte Austauschintegral zwischen Metallelektronen vergrößern oder die Anzahl der Metallelektronen erhöhen, werden dabei helfen, die magnetische Ordnung zu stabilisieren.

Da die frühen Übergangsmetalle Ti, V und Cr, die die M-Lagen in den meisten MAX-Phasen bilden, in Verbindungen nicht zu magnetischer Ordnung neigen, ist eine erfolgreiche Strategie, die M-Lagen teilweise mit den magnetischen Elementen Mn (Mangan) oder Fe (Eisen) anzureichern. Solch eine Feinabstimmung durch Dotierung mit Fe haben wir in dünnen Schichten umgesetzt, was

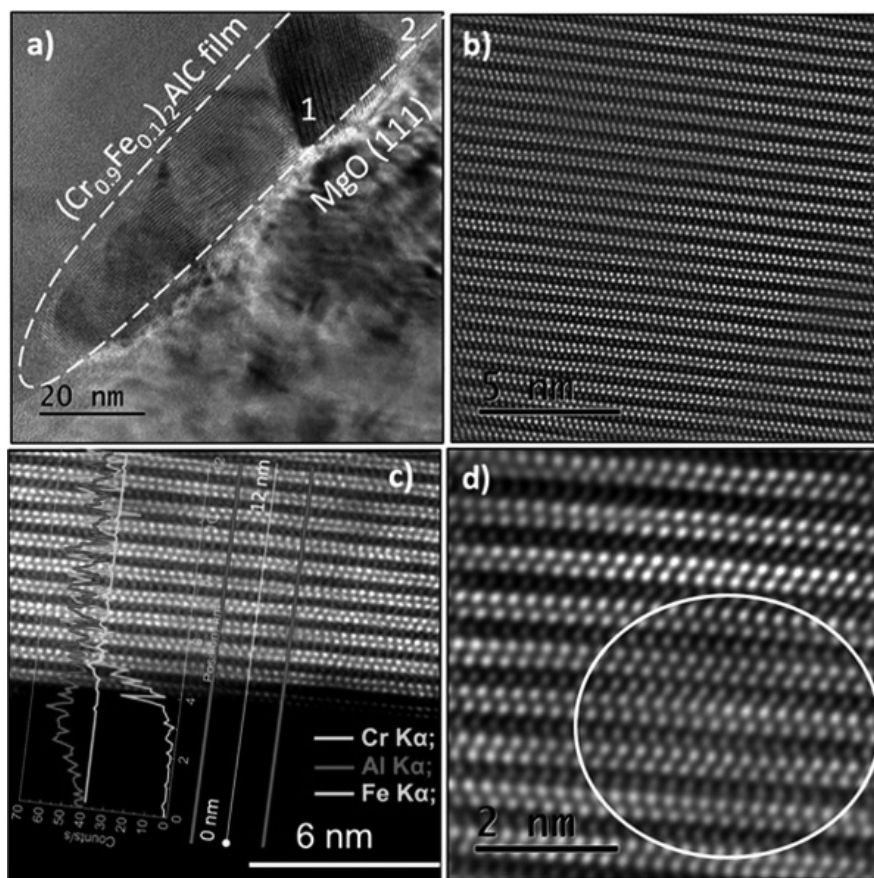
mehrere Vorteile mit sich bringt im Vergleich zu den sonst typischen Pulverproben oder gesinterten Volumenmaterialien. Letztere sind in der Regel polykristallin und weisen zumindest Spuren von Sekundärphasen auf. Beides wirkt sich oft stark auf die elektrischen und magnetischen Eigenschaften aus und behindert so eine fundierte Interpretation der Daten. Im Gegensatz dazu sind epitaktische einphasige Dünnschichten ideale Modellsysteme, um die intrinsischen Eigenschaften von MAX-Phasen und ihre Richtungsabhängigkeit zu untersuchen.

