

IEA Kooperationsprogramm für fortgeschrittene Materialien für Transportanwendungen (AMT) Task 12: Neuartige 2D Werkstoffe und laserbasierte Oberflächen- verfahren zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Mobilitätsanwendungen

Arbeitsperiode 2023 - 2025

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 56/2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung (interimistisch): DI (FH) Isabella Warisch

Kontakt zu „IEA Forschungskooperation“: Mag.^a Sabine Mitter

Autorinnen und Autoren:

Prof. Dr. Carsten Gachot, TU Wien

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Wien, 2026. Stand: Juni 2025

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
iii3@bmimi.gv.at.

Disclaimer:

Dieser Ergebnisbericht wurde von der Fördernehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die Fördernehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die Fördernehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die Fördernehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts im Rahmen der IEA Forschungsk Kooperation. Es wurde vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) initiiert, um österreichische Forschungsbeiträge zu den Kooperationsprojekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu unterstützen.

Die IEA Forschungsk Kooperationen umfassen eine breite Palette an Energiethemen mit dem Ziel Energiesysteme, Städte, Mobilitäts- und Industriesysteme fit für eine nachhaltige Zukunft bis 2050 zu machen. Auch Themen wie Gendergerechtigkeit oder Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsaspekte werden berücksichtigt.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch die vielen IEA-Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und neue internationale Standards. Auch in der Marktumsetzung konnten richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher werden alle Berichte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht.

Inhalt

1 Kurzfassung.....	6
2 Abstract	7
3 Ausgangslage.....	8
4 Projektinhalt	14
5 Ergebnisse	16
6 Vernetzung und Ergebnistransfer	19
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....	21
Abbildungsverzeichnis	22
Literaturverzeichnis	23

1 Kurzfassung

Die Schmierung von Maschinenelementen zur Gewährleistung der Einsatzfähigkeit von Anlagen und damit der Vermeidung von Wartungskosten ist auch im Zeitalter der Digitalisierung und der E-Mobilität ein zentrales und hoch relevantes Thema weltweit. Nach Schätzungen von Holmberg und Erdemir sind ca. 23 % des gesamten weltweiten Energieverbrauchs auf Reibung und Verschleiß zurückzuführen. Davon entfallen ungefähr 20 % auf die Überwindung von Reibung und 3 % auf die Wartung/Reparatur verschleißbedingter Schäden [1]. Wie werden Maschinenelemente heutzutage geschmiert? Öl- und Fettreibung sind die gängigen Methoden, wie Reibkontakte vor exzessiver Reibung und in der Folge vor Verschleiß geschützt werden können. Die Metallherzeugung und Bearbeitung z. B. für Mobilitätsanwendungen stellt in Österreich einen der wichtigsten Branchen der österreichischen Wirtschaft dar und die Kosten infolge von Reibung und Verschleiß sind als signifikant und in mehrstelliger Millionenhöhe pro Jahr anzusehen. Als Beispiele seien Koksschütten in Kokereien im Umfeld der Stahlerzeugung zu nennen, auf denen täglich mehrere Tonnen Koks bei hohen Temperaturen (ca. 850 °C) und unter reduzierender Atmosphäre die eingesetzten Werkstoffe stark verschleifen und somit Wartungsarbeiten und damit verbundene Stillstandszeiten erfordern aber auch Lager in Walzgerüsten oder in sehr energieintensiven Umformverfahren wie dem Tiefziehen von Blechen für die Automobil sowie Luft- und Raumfahrtindustrie. Reibung spielt hier eine entscheidende Rolle für Blechqualitäten und diese beeinflusst natürlich in hohem Maße die Lebensdauer der Tiefziehwerkzeuge. Flüssige Schmierstoffe sind hierbei oft umweltgefährdend, brennbar und müssen am Ende des Tiefziehprozesses aufwendig mit organischen LösemitteIn entfernt werden. Dort könnten neue Schmierungskonzepte mit Hilfelaserstrukturierter Oberflächen in Kombination mit neuartigen 2D- Festschmierstoffen Energie und somit Kosten signifikant senken. Abseits der Metallverarbeitung gibt es jedoch auch im Transportwesen einen großen Bedarf an neuartigen tribologischen Konzepten. Gerade im Bereich Aviation bei Helikoptern sind Steuerstangen- und Heckrotorwellenlager noch immer klassisch mit Fett geschmiert. Dies hat in der jüngsten Vergangenheit zu einigen gravierenden Unfällen geführt und die Idee ist es in Zukunft, diese relevanten Lagerungen für die Manövrierbarkeit von Drehflüglern fettfrei zu gestalten und dafür innovative Festschmierstoffe zu applizieren. In der Elektromobilität sind insbesondere hochdrehende Lager mit Drehzahlen bis zu 25.000/min mit dem Ziel der Massenreduktion aber auch die Erhöhung der Bordnetzspannung auf bis zu 800 V herausfordernd im Hinblick auf Werkstoffauswahl und Werkstoffoberflächenbearbeitung. Insbesondere die Reibungsreduktion in Radlagern und damit verbunden die Langlebigkeit und Ressourceneffizienz spielen hierbei eine entscheidende Rolle. **Das Ziel dieses Beitrags zu Task 12** innerhalb des AMT-TCP war es, sich mit neuartigen 2D-Materialien (z. B. MXene, Graphen/Graphenoxid, Übergangsmetallcarbodichalkogenide (TMCCs)) und laserbasierten Oberflächenverfahren (Direct Laser Interference Patterning) zu beschäftigen, die maßgeblich zur Verringerung von Reibung und Verschleiß und somit zur Langlebigkeit und Ressourceneffizienz beitragen.

2 Abstract

The lubrication of machine elements to ensure the operational capability of equipment and thus the avoidance of maintenance costs is a central and highly relevant topic worldwide, even in the age of digitalisation and e-mobility. According to estimates by Holmberg and Erdemir, approximately 23 % of the total worldwide energy consumption is due to friction and wear. Of this, approximately 20 % is due to overcoming friction, and 3 % is due to maintenance/repair of wear-related damage [1]. How are machine elements lubricated nowadays? Oil and grease friction are common methods of protecting friction contacts from excessive friction and subsequent wear. Metal production and machining, e.g., for mobility applications, is one of the most important sectors of the Austrian economy, and the costs resulting from friction and wear are significant and amount to several million euros per year. Examples of this are coke chutes in coking plants in the steel production environment, where several tonnes of coke are used every day at high temperatures (approx. 850 °C) and in a reducing atmosphere, which cause severe wear to the materials used and thus require maintenance work and the associated downtimes, but also bearings in rolling stands or very energy-intensive forming processes such as the deep drawing of sheet metal for the automotive and aerospace industries. Friction plays a decisive role here for sheet metal qualities, and this naturally influences the service life of the deep-drawing tools to a great extent. Liquid lubricants are often environmentally hazardous, flammable, and have to be removed with organic solvents at the end of the deep-drawing process. Here, new lubrication concepts with auxiliary laser-structured surfaces in combination with novel 2D solid lubricants could significantly reduce energy and thus costs. Apart from metal processing, however, there is also a great need for new tribological concepts in the transport sector. Particularly in the aviation sector of helicopters, control rod and tail rotor shaft bearings are still classically lubricated with grease. This has led to some serious accidents in the recent past, and the idea in the future is to make these relevant bearings for the manoeuvrability of rotorcraft grease-free and to apply innovative solid lubricants for this purpose.