### Epitaktische Schichten mit gepulster Laserablation

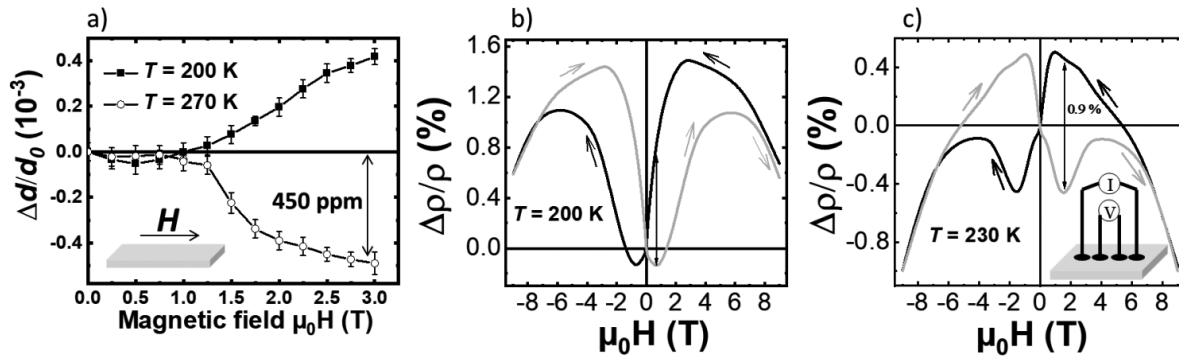
Für das Wachstum solcher epitaktischen MAX-Phasen-Dünnschichten nutzen wir die gepulste Laserab-

lation (Pulsed Laser Deposition, PLD) unter Ultrahochvakuum (UHV). Dabei wird ein gepulster KrF-Laser (Kr: Krypton, F: Fluor), der ultraviolette Licht mit hoher Leistungsdichte liefert, auf rotierende Element- oder Legierungsmaterialscheiben (Targets) fokussiert. Dies führt zum schnellen Erhitzen der Metalloberflächen und zur Ausbildung eines Plasmas. Die aus dem Target ins Vakuum überführten Atome werden dann auf einem Substrat aufgefangen, dessen Temperatur vorher eingestellt wurde (typisch 400–800 °C). So entsteht mit der Zeit eine MAX-Phasen-Schicht, dessen Zusammensetzung durch häufigen Wechsel zwischen verschiedenen Targets eingestellt wird, während die Depositionszeit die Schichtdicke bestimmt. Weiterhin kann durch die eingesetzten Elementtargets die Zusammensetzung, auch bei geringen Dotierungen, genau eingestellt werden, weil pro Laserpuls nur etwa 1 Prozent einer atomaren Lage deponiert werden. Die PLD ist ein bewährtes Verfahren zur Herstellung von epitaktischen Schichten und ermöglicht auch die Herstellung metastabiler Phasen.

Konkret haben wir erstmalig die PLD eingesetzt, um epitaktische und phasenreine  $\text{Cr}_2\text{AlC}$ -MAX-Phasen-Dünnschichten (10–50 nm) auf MgO in (111)-Orientierung und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in (001)-Orientierung herzustellen [5] und in einer zweiten Studie diese mit Fe zu dotieren [6]. Dabei stellte sich heraus, dass zumindest bei geringem Fe-Anteil unter nominell 10 Prozent in den M-Lagen die Phasenreinheit erhalten bleibt. Abbildung (3) zeigt Querschnittsaufnahmen einer  $(\text{Cr}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})_2\text{AlC}$ -MAX-Phase auf MgO-Substrat in (111)-Orientierung mittels Transmissionselektronenmikroskopie. Ein typisches Hellfeldbild ist in Abbildung (3a) dargestellt. Das säulenförmige Wachstum entlang der c-Achse ist deutlich zu erkennen, wobei die Höhe der Körner in etwa der Schichtdicke entspricht.



(3) a) Hochauflösendes Hellfeldbild aus der Transmissionselektronenmikroskopie einer  $(\text{Cr}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})_2\text{AlC}$ -MAX-Phase auf MgO-Substrat in (111)-Orientierung. b), c), d), zeigen Dunkelfeld-Raster-TEM-Bilder verschiedener Vergrößerungen mit Elementverteilung mittels Röntgenemissionsanalyse in c) [6].



(4) a) Feldabhängigkeit der Magnetostruktion, gemessen bei -73 °C (200 K, Quadrate) und -3 °C (270 K, Kreise) der Mn<sub>2</sub>GaC-MAX-Phase. Das Feld liegt parallel zur Probenebene an. (c) und (d) zeigen den Magnetowiderstand in Bezug auf den Nullfeldwert ρ<sub>0</sub>, gemessen in Vier-Punkt-Geometrie. Die Pfeile zeigen die Richtung der Feldänderung an. [2].  
 Quelle: doi:10.1038/s41598-018-20903-2

Die Dunkelfeld Raster-TEM-Bilder in Abbildung (3b,c) zeigen eindrucksvoll die typische MAX-Phasen-Schichtstruktur mit abwechselnd dunklem Kontrast (Al-Atome) und doppellagige Reihen mit hellem Kontrast (Cr-Atome), während die C-Atome zwischen den Cr-Lagen aufgrund des geringeren Kontrasts leichter Elemente hier unsichtbar sind. Durch Röntgenemissionsanalyse entlang der Linie in Abbildung (3c) lässt sich auf atomarer Skala die MAX-Phasen-Schichtstruktur anhand der Elementverteilungen nachvollziehen. Wie erwartet, erscheinen die Fe-Spektralintensitäten überwiegend zusammen mit Cr, was auf die Einlagerung von Fe in den M-Lagen der Cr<sub>2</sub>AlC-MAX-Phase hinweist.

Innerhalb der geschichteten MAX-Phasen lassen sich aber auch Domänen mit unterschiedlicher Stapelfolge (Abb. 3d, weißer Kreis) identifizieren, die vom typischen Zickzack-Muster der M-Lagen im Querschnitt abweichen. Ein solches Muster wurde für (Cr,Mn)<sub>2</sub>AlC-Dünnschichten schon zuvor beobachtet und durch die Koexistenz von (Cr<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>)<sub>5</sub>Al<sub>8</sub>-Kristalliten innerhalb der MAX-Phase erklärt. Es gibt hier also die Konkurrenz zweier strukturell unterschiedlicher Phasen, die nicht gewünscht

ist. Wir konnten maximal bis zu 8 Atom-% Fe in die M-Lagen der Cr<sub>2</sub>AlC-MAX-Phase einlagern, was der bisher dahin höchste erreichte Dotierungsgrad war. Trotz des erfolgreichen Einbringens von Eisen in die MAX-Phase haben wir in unserer Studie keine magnetische Ordnung beobachtet. Der spezifische elektrische Widerstand zeigte hingegen den erwarteten Verlauf für Metalle, was das Potenzial der MAX-Phasen als leitfähige, oxidationsbeständige Beschichtungen aufzeigt.

**Magnetostruktion und Magnetowiderstand**

Eine mögliche Anwendung von MAX-Phasen sind ultrastabile Indikatorschichten. Dazu lässt sich der elektrische Widerstand der metallischen Schicht recht einfach messen. Ein interessantes System ist die MAX-Phase Mn<sub>2</sub>GaC. Diese zeigt die bis dato höchste magnetische Ordnungstemperatur von über 200 °C und durchläuft als Funktion der Temperatur verschiedene magnetische Ordnungszustände [2]. Bei Temperaturen von circa -60 °C gibt es einen Phasenübergang, der durch einen signifikanten Anstieg des hexagonalen c-Achsen-Gitterparameters (0,1 %) mit steigender Temperatur

gekennzeichnet ist. Dabei stabilisiert sich unterhalb dieses Übergangs eine komplizierte Spiralstruktur der atomaren magnetischen Momente mit einer Periode von 18 nm senkrecht zur Filmebene [7]. Bei höheren Temperaturen ist Mn<sub>2</sub>GaC ein Antiferromagnet, was bedeutet, dass nah benachbarte magnetische Momente antiparallel orientiert sind und sich von außen betrachtet (gemessen) gegenseitig aufheben.