In electromobility, high-speed bearings with speeds of up to 25,000 rpm with the aim of mass reduction, but also the increase of the on-board power supply voltage to up to 800 V, are particularly challenging in terms of material selection and material surface processing. In particular, the reduction of friction in wheel bearings and the associated durability and resource efficiency play a decisive role here.

The aim of this contribution to Task 12 within the AMT-TCP was to address novel 2D materials (e.g., MXene, graphene/graphene oxide, transition metal carbodichalcogenides (TMCCs)) and laser-based surface processes (Direct Laser Interference Patterning) that contribute significantly to friction and wear reduction and thus to durability and resource efficiency.

3 Ausgangslage

Die Schmierung von Maschinenelementen zur Gewährleistung der Einsatzfähigkeit von Anlagen und damit der Vermeidung von Wartungskosten ist auch im Zeitalter der Digitalisierung und der E-Mobilität ein zentrales und hochrelevantes Thema weltweit. Nach Schätzungen von Holmberg und Erdemir sind ca. 23 % des gesamten weltweiten Energieverbrauchs auf Reibung und Verschleiß zurückzuführen. Davon entfallen ungefähr 20 % auf die Überwindung von Reibung und 3 % auf die Wartung/Reparatur verschleißbedingter Schäden [1].

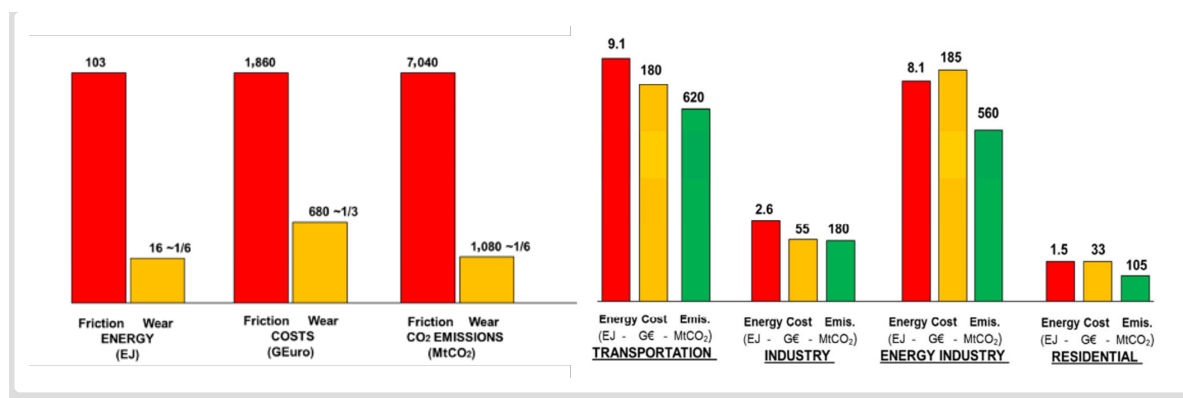


Abbildung 1: Energieverbrauch, Kosten und CO2-Emissionen sowie jeweilige Einsparungen durch tribologische Maßnahmen im Zeitraum von 8 Jahren gerechnet [1]; wiedergegeben gemäß den Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz „Namensnennung 4.0 International“ (CC-BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Abbildung 1 zeigt sehr deutlich die weltweiten Energie- und Kostenaufwendungen sowie CO₂ Emissionen (Daten aus dem Jahr 2017) bedingt durch Reibung und Verschleiß aber auch die möglichen Einsparungen an Energie, Kosten und CO₂ Ausstoß für vier große Bereiche, wenn man auf einer Zeitskala von 8 Jahren, tribologische Konzepte zur Senkung von Reibung und Verschleiß implementieren würde. Besonders energieintensiv sind hierbei der Transportsektor- und die Energiewirtschaft [1].

Wie werden Maschinenelemente heutzutage geschmiert? Öl- und Fettreibung sind die gängigen Methoden, wie Reibkontakte vor exzessiver Reibung und in der Folge vor Verschleiß geschützt werden können. Die Metallherzeugung und Bearbeitung stellen in Österreich einen der wichtigsten Branchen der österreichischen Wirtschaft dar und die Kosten infolge von Reibung und Verschleiß sind als signifikant und in mehrstelliger Millionenhöhe pro Jahr anzusehen. Als Beispiele seien Koksschütten in Kokereien im Umfeld der Stahlerzeugung zu nennen, auf denen täglich mehrere Tonnen Koks bei hohen Temperaturen (ca. 850 °C) und unter reduzierender Atmosphäre die einge-

setzten Werkstoffe stark verschleifen und somit Wartungsarbeiten und damit verbundene Stillstandszeiten erfordern aber auch Lager in Walzgerüsten oder in sehr energieintensiven Umformverfahren wie dem Tiefziehen von Blechen für die Automobil sowie Luft- und Raumfahrtindustrie. Reibung spielt hier eine entscheidende Rolle für Blechqualitäten und diese beeinflusst natürlich in hohem Maße die Lebensdauer der Tiefziehwerkzeuge. Flüssige Schmierstoffe sind hierbei oft umweltgefährdend, brennbar und müssen am Ende des Tiefziehprozesses aufwendig mit organischen Lösemitteln entfernt werden. Dort könnten neue Schmierungskonzepte mit Hilfe laserstrukturierter Oberflächen in Kombination mit neuartigen 2D-Festschmierstoffen Energie und somit Kosten signifikant senken. Abseits der Metallverarbeitung gibt es jedoch auch im Transportwesen einen großen Bedarf an neuartigen tribologischen Konzepten. Gerade im Bereich Aviation bei Helikoptern sind Steuerstangen- und Heckrotorwellenlager noch immer klassisch mit Fett geschmiert. Dies hat in der jüngsten Vergangenheit zu einigen gravierenden Unfällen geführt und die Idee ist es in Zukunft, diese relevanten Lagerungen für die Manövrierbarkeit von Drehflüglern fettfrei zu gestalten und dafür innovative Festschmierstoffe zu applizieren. In der Elektromobilität sind insbesondere hochdrehende Lager mit Drehzahlen bis zu 25.000/min mit dem Ziel der Massenreduktion aber auch die Erhöhung der Bordnetzspannung auf bis zu 800 V herausfordernd im Hinblick auf Werkstoffauswahl und Werkstoffoberflächenbearbeitung. Insbesondere die Reibungsreduktion in Radlagern und damit verbunden die Langlebigkeit und Ressourceneffizienz spielen hierbei eine entscheidende Rolle.

Das Ziel von Task 12 war es, sich mit neuartigen 2D-Materialien (z. B. MXene, Graphen/Graphenoxid, Übergangsmetalldichalkogenide) und laserbasierten Oberflächenverfahren (Direct Laser Interference Patterning) zu beschäftigen, die maßgeblich zur Verringerung von Reibung und Verschleiß und somit zur Langlebigkeit und Ressourceneffizienz für den Transportsektor beitragen.