Wird zusätzlich ein Magnetfeld angelegt, beobachten wir eine sehr starke Magnetostruktion mit einer relativen Längenänderung von 450 ppm (parts per million) [2]. Magnetostruktion beschreibt die Änderung der Atomabstände in einem Magnetfeld. Interessanterweise wechselt sie das Vorzeichen zwischen +450 ppm bei -73 °C und -500 ppm bei -3 °C in einer magnetischen Induktion von 3 T (Abb. 4a). Dies ist die Folge der energetisch günstigen Spiralstruktur bei tieferen Temperaturen, die durch ein angelegtes Feld verändert werden kann. Der Vorzeichenwechsel des Magnetostruktionskoeffizienten beim Phasenübergang ist dabei eine grundlegend neue Eigenschaft, die durch konkurrierende antiferromagnetische und ferromagnetische Austauschwechselwirkungen zwischen den magnetischen Atomschichten im Mn<sub>2</sub>GaC getrieben wird.



Dieser Effekt bedeutet nun, dass es sowohl von der Feld- als auch von der Temperaturhistorie der Schichten abhängt, welcher magnetische Zustand sich einstellt. Auf diese Weise kann die  $Mn_2GaC$ -MAX-Phase als Indikatorschicht dienen und durch Messung des elektrischen Widerstands ausgelesen werden. Die Vorzeichenumkehr am Übergang verschiedener magnetischer Ordnungszustände spiegelt sich nämlich auch im Magnetowiderstand wider, der in Abbildung (4b,c) für zwei Temperaturen dargestellt ist. Die Änderung des Widerstands, abhängig von der Feldhistorie, ist dabei mit etwa einem Prozent und mit dem Vorzeichenwechsel bei  $-73\text{ }^\circ\text{C}$  ein hoher, leicht auszulesender Wert, während bei höheren Temperaturen um Raumtemperaturen nur viel geringe Änderungen als Funktion der Feldhistorie auftreten. Solch ein Einfluss der magnetischen Ordnung auf die elektronische Struktur hat das Potenzial, neue Funktionalitäten für spintronische, multiferroische, magnetoelektrische und magnetokalorische Anwendungen zu ermöglichen.

### Ausblick auf magnetische MXene

MAX-Phasen können auch als Ausgangsmaterialien für die Synthese von 2D-Materialien verwendet werden. Dabei werden die A-Lagen aus der MAX-Phase meist chemisch herausgelöst. Der Name „MXene“ ergibt sich dabei aus der fehlenden A-Lage und in Anlehnung an das intensiv erforschte 2D-Material Graphen, bestehend aus Kohlenstoff. MXene wurden erstmals 2011, aus der MAX-Phase  $Ti_3AlC_2$ , durch chemisches Ätzen in Flusssäure hergestellt. So erhielten Naguib, Gogotsi, und Barsom erstmalig das MXene  $Ti_3C_2T_x$  [8]. Hierbei bezeichnet  $T_x$  so genannte Terminationsgruppen. Diese bestehen meist aus einer Mischung von  $=O$ ,  $-OH$ ,  $-F$ , oder  $-Cl$  (O: Sauerstoff, H: Wasserstoff, Cl: Chlor), je nach eingesetzter Säure. Nach Reinigungsschritten und

weiterer chemischer Prozessierung können dann Einzellagen oder Multilagen dieser 2D-MXene präpariert werden, die in Wasser stabil sind oder nach dem Trocknen freistehende Filme bilden können.

Durch die Wahl der Ausgangsphase und der Ätzbedingungen wurden so eine große Zahl verschiedener MXene präpariert. Wegen dieser großen Flexibilität und Abstimmbarkeit werden vielfältige Anwendungen diskutiert und wissenschaftlich untersucht. MXene sind der am schnellsten wachsende Bereich unter den 2D-Materialien. Insbesondere Energiespeicherung in Batterien, elektromagnetische Abschirmung und Sensoren sind sehr aktive Gebiete in der MXene-Forschung, die zum Großteil in der Chemie und Materialwissenschaft durchgeführt wird [9,10]. Kooperative Phänomene in Festkörpern wie Supraleitung oder Magnetismus wurden beobachtet, sind aber überhaupt nicht im Detail verstanden. Dies wird eine spannende Aufgabe der physikalischen Forschung in der nächsten Dekade sein.

Auf dem Gebiet der 2D-Materialien beschäftigen wir uns mit der Präparation und Charakterisierung magnetischer MXene. Da – wie oben diskutiert – Fe, Co, oder Ni nicht oder nur schwierig in das Ausgangsmaterial, die MAX-Phasen, integriert werden können, nutzen wir einen anderen Weg. Als Alternative zur Einstellung ferromagnetischer Eigenschaften von 2D-MXenen untersuchen wir, inwiefern Fe in mehrschichtige MXene-Strukturen im (UHV) bei variablen Temperaturen interkaliert werden kann. Dazu werden die MXene mit verschiedenen funktionellen Oberflächengruppen ( $-F$ ,  $-OH$ ,  $=O$ ,  $-Cl$ ,  $-Br$ ) hergestellt, die im UHV teilweise thermisch desorbiert werden können. Kontrolliert man diesen Prozess, erhalten wir partiell unfunktionalisierte MXene. In diese lässt sich Fe durch Aufdampfen im UHV bei geeigneter Temperatur leicht interkalieren, was wir mittels sogenannter in

situ-Auger-Elektronen-Spektroskopie elementspezifisch erfassen. Eine solche Funktionalisierung durch Interkalation könnte die Herstellung von MXenen mit neuartigen magnetischen 2D-Eigenschaften ermöglichen. Die umfassende Untersuchung der Struktur-Magnetismus-Beziehung von Fe-interkalierten MXenen ist der Schwerpunkt eines Gemeinschaftsprojekts mit Partnereinrichtungen in Grenoble, Frankreich.

### Fazit

MAX-Phasen sind natürlich atomar geschichtete Festkörper mit stark unterschiedlichen Bindungen in und zwischen den einzelnen M-, A-, und X-Lagen. Dies führt zur Richtungsabhängigkeit der mechanischen, optischen, elektronischen und magnetischen Antwort. Sie vereinen die Eigenschaften von Keramiken und Metallen in einem Material und haben so durch diese vielversprechende Kombination großes Potential für eine breite Palette von Anwendungen, von der Elektrochemie bis hin zu magnetischen Materialien. Besonders relevant, insbesondere im Vergleich zu anderen Metallen, ist ihre Oxidationsbeständigkeit. Die aktive Forschung in diesem Bereich wird in den nächsten Jahren viele neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewinnen, woraus sich sicher weitere mögliche Anwendungen ergeben. Die magnetischen Eigenschaften der MAX-Phasen variieren je nach der Art der magnetischen Elemente und ihrer Konzentration, wobei die meisten sogenannte Pauli-Paramagnete sind. Durch die teilweise Substitution mit magnetischen Elementen lassen sich Materialien mit langreichweitiger magnetischer Ordnung herstellen, ohne die anderen Funktionalitäten zu verlieren. MAX-Phasen sind auch das Ausgangsmaterial für 2D-MXene. Durch chemisches Ätzen der A-Lagen entstehen wenige atomare Lagen dicke Blättchen. Sie zeichnen sich durch ihre hohe Leitfähigkeit, exzellente mechanische Festigkeit und

vielseitige Anwendbarkeit in Bereichen wie Energiewandlung, Elektronik und Sensorik aus.