State of the Art:

Öl- und Fettreibung sind noch immer die gängigen Methoden, wie Reibkontakte vor Reibung und in der Folge vor Verschleiß geschützt werden können. Zu den Hauptaufgaben von Schmierstoffen zählen jedoch auch die Kraft- und Momentenübertragung, die Wärmeabfuhr, die Abdichtung und der Schutz vor Korrosion. Heutzutage existiert allerdings eine große Anzahl von Anwendungen, die aufgrund von tiefen/hohen Temperaturen, Vakuumbedingungen, Strahlungsexposition oder hygienischen Anforderungen aus der Lebensmittel- und Verpackungsindustrie nicht konventionell mit Ölen oder Fetten geschmiert werden können. In diesen Fällen sind Festschmierstoffe unumgänglich. Festschmierstoffe können generell in verschiedene Kategorien unterteilt werden: 1) kohlenstoffbasierte Verbindungen (z. B. Graphit, Graphen oder DLC (Diamond-Like Carbon) - Schichten), 2) Übergangsmetall-Dichalkogenide (z. B. MoS_2 , WS_2), 3) Polymere (z. B. PTFE oder PEEK) und 4) weiche Metalle (z. B. Silber oder Zinn) [2]. Insbesondere MoS_2 aus der Gruppe der Übergangsmetall-Dichalkogenide ist ein vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik etablierter Festschmierstoff und wurde erst kürzlich wieder erfolgreich für das James-Webb Space Telescope eingesetzt. Die tribologische Effizienz hängt jedoch von Luftfeuchte und Temperatur maßgeblich ab. Grundsätzlich beruhen die gute Schmierwirkung von MoS_2 aber auch die des Graphits auf schwachen interplanaren Wechselwirkungen, die eine leichte Scherbarkeit des Materials bewirken und damit eine geringe Reibung aufweisen. In feuchter Atmosphäre bewirken jedoch Wassermoleküle im Falle von

MoS₂ ein Blockieren der Gitterebenen und somit eine drastische Erhöhung der Reibung und ein potenzielles Versagen des Bauteils. Graphit verhält sich hierzu konträr, da gerade dieser seine volle Leistungsfähigkeit eher in feuchter Atmosphäre entfalten kann [2]. Neben der Luftfeuchte spielt aber auch die bereits erwähnte Temperatur eine große Rolle. MoS₂ erreicht oxidationsbedingt seine maximale Einsatztemperatur im Bereich von ca. 350-400 °C. Graphit hingegen beginnt ab 400 °C zu oxidieren [2]. Abseits der genannten Festschmierstoffe existieren noch eine Vielzahl von Verbindungen wie beispielsweise NiO-CaF₂ oder ZrO₂-CaF₂ Beschichtungen (stabil bis 800 °C), schwarzer Phosphor, hexagonales Bornitrid, Selenide/Telluride (z. B. MoSe₂/WSe₂, MoTe₂/WTe₂) oder neuartige 2D-Nanolamine (MXene), die in den letzten Jahren größte Aufmerksamkeit erlangt haben [3-5].

MXene sind hierbei 2D-Materialien, die sich von MAX-Phasen ableiten. MAX-Phasen sind ternäre Verbindungen der Stöchiometrie M_{n+1}AX_n mit n = 1, 2, 3...,6, wobei M für ein Übergangsmetall (z. B. Ti, V, Cr) steht, A für ein Element der 13.-16. Gruppe (IUPAC-Notation) häufig Aluminium und X für Kohlenstoff oder Stickstoff. Diese Phasen sind zweidimensionale Nanolamine, mit einer Kombination von ionisch-kovalenten und metallischen Bindungen, die ihnen außergewöhnliche Eigenschaften verleihen. MAX-Phasen besitzen z. B. eine sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, hohe Bruchzähigkeit sowie thermische Schockbeständigkeit [6]. Ätzt man nun aus den MAX-Phasen die A-Zwischenschicht mit Flusssäure heraus, erhält man MXene. Die allgemeine Schreibweise der MXene ist M_{n+1}X_nT_x, wobei auch hier M ein Übergangselement der 3.-5. Gruppe im Block 3d-5d repräsentiert, X steht für C, N oder CN und T für die jeweilige Oberflächenterminierung mit -O₂, -F₂, -(OH)₂ oder -Cl₂ [7].

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der Struktur der MXene und einige Anwendungen.

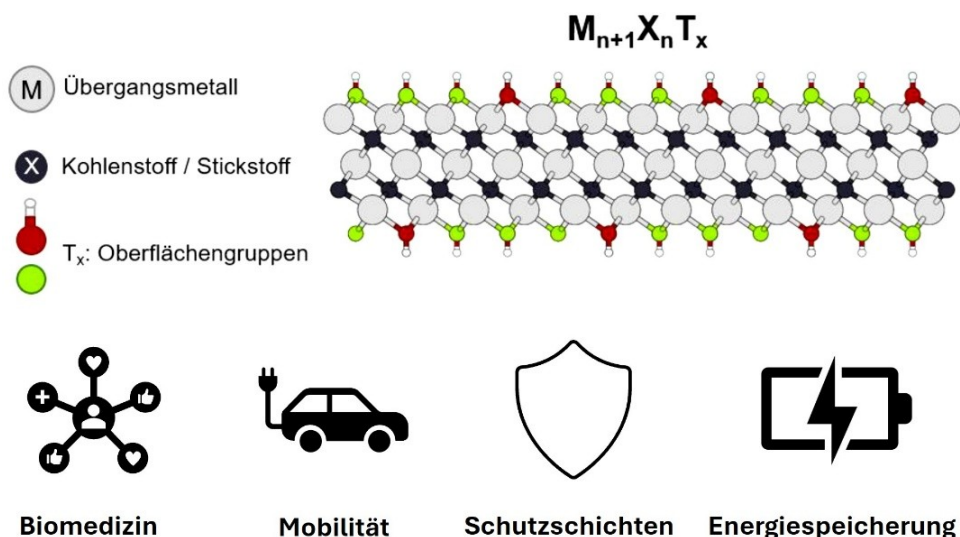


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Struktur der MXene und einiger Anwendungen (eigene Darstellung).

Im Vergleich zu anderen 2D-Materialien weisen MXene verbesserte Interlayer-Interaktionen auf, die nicht nur auf van-der-Waals-Kräften, sondern auch auf elektrostatischen und zwischenmolekularen Kräften beruhen. Daraus resultieren sehr gute Konformitätseigenschaften (Anpassung an Substratoberflächen; Flexibilität), eine Undurchlässigkeit für Flüssigkeiten und Gase, geringe Korrosionsanfälligkeit, hohe intraplanare Festigkeit und eine leichte Scherbarkeit [8]. Das Anwendungsspektrum der MXene ist sehr breit und reicht von Energiespeicherung [9], über Katalyse [10] bis zur Wasserreinigung [11]. Im Bereich der Tribologie findet man MXene aufgrund ihrer chemischen und strukturellen Vielfalt sowie leichten Scherbarkeit als Additive in Schmierstoffen [12] oder als Verstärkungsphase in Polymer-Metall Kompositen [13]. Abseits der MXene verfolgen wir aktuell den Ansatz Festschmierstoffe auf Selenid- und Telluridbasis in-situ über die jeweiligen Selen- bzw. Tellurpulver zu bilden. In einem kürzlich publizierten Artikel in der hochrenommierten Fachzeitschrift "Advanced Materials" beschreiben wir einen innovativen und sehr einzigartigen Ansatz, der zur Bildung von TMDs (Transition Metal Dichalcogenides) führt, und zwar durch die Verwendung des Chalkogen-Element Se in Form eines Nanopulvers, das auf die auf die beteiligten Gleitflächen gestreut wird [14]. Die tribochemischen Reaktionen in der Kontaktzone führen damit zu sehr geringer Reibung und Verschleiß. Unseres Wissens hat jedoch noch keine Arbeit gezeigt, dass ein Pulver in Echtzeit in ein Schichtmaterial umgewandelt werden kann, indem es auf eine gleitende Metalloberfläche gestreut wird. Diese Idee, die sich radikal von den bisherigen Beobachtungen abweicht, kann den Weg zu neuen technologischen Anwendungen eröffnen, da sie Vorteile mit sich bringt. Die Verwendung eines Chalkogenpulvers anstelle von gesputterten Beschichtungen verhindert die Verschlechterung der Schmiereigenschaften durch die Wechselwirkung mit der Luftfeuchtigkeit, der tribologische Kontakt kann durch die Zufuhr von Nanopulvern leicht wiederhergestellt werden, und dieser Ansatz kann auch bei hohen Temperaturen oder im Nanobereich angewendet werden, wo flüssige Medien oder gesputterte Beschichtungen nicht möglich sind. Dies ist ein bedeutender Fortschritt auf dem Gebiet der Tribologie. Außerdem kann es die In-situ-Synthese von neuen Verbindungen anregen, die sich sogar von TMDs unterscheiden. In diesem Themenfeld erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit Ko-Antragsteller Dr. Bayer der TU Wien, da er im Bereich der Synthese von 2D-Materialien ein ausgewiesener Experte ist.