## Summary

MAX phases are naturally atomically layered solids with very different bonds in and between the individual M, A and X layers. This leads to directional dependence of their mechanical, optical, electronic and magnetic properties. They combine the properties of ceramics and metals in one material and thus have great potential for a wide range of applications, from electrochemistry to magnetic materials. Their resistance to oxidation is particularly important, especially in comparison to other metals. Active research in this area will provide many new scientific insights in the coming years, which will certainly give rise to further applications. The magnetic properties of the MAX phases vary depending on the type of magnetic elements contained in them and their concentration, with most of them being so-called Pauli paramagnets. Through partial substitution of elements, materials with long-range magnetic order can be produced without losing other functionalities. MAX phases are also the starting material for 2D MXenes. Chemical etching of the A layers results in thin sheets with a thickness of a few atomic layers. They are characterized by their high conductivity, excellent mechanical strength and versatile applicability in areas such as energy conversion, electronics and sensor technology.

## Danksagung

Der Autor dankt Michael Farle, Merve Felek, Alexander Jemiola, Iuliia Novoselova, Hanna Pazniak, Ruslan Salikhov, Tim Salzmann, Anna Semisalova, Marina Spasova, Marc Stevens, Ivan Tarasov, Dieter Weller und

Benjamin Zingsem an der Universität Duisburg-Essen und Michel Barsoum, Christina Birkel, Daniel Bürgler, Martin Dahlqvist, Ewa Jedryka, Niels Kubitzka, Thierry Ouisse, Johanna Rosen, Quanzheng Tao, Marek Wójcik und Hongbin Zhang in Darmstadt, Grenoble, Jülich, Linköping, Philadelphia und Warschau für die langjährige Zusammenarbeit zu dem faszinierenden Thema dieses Artikels, den MAX-Phasen. Die Ergebnisse konnten nur erzielt werden durch die Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Projektnummern 319409675, 405553726 und 530103526).

## Anmerkungen/Literatur

- 1) Martin Dahlqvist, Michel W. Barsoum, Johanna Rosen MAX phases – Past, present, and future *Materials Today*, in press. doi:10.1016/j.mattod.2023.11.010
- 2) Iuliia Novoselova, A. Petruhins, Ulf Wiedwald, A. S. Ingason, T. Hase, F. Magnus, V. Kapaklis, J. Palisaitis, M. Spasova, M. Farle, J. Rosen, and R. Salikhov, Large uniaxial magnetostriction with sign inversion at the first order phase transition in the nanolaminated Mn<sub>2</sub>GaC MAX phase, *Scientific Reports* 8, 2637 (2018). doi:10.1038/s41598-018-20903-2
- 3) Quanzheng Tao, Jun Lu, Martin Dahlqvist, Aurelija Mockute, Stuart Calder, Andrejs Petruhins, Rahele Meshkian, Oleg Rivin, Daniel Potashnikov, Elad Caspi, Hagai Shaked, Andreas Hoser, Christine Opagiste, Rose-Marie Galera, Ruslan Salikhov, Ulf Wiedwald, Clemens Ritter, Andrew R. Wildes, Börje Johansson, Lars Hultman, Michael Farle, Michel W. Barsoum, and Johanna Rosen, Atomically Layered and Ordered Rare-Earth i-MAX Phases: A New Class of Magnetic Quaternary Compounds, *Chemistry of Materials* 31, 2476–2485 (2019). doi: 10.1021/acs.chemmater.8b05298
- 4) Niels Kubitzka, Ruiwen Xie, Ivan Tarasov, Chen Shen, Hongbin Zhang, Ulf Wiedwald, Christina S. Birkel Microwave-assisted synthesis of the new solid-solution (V<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>)<sub>2</sub>GaC (0 < x < 1), a Pauli paramagnet almost matching the Stoner criterion for x = 0.80, *Chemistry of Materials* (2023). doi: 10.1021/acs.chemmater.3c00591
- 5) Marc Stevens, Hanna Pazniak, Alexander Jemiola, Merve Felek, Michael Farle, and Ulf Wiedwald, Pulsed laser deposition of epitaxial Cr<sub>2</sub>AlC MAX phase thin films on MgO(111) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001), *Materials Research Letters* 9, 343–349 (2021). doi: 10.1080/21663831.2021.1920510
- 6) Hanna Pazniak, Marc Stevens, Martin Dahlqvist, Benjamin Zingsem, Lidia Kibkalo, Merve Felek, Sergey Varnakov, Michael Farle, Johanna Rosen, and Ulf Wiedwald, Phase Stability of Nanolaminated Epitaxial (Cr<sub>1-x</sub>Fex)<sub>2</sub>AlC MAX Phase Thin Films on MgO(111) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) for Use as Conductive Coatings, *ACS Applied Nano Materials* 4, 13761–13770 (2021). doi:10.1021/acsnm.1c03166
- 7) J. Dey, E. Jedryka, R. Kalvig, U. Wiedwald, M. Farle, J. Rosen, and M. Wojcik, Helical magnetic structure of epitaxial films of na-

anolaminated Mn<sub>2</sub>GaC MAX phase, *Physical Review B* 108, 054413 (2023) doi: 10.1103/PhysRevB.108.054413

8) M. Naguib, M. Kurtoglu, V. Presser, J. Lu, J. Niu, M. Heon, L. Hultman, Y. Gogotsi, M. W. Barsoum, Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, *Adv. Mater.* 2011, 23, 4248–4253.

9) Niels Kubitzka, Carina Büchner, Jordan Sinclair, Rose M. Snyder, Christina S. Birkel, Extending the Chemistry of Layered Solids and Nanosheets: Chemistry and Structure of MAX Phases, MAB Phases and MXenes, *ChemPlusChem* 88, e202300214 (2023). doi: 10.1002/cplu.202300214

10) Hanna Pazniak, Alexey S. Varezchnikov, Dmitry A. Kolosov, Ilya A. Plugin, Alessia Di Vito, Olga E. Glukhova, Polina M. Sheverdyaeva, Marina Spasova, Igor Kaikov, Evgeny A. Kolesnikov, Paolo Moras, Alexey M. Bainyashchev, Maksim A. Solomatin, Ilia Kiselev, Ulf Wiedwald, Victor V. Sysoev, Two-Dimensional Molybdenum Carbide MXenes for Enhanced Selective Detection of Humidity in Air, *Advanced Materials* 33, 2104878 (2021). doi 10.1002/adma.202104878.

## Der Autor

Ulf Wiedwald studierte Physik an der Technischen Universität Braunschweig und erhielt 2001 sein Diplom. Mit experimentellen Arbeiten zur Struktur und zum Magnetismus von Kobalt-Nanopartikeln und Kern-Hülle-Nanopartikeln forschte er in Braunschweig und an der Universität Duisburg-Essen (UDE), wo er 2004 seine Promotion abschloss. Anschließend wechselte Ulf Wiedwald an die Universität Ulm und setzte seine Forschungen zum Magnetismus von Nanopartikeln und dünnen Schichten und deren Wechselwirkung mit periodischen Nanostrukturen fort. Er habilitierte sich dort 2011 für Experimentelle Physik. Seit seiner Rückkehr an die Fakultät für Physik der UDE 2013 beschäftigt er sich mit biomedizinischen Anwendungen von magnetischen Nanopartikeln und multifunktionalen Hybridstrukturen und seit 2015 mit MAX-Phasen und MXenen. 2018 hatte er eine Gastprofessur an der National University of Science and Technology MISiS in Moskau inne. 2021 wurde Ulf Wiedwald zum außerplanmäßigen Professor an der UDE ernannt. Er leitete verschiedene Projekte, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und die Baden-Württemberg Stiftung gefördert wurden, wie beispielsweise im Sonderforschungsbereich SFB 569 „Hierarchische Strukturbildung und Funktion Organisch-Anorganischer Nanosysteme“ an der Schnittstelle zwischen Physik und Chemie. Aktuell ist er Projektleiter im SFB/TRR 270 „Hysteresedesign magnetischer Materialien für effiziente Energiewandlung“ und untersucht, inwiefern sich MAX-Phasen, MAB-Phasen und Antiperovskite für den Einsatz in Permanentmagnetsystemen oder zur magnetischen Kühlung eignen.



# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub

universitäts  
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/81851

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20240417-073534-4

Erschienen in: UNIKATE 60 (2024), S. 48-55

Alle Rechte vorbehalten.