Weitere Möglichkeiten der Reibungs- und Verschleißreduktion?

Abseits der Verwendung von Festschmierstoffen sowie Ölen und Fetten sind in den vergangenen Jahrzehnten bereits weitere unzählige Methoden zur Minimierung von Reibung und Verschleiß für den Fall trockener und geschmierter Reibungssituationen entwickelt worden. Diese reichen von mechanischen Verfahren (Schleifen, Honen), lithographischen Methoden (UV- oder Elektronenstrahlolithografie), bis hin zu Texturierungsverfahren (z.B. Laserstrukturierung oder -texturierung; beides ident) [15]. Laser bieten ein großes Potenzial für die Steuerung tribologischer Eigenschaften. Die laserbasierte Erzeugung von ferngeordneten wohl definierten topographischen Mustern in der Oberfläche der betroffenen Reibpartner kann unter trockenen Reibbedingungen zur Speicherung von Verschleißpartikeln in den derart generierten „Taschen“ sorgen und dadurch den abrasiven Verschleiß minimieren [15-18]. Eine interessante Variante davon ist die direkte Laserinterferenzstrukturierung (DLIP – Direct Laser Interference Patterning), die präzise topographische Muster durch die Überlagerung von Teilstrahlen über Interferenz in Mikro- und Nanodimensionen mit hoher Reproduzierbarkeit erzeugt (**siehe Abbildung 3**).

Diese Methode soll auch in dem geplanten Projekt zum Einsatz kommen. Die Einsatzmöglichkeiten von laserstrukturierten Oberflächen reichen dabei von Bereichen der Benetzungssteuerung, anti-mikrobiellen Oberflächen, elektrischen Steckverbindern, Wärmetauschern bis hin zu Kolbenring-Zylinder Laufbahnen sowie Gleit- und Wälzlagern [19, 20].

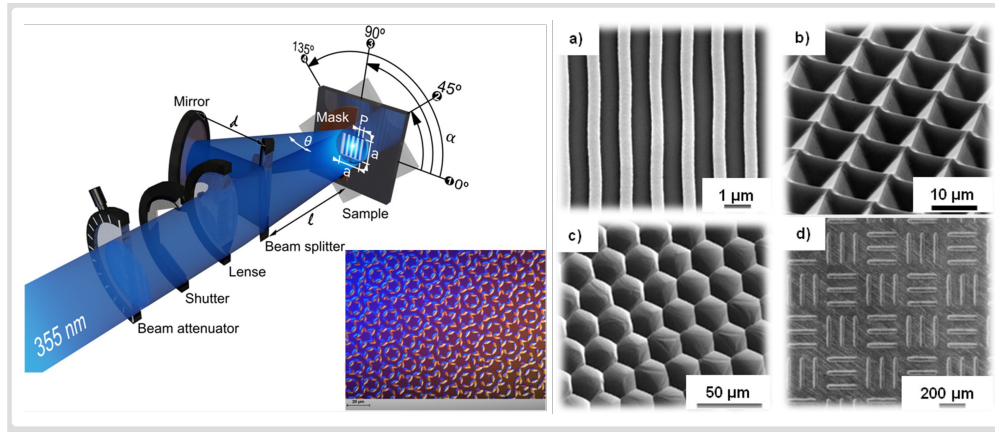


Abbildung 3: Darstellung des Interferenzprinzips und verschiedene Strukturmuster in Materialoberflächen; (a) Laserinterferenzstrukturen in Polyimid, (b) Pyramidales Texturieren in Silizium, (c) Ätzstrukturen in Silizium in Kombination mit Belichtung durch einen UC-Excimer-Laser und (d) Strukturen durch Mikroporägen in 100Cr6-Stahl (eigene Darstellung).

Nachteile der Methoden?

Abseits der oben genannten jeweiligen Vorteile der Laserstrukturierung und der Festschmierstoffe existieren jedoch auch einige negative Aspekte. Im Hinblick auf Festschmierstoffe ist dies einerseits die Schwierigkeit der Nachschmierung. Sobald der Festschmierstoff aus dem Kontakt entfernt wurde, ist eine erneute Versorgung mit Schmiermittel wie im Falle eines Öles über externe Pumpen nicht möglich. Andererseits bieten auch laserstrukturierte Oberflächen gerade im Bereich größerer lokaler Krümmungen und damit verbunden höheren lokalen Pressungen Angriffspunkte für verstärkte plastische Deformation und finalen Verschleiß.

Über den "State of the Art" hinaus...

Genau dort setzt die Projektidee an. Die Kombination von Laserstrukturierung und Festschmierstoffen (hier 2D Materialien) führen zu einem synergetischen Effekt, indem der Festschmierstoff in den durch den Laser erzeugten Kavitäten wie in einem „Reservoir“ gespeichert werden und bei Bedarf in den tribologisch beanspruchten Kontakt transferiert werden ("Lubrication on demand") und darüber hinaus der Festschmierstoff die Laserstrukturen vor verstärkter plastischer Deformation schützt. Vorherige Forschungsergebnisse der Antragsteller von Carbon Nano Tube-Beschichtungen auf strukturierten Stahloberflächen haben diesen synergetischen Effekt bereits im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung belegen können [21]. Beschichtungsergebnisse mit beispielsweise MXe-nen auf glatten Stahloberflächen und deren tribologische Bewertung wurden kürzlich in ACS Nano publiziert [22].

Welche Herausforderungen gibt es?

Die Herausforderungen hängen mit dem Lebenszyklus der vorgeschlagenen Beschichtungen oder Festschmierstoffsystemen zusammen. Hier geht es darum, den vorgeschlagenen Reservoir-Mechanismus an der Grenzfläche zu verifizieren, d. h. wie die MXene oder Selenide/Telluride aus den Laserkavitäten dem Kontakt effizient zugeführt werden können. Darüber hinaus ist die Literatur zu diesen neuartigen Festschmierstoffen in der Tribologie und auch der Ausblick auf Hochgeschwindigkeitslager noch immer sehr lückenbehaftet, wodurch sich das Forschungsthema als höchst innovativ, spannend und herausfordernd gestaltet hatte.

...

4 Projekinhalt

An dem Projekt waren auf österreichischer Seite die TU Wien mit zwei Instituten (1) Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Forschungsbereich Tribologie unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Carsten Gachot (Taskleiter) und (2) das Institut für Materialchemie mit der Forschungsgruppe von Herrn Prof. Dr. Bernhard C. Bayer beteiligt. International dabei waren einerseits die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Roberto Martins de Souza der Universität Sao Paulo aus Brasilien (Mitglied des AMT-TCPs) und Kollege Dr. Xudong Sui aus Lanzhou China (Lanzhou University of Chemical Physics) sowie die Tribologiegruppe von Prof. Dr. Daniele Dini des Imperial College in London.

Intensive experimentelle Zusammenarbeit erfolgte mit Brasilien und China. Dazu war auch ein Doktoratsstudent der Universität Sao Paulo, Herr MSc. Davi Franzosi de Oliveira für eine Dauer von acht Monaten zu Gast an der TU Wien im Forschungsbereich von Prof. Dr. Gachot, um an dem Projekt vor Ort zu arbeiten sowie Dr. Xudong Sui aus Lanzhou, der aktuell über ein nationales Stipendienprogramm für 3 Jahre an der TU Wien arbeitet und sich dort gemeinsam mit den KollegInnen aus der Chemie (Forschungsgruppe Prof. Dr. Bernhard C. Bayer) mit der Entwicklung neuartiger Festschmierstoffe beschäftigt. Im Rahmen, der zweimal pro Jahr stattfindenden ExCo Meetings des AMT-TCP, wurde regelmäßig über den Arbeitsfortschritt berichtet.

Das Projektziel innerhalb Task 12 besteht in der synergetischen Kombination von lasermikrostrukturierten Materialoberflächen, die in einem anschließenden Abscheideprozess (Air spraying) mit neuartigen und hochinnovativen 2D- Materialien z. B. MXene (z. B. Ti_3C_2) oder auch Übergangsmetall- und auch carbochalkogeniden (z. B. MoSe_2 , WSe_2 oder auch Nb_2SC) als Festschmierstoff beschichtet werden und somit die Vermeidung der intrinsischen Nachteile beider Ansätze zu einem hocheffizienten und vielfach einsetzbaren "grünen" Schmierungskonzept führen, das signifikant Reibung und vor allem Verschleiß von Maschinenelementen wie Lagern oder Zahnrädern in Anwendungen der e-Mobilität aber auch beispielsweise in der Luft- und Raumfahrttechnik senkt und dadurch zu Lebensdauerverlängerungen der Maschinen und final Energieeinsparungen führt. Zunächst wurden Stahloberflächen aus 100Cr6 mittels Laserstrukturierung bearbeitet und Linienstrukturen mit verschiedenen lateralen Strukturgrößen und Tiefen (Periode: $1\text{ }\mu\text{m}$ - $20\text{ }\mu\text{m}$; Strukturtiefen 100 nm - $3\text{ }\mu\text{m}$) an der TU Wien produziert. Diese Oberflächen wurden detailliert mit hochauflösenden Methoden analysiert und in einem nächsten Schritt mittels Air Spraying mit 2D Materialien (MXene, 2D Selenide/Telluride) beschichtet. Die Schichtdicke wurde hierbei mit den Laserstrukturen harmonisiert und mit ca. 100 nm - $3\text{ }\mu\text{m}$ avisiert. Die MXene Ausgangspulver waren bereits im Rahmen einer weiteren bestehenden Kooperation mit Prof. Rosenkranz in Chile (Universidad de Chile) und Prof. Gogotsi aus den USA (Drexel University) vorhanden. Die sorgfältige Analyse der Pulver und die Optimierung des geplanten Beschichtungsprozesses erfolgte im Forschungsbereich **Tribologie** (Prof. Dr. Gachot) in regelmäßiger Abstimmung mit der Forschungsgruppe **Molekulare Materialchemie** (Prof. Dr. Bayer) an der TU Wien. Die Erkenntnisse und Ergebnisse der beiden Partner wurden wechselseitig abgeglichen und dienten der jeweiligen Prozessop-

timierungen. Als Gesamtziel war daher die Entwicklung einer stabilen, langlebigen mit 2D- Materialien beschichteten, laserstrukturierten Materialoberfläche zu nennen, die basierend auf einer grundlegenden und umsichtigen Material- und tribologischen Analyse den Ausgangspunkt für ein neues Schmierungskonzept für vielfältige Anwendungen im Bereich der Mobilität dienen kann. Der Folgeschritt ist nun der Transfer der Grundlagenerkenntnisse auf höhere TRLs (Technology Readiness Level) in einem späteren und von diesem Projekt abgekoppelten Schritt, wobei dann mit Firmenpartnern primär in Österreich aber auch international diese Erkenntnisse zu einem späteren Zeitpunkt weiter verwertet werden sollen. Darüber hinaus war ein weiteres Projektziel die studentische Ausbildung mit einer Bachelor- und zwei Masterarbeiten für den gesamten Zeitraum von 16 Monaten. Die Forschungsergebnisse wurden final in hochrangigen Peer Review Fachjournalen und auch als Projektendbericht auf der Webseite des AMT-TCP sowie auf nachhaltig wirtschaften publiziert und auf nationalen/internationalen Konferenzen präsentiert. Als weiteres Projektziel war die Ausrichtung eines zweitägigen Workshops mit interessierten Industriepartnern sowie ein eintägiger studentischer Workshop zu den Themen Laserbearbeitung, Beschichtungstechnik, Nachhaltigkeit und Energieeinsparungen im Bereich Mobilität mittels tribologischer Ansätze vorgesehen, die dann im Rahmen des Projektes auch stattfanden.

...

5 Ergebnisse

Die Exploration neuer Hochleistungsschmierstoffe für beispielsweise Luft- und Raumfahrtanwendungen ist zunächst ein großer „Chemiebaukasten“, der Kenntnisse erfordert, wie man die erfolgversprechenden Kandidaten synthetisiert und durch die richtige Wahl der Funktionalisierung der Materialien (dies ist insbesondere bei MXenen wichtig) diese dann für reibbeanspruchte Kontakte applizieren kann. Ein großes Problem bei MXenen ist aktuell noch die schwierige Skalierbarkeit, da bei den verwendeten Prozessen oftmals mit gefährlichen Stoffen (z. B. Flusssäure HF) gearbeitet wird. Eine weitere Verwendung der erzeugten Ausgangspulver im Sinne von Beschichtungen auf Materialoberflächen beispielsweise mit Verfahren der physikalischen Dampfphasenabscheidung (PVD: Physical Vapor Deposition) sind gegenwärtig noch nicht umsetzbar für MXene, da Aluminium aus dem Precursor der MXene entfernt werden muss und dieses Entfernen über einen PVD-Prozess nicht trivial ist. Der Ausgangspunkt des Projektes war demnach die Verwendung von pulverförmigen Ausgangsstoffen (für MXene und andere applizierte 2D Materialien) und die zunächst erfolgreiche Dispergierung der Pulver in einem alkoholischen Lösemittel (z. B. Ethanol, Isopropanol). Im Anschluss daran sollten dann diese Dispersionen mit Hilfe einer Spraytechnik beispielsweise Air- oder auch Elektrospraying gleichmäßig auf die Werkstoffoberfläche aufgetragen werden. Die größte Schwierigkeit besteht dabei in der Herstellung einer stabilen Dispersion (Pulver + Lösemittel). Stabil bedeutet hierbei, dass es nicht zu einer Entmischung nach kurzer Zeit kommt und das Ausgangspulver sich in der Lösung am Boden des Gefäßes absetzt. Unterschiedliche MXene (z. B. Titan- oder Niob-basiert) mit unterschiedlichen Funktionalisierungen erfordern demnach ein sogenanntes „Solvent Screening“, um für das Material das passende Lösemittel zu identifizieren. Die Forschungsgruppe Materialchemie der TU Wien unter der Leitung von Kollegen Bayer hatte sich im Rahmen des Projektes dieser Aufgabe angenommen und wir konnten somit im Laufe des Projektes Rezepturen für diese Dispersionen erfolgreich erstellen, die die notwendige Beständigkeit für den nachfolgenden Sprühprozess gewährleisten. In einem nächsten Schritt wurden dann diese stabilen Dispersionen einerseits mit der bereits erwähnten Air Spray Technik und in einem zweiten Versuch mit Elektrospraying auf Materialoberflächen übertragen. Dabei spielt die Haftung und Verteilung der 2D Materialien eine entscheidende Rolle, da diese nicht immer gleichmäßig auf den Oberflächen verteilt sind und eventuell eine nur geringe Haftung aufweisen. Ziel war es demnach hier, die Verteilung zu homogenisieren und die Haftung durch Aufrauung der zu beschichtenden Oberflächen zu verbessern. Dies ist im Projektverlauf auch gelungen. Anpassungen waren erneut erforderlich, als die Schichten mit den laserbearbeiteten Oberflächen kombiniert wurden, da die Topografie der Substrate nach der Laserbearbeitung signifikant von der Ausgangsoberfläche abweicht. Die Reihenfolge war dabei erst die Laserstrukturierung der Materialoberflächen und dann die Beschichtung, da die eingebrachte Laserenergie in die Beschichtung zu hoch wäre und damit die 2D Materialien zerstören würde. Die thermische Empfindlichkeit aber mehr noch die Neigung zu Oxidation der MXene sind weitere Komplikationen der Materialien für die Anwendung, die über eine geeignete Funktionalisierung mit entweder -OH Gruppen oder Fluor etc. reduziert werden kann.

Für die nachfolgende Laserbehandlung stellte sich auch die Frage nach dem Strukturdesign, d. h. welche Strukturgeometrie (z. B. Linien, Gitter, Dimple) und auch die optimalen Belegungs-dichten, laterale Strukturabstände und Strukturturen, die insbesondere mit den applizierten Schichtdicken und Partikelgrößen der 2D-Schmierstoffe abgestimmt werden müssen. Diesen Fragen und Herausforderungen hatten wir uns innerhalb des Projektes gestellt und dabei in einem Forschungsartikel in der renommierten Fachzeitschrift „**Carbon**“ die Ergebnisse ein-drucksvoll für Stahloberflächen und Titanlegierungen (Ti64) belegen können. Innerhalb der Forschungsarbeit lag der Fokus abseits von Mobilitätsanwendungen in Applikationen für Im-plantate und dort zeigte sich die überlegene synergetische Wirkung von MXenen mit La-serstrukturen mit unterschiedlichen Laserstrukturgeometrien und Substratmaterialien. Die nächste Frage in diesem Zusammenhang ist bezüglich der Reproduzierbarkeit und der Lang-zeitbeständigkeit der Oberflächen. Im Rahmen einer Masterarbeit von Frau Martina Markuno-vic an der TU Wien konnten diese Fragen final beantwortet werden. Dazu wurden neben den etablierten Kurztests über 30 min zur schnellen Performanceselektion auch 4 und 24 h Tests durchgeführt. Es hat sich dabei gezeigt, dass bestimmte MXene Varianten auch nach 24 h stabil reibreduzierend wirken.

Oftmals kommen aber auch Festschmierstoffsysteme in Kontakt mit Feuchtigkeit, Kühlstoffen oder auch weiteren flüssigen Schmierstoffen, die in anderen Anlagenbereichen eingesetzt werden. Dabei war die Frage, wie die erzeugten 2D Materialien grundsätzlich mit unter-schiedlichen Flüssigkeiten interagieren und ob Sie die Performance insgesamt verbessern oder sich die Leistungsfähigkeit verschlechtert. In einer gemeinsamen Forschungsarbeit in der Fach-zeitschrift „**Surface and Coatings Technology**“ mit Kollegen aus China, die auch im AMT-TCP aktiv sind, konnte unter verschiedenen Temperaturen und Verhältnissen von Gleit- zu Rollrei-bung gezeigt werden, dass nur in einem engen „Fenster“ bezüglich Temperatur und Verhältnis von Gleit- zu Rollreibung eine Verbesserung der Reibung zu erkennen ist, wenn beispielsweise MXene in Wechselwirkung mit anderen flüssigen Schmierstoffen treten. Dazu wurden Wasser, Alkohole und auch ionische Flüssigkeiten (flüssige Salze) verwendet.

Abschließend wurde die Leistungsfähigkeit von MXene Beschichtungen an einem realen Gleit-lager getestet. Dazu wurde im Rahmen einer weiteren Masterarbeit von Frau Bianca Aigner in Zusammenarbeit mit dem Kompetenzzentrum für Tribologie in Wiener Neustadt, der AC²T Re-search GmbH, und Kollegen aus Chile, Tribologiegruppe von Prof. Dr. Andreas Rosenkranz, eine gemeinsame Arbeit in der internationalen Fachzeitschrift „**ACS Applied Nano Materials**“ im Kontext des Projektes publiziert. In einem ersten Schritt wurden Sintergleitlager allerdings nur mit MXenen beschichtet. Eine zusätzliche Laserstrukturierung konnte aus Zeitgründen nicht mehr realisiert werden. Die Wirksamkeit der MXene Beschichtung wurde dabei dem etablierten Festschmierstoff MoS₂ als Benchmark gegenübergestellt. Darüber hinaus wurden auch Hybridbeschichtungen aus MoS₂ und Ti₃C₂T_x MXenen untersucht. Unterschiedliche Luft-feuchtigkeiten (20 und 60 %) wurden dabei eingestellt und die Resultate zeigen, dass die be-schichteten Proben den unbeschichteten Bronzegleitlagern deutlich überlegen sind, die MoS₂ Beschichtung jedoch wesentlich besser Ergebnisse liefert als die MXene Beschichtung oder die Hybridsituation. Es wird vermutet, dass die gewählte Pressung in den Lagern mit knapp 200

MPa nicht ausreichend war, um bei den MXenen eine stabile Reibsituation einzustellen. Weitere Experimente folgen auch unter Berücksichtigung der laserstrukturierten Situation und bei höheren Lagerpressungen. Aktuell werden in Zusammenarbeit mit Kollegen aus Sao Paulo weitere Hybridbeschichtungsvarianten aus Titan- und Niob-basierten MXenen untersucht, die bisher sehr vielversprechend sind. Diese bisherigen Ergebnisse sind Gegenstand der vierten bereits eingereichten Publikation in dem Fachjournal „**Scientific Reports**“.

Fazit:

Neuartige 2D Materialbeschichtungen konnten erfolgreich synthetisiert und mit laserbearbeiteten Oberflächen kombiniert werden. Im Bereich von Implantatanwendungen waren die bisherigen Resultate sehr interessant und vielversprechend wohingegen erste Ergebnisse im Falle von Gleitlagern (allerdings ohne Laserstrukturierung) im direkten Vergleich mit MoS₂ als etabliertem Festschmierstoff keine deutliche Verbesserung erzielen.

Die Kombination von Texturierung **und** Festschmierstoff führt zu **nichtlinearen tribologischen Effekten**, die schwer vorherzusagen sind.

Bisher fehlen noch:

- **Modelle**, die beide Aspekte koppeln,
- und **systematische Studien**, die klare Korrelationen herstellen.

Wissenschaftliche Publikationen aus dem Projekt heraus:

- a) Göçerler, H., Danecker, C., Gachot, C., Sui, X., Tomala, A., Rosenkranz, A., Nastran, M., Bayer, B.C., Loni, E., Schwarz, S. and Stöger-Pollach, M., 2025. Unlocking the synergistic impact of laser texturing and Ti₃C₂T_x MXene coatings–Substrate-specific tribological insights. *Carbon*, 238(12027), p.0.
- b) Neuhauser, R., Gachot, C., Grützmacher, P., Yan, Z., Schwarz, S., Eiberger, M., Bayer, B.C., Bica-Schröder, K. and Sui, X., 2025. Investigating the tribological synergy between ionic liquids and Ti₃C₂T_x MXenes under different load, sliding, and temperature conditions. *Surface and Coatings Technology*, p.132322.
- c) Aigner, B., Boidi, G., Rosenkranz, A., Grützmacher, P. G., Varga, M., & Gachot, C. (2025). MXene and MXene/MoS₂ solid lubricant coatings in journal bearings. *ACS Applied Nano Materials*, 8(9), 4608-4616.

Eine vierte Publikation ist bei dem renommierten Fachjournal Scientific Reports zur Begutachtung eingereicht.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

In Österreich sind weltweit führende Unternehmen der Metallerzeugung und Bearbeitung, Lagerhersteller, Automobilzulieferer und z. B. Firmen aus dem Bereich der Herstellung von Festschmierstoffen ansässig. Die geplante Task-Aktivität hat wesentliche Beiträge zu einem verbesserten Grundlagenverständnis geliefert und so den beteiligten österreichischen Unternehmen die Möglichkeit geboten, die Technologieführerschaft in diesem Sektor zu übernehmen.

Laut Statista liegt der Anteil der Beschäftigten in den Bereichen Metallerzeugung und Bearbeitung bei ca. 10,9 %. Im Bereich Luft- und Raumfahrttechnik sind es mehr als 100 Organisationen und Forschungseinrichtungen mit mehr als 1000 Beschäftigten. Insbesondere das Thema Laserbearbeitung von Oberflächen zum Zwecke einer Strukturierung von Materialoberflächen ist in Österreich nicht weit verbreitet und könnte ein hochspannender und wachsender zukünftiger Zweig werden, der eine Vielzahl von Arbeitsplätzen schaffen kann. Weiterhin ist auch der Bereich Beschichtungstechnik eine wichtige Sparte für einerseits verschleißbeständige Beschichtungen oder thermisch stabile Hochleistungsschichten.

Generell birgt auch die Vermeidung von Ölen oder Fetten bei vielen industriellen Prozessen einen starken Umweltaspekt. Das Beispiel Tiefziehen von Blechen ist ein Musterbeispiel hierfür, da nur unter Einsatz umweltgefährdender organischer Lösemittel, die Bleche nachträglich gereinigt werden müssen. Die Laserstrukturierung beinhaltet keinerlei Nasschemie oder umweltgefährdende Schritte und die bereits angesprochenen neuartigen 2D Werkstoffe (z. B. MXene) sind sogar biokompatibel und besitzen keinerlei Zytotoxizität und könnten auch bedenkenlos für Implantate als Beschichtungsmaterial implementiert werden. Die Arbeiten hierzu wurden im Rahmen einer Masterarbeit mit dem TÜV Austria Award im Dezember 2024 ausgezeichnet. Die aktuelle PFAS-Thematik führt des Weiteren zu einer verstärkten Suche nach Alternativen für Teflon als einem sehr performanten Festschmierstoff mit einem breiten Anwendungsspektrum.

Die Anwendung für Hochgeschwindigkeitslager in der E-Mobilität stellt aktuell vermutlich den größten Mehrwert dar. Dort führen die genannten Forschungsansätze zu Produkten mit wesentlich erhöhter Lebensdauer, der Einsparung von Ressourcen (Kreislaufwirtschaft), den reduzierten Reibungsverlusten (Beitrag zur Energieeffizienz und damit zur Energiewende, siehe auch Abbildung 1 im Abschnitt Motivation Energieverbrauch, Kosten und CO₂ Emissionen sowie jeweilige Einsparungen durch tribologische Maßnahmen) und letztlich, wie im vorherigen Beispiel der Umformtechnik skizziert, zur Vermeidung von toxischen Abfällen.

Im Rahmen des Projektes fanden regelmäßig bi- bzw. multilaterale Onlinemeetings mit Industriepartnern statt und über das Symposium im Dezember 2024 sowie dem Abschlussworkshop im Mai 2025 wurde noch einmal die Möglichkeit geboten, sich über die Thematik zu informieren. Des Weiteren gab es Publikationen in renommierten Fachjournals und auch Newsletter/Taskberichte, die dann auch auf <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/technologieprogramme/amt/iea-amt-task-12.php> veröffentlicht wurden.

Konkret wurde mit Industriepartnern beschlossen, die im Rahmen des Projektes entwickelten Schichten auf Applikationsebene einerseits in der Ventiltechnik für Vakuumanwendungen als Ersatz von PFAS-Produkten zu testen und andererseits die Wirksamkeit von MXenen in der Herstellung von Bremsbelägen zu bewerten. National, aber auch international sind die Ergebnisse als hochrelevant anzusehen und die erzielten Resultate sowie deren Publikation in Fachzeitschriften unterstreichen noch einmal die Rolle, die Österreich hier besonders der Forschungsbereich Tribologie an der TU Wien international mit den Partnerinstitutionen in Brasilien oder China spielt. Für direkte Auswirkungen auf Normen oder Standards ist es aktuell noch verfrüht aber die FTI-Strategie 2030 sollte sich im Bereich exzellenter Grundlagenforschung (Handlungsfelder Ziel 2) den Themen Materialdesign beispielsweise für Hochleistungswerkstoffe für tribologische Anwendungen und Lasermaterialbearbeitung stärker widmen, um hier auch international mehr Bedeutung zu erlangen.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Die Verwendung von neuartigen 2D-Materialien als Festschmierstoffe bietet vielfältige Potenziale, die in die österreichische FTI-Strategie 2030 integriert werden können.

Investitionen in die Erforschung von neuartigen 2D-Materialien wie Graphen oder MXene sollten ausgeweitet werden, um die Materialeigenschaften (z. B. Reibungsreduktion, Verschleißfestigkeit, Temperaturbeständigkeit) für Anwendungen in der Mobilität insbesondere für E-Fahrzeuge aber auch Luft- und Raumfahrtanwendungen besser zu verstehen und zu optimieren. Viele 2D-Materialien sind biologisch inert und umweltverträglich. Die Förderung ihrer Verwendung kann dazu beitragen, umweltgerechte Schmierstoffe zu entwickeln, die den ökologischen Fußabdruck österreichischer Industrie reduzieren. Interessante Ergebnisse im Rahmen verschiedener Projekte an der TU Wien zeigen, dass vor allem MXene auch ein großes Potenzial für Implantate besitzen und damit auch in der Medizintechnik eine spannende Klasse an Materialien repräsentieren.

Der Einsatz neuartiger Festschmierstoffe kann darüber hinaus die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Maschinen erhöhen, was wichtige Voraussetzungen für die Digitalisierung und Automatisierung in der Produktionslandschaft schafft. Hier sollte die Forschung auf diese Schnittstellen fokussiert werden. In diesem Kontext ist allerdings die Entwicklung von nationalen Standards und Prüfmethoden für 2D-Material-basierte Schmierstoffe notwendig, um ihre Verlässlichkeit und Leistung in industriellen Anwendungen zu gewährleisten.

Insgesamt braucht es eine intelligente Vernetzung von Forschungseinrichtungen, KMUs und Großunternehmen, um innovative Anwendungen rasch zur Marktreife zu bringen und die Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen zu stärken. Gezielt sollten dabei konkrete Projekte zur Anwendung von neuartigen 2D Materialien auch in der Kombination mit Laserverfahren zum Maßschneiden von Werkstoffoberflächen in relevanten Bereichen wie der Luftfahrt, der Automobilindustrie, Energie oder Fertigung unterstützt werden, um Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit zu validieren. Der Ausbau von Bildungs- und Weiterbildungsprogrammen im Bereich der Nanotechnologie und Materialwissenschaften ist final entscheidend, um Expertise für die Entwicklung und Anwendung neuer Schmierstoffe oder Werkstoffen generell zu sichern. Folgeprojekte sind insbesondere im Bereich Upscaling der genannten 2D Materialien angedacht, um speziell auf nachhaltigen Wegen, diese Materialien zu synthetisieren und auch in größerem Maßstab, der Industrie für ihre Applikationen zugänglich zu machen. Hierzu können elektrochemische Ansätze erfolgversprechend sein.

Durch die gezielte Einbindung innovativer 2D-Materialien und Lasertechnik in Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsprozessen kann Österreich seine Position in der nachhaltigen, zukunfts-fähigen Materialentwicklung stärken. Dies trägt wesentlich dazu bei, die Klimaziele, die Wettbe-werbsfähigkeit und Innovationsfähigkeit im Rahmen der FTI-Strategie 2030 zu sichern.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energieverbrauch, Kosten und CO ₂ -Emissionen sowie jeweilige Einsparungen durch tribologische Maßnahmen im Zeitraum von 8 Jahren gerechnet [1]; wiedergegeben gemäß den Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz „Namensnennung 4.0 International“ (CC-BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).	8
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Struktur der MXene und einiger Anwendungen (eigene Darstellung).	10
Abbildung 3: Darstellung des Interferenzprinzips und verschiedene Strukturmuster in Materialoberflächen; (a) Laserinterferenzstrukturen in Polyimid, (b) Pyramidales Texturieren in Silizium, (c) Ätzstrukturen in Silizium in Kombination mit Belichtung durch einen UC-Excimer-Laser und (d) Strukturen durch Mikroprägen in 100Cr6-Stahl (eigene Darstellung).	12

Literaturverzeichnis

- [1] Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs, and emissions. *Friction*, 5, 263-284.
- [2] Scharf, T. W., & Prasad, S. V. (2013). Solid lubricants: a review. *Journal of Materials Science*, 48, 511-531.
- [3] Clauss, F. J. (Ed.). (2012). *Solid lubricants and self-lubricating solids*. Elsevier.
- [4] Sliney, H. E. (1982). Solid lubricant materials for high temperatures—a review. *Tribology International*, 15(5), 303-315.
- [5] Rosenkranz, A., Liu, Y., Yang, L., & Chen, L. (2020). 2D nano-materials beyond graphene: from synthesis to tribological studies. *Applied Nanoscience*, 10, 3353-3388.
- [6] Verger, L., Natu, V., Carey, M., & Barsoum, M. W. (2019). MXenes: an introduction to their synthesis, select properties, and applications. *Trends in chemistry*, 1(7), 656-669.
- [7] Vahid Mohammadi, A., Rosen, J., & Gogotsi, Y. (2021). The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes). *Science*, 372(6547), eabf1581.
- [8] Marian, M., Berman, D., Rota, A., Jackson, R. L., & Rosenkranz, A. (2022). Layered 2D nano-materials to tailor friction and wear in machine elements—A review. *Advanced Materials Interfaces*, 9(3), 2101622.
- [9] Anasori, B., Lukatskaya, M. R., & Gogotsi, Y. (2017). 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nature Reviews Materials*, 2(2), 1-17.
- [10] Gao, G., O'Mullane, A. P., & Du, A. (2017). 2D MXenes: a new family of promising catalysts for the hydrogen evolution reaction. *Acs Catalysis*, 7(1), 494-500.
- [11] Malik, R. (2018). Mxing out water desalination with MXenes. *Joule*, 2(4), 591-593.
- [12] Zhang, Y., Wang, L., Zhang, N., & Zhou, Z. (2018). Adsorptive environmental applications of MXene nanomaterials: a review. *RSC advances*, 8(36), 19895-19905.
- [13] Yin, X., Jin, J., Chen, X., Rosenkranz, A., & Luo, J. (2019). Ultra-wear-resistant MXene-based composite coating via in situ formed nanostructured tribofilm. *ACS applied materials & interfaces*, 11(35), 32569-32576.

- [14] Grützmacher, P.G., Cutini, M., Marquis, E., Rodríguez Ripoll, M., Riedl, H., Kutrowatz, P., Bug, S., Hsu, C.J., Bernardi, J., Gachot, C. and Erdemir, A., 2023. Se nanopowder conversion into lubricious 2D selenide layers by tribochemical reactions. *Advanced Materials*, 35(42), p.2302076.[15] Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S. M., & Costa, H. L. (2017). A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*, 372, 21-41.
- [16] Gachot, C., Rosenkranz, A., Reinert, L., Ramos-Moore, E., Souza, N., Müser, M. H., & Mücklich, F. (2013). Dry friction between laser-patterned surfaces: role of alignment, structural wavelength, and surface chemistry. *Tribology Letters*, 49, 193-202.
- [17] Rosenkranz, A., Reinert, L., Gachot, C., & Mücklich, F. (2014). Alignment and wear debris effects between laser-patterned steel surfaces under dry sliding conditions. *Wear*, 318(1-2), 49-61.
- [18] Gachot, C., Rosenkranz, A., Buchheit, R., Souza, N., & Mücklich, F. (2016). Tailored frictional properties by Penrose-inspired surfaces produced by direct laser interference patterning. *Applied Surface Science*, 367, 174-180.
- [19] Lasagni, A.F., Gachot, C., Trinh, K.E., Hans, M., Rosenkranz, A., Roch, T., Eckhardt, S., Kunze, T., Bieda, M., Günther, D. and Lang, V., 2017, March. Direct laser interference patterning, 20 years of development: from the basics to industrial applications. In *Laser-based micro-and nanoprocessing XI* (Vol. 10092, pp. 186-196). SPIE.
- [20] Rosenkranz, A., Stratmann, A., Gachot, C., Burghardt, G., Jacobs, G., & Mücklich, F. (2016). Improved Wear Behavior of Cylindrical Roller Thrust Bearings by ThreeBeam Laser Interference. *Advanced Engineering Materials*, 18(5), 854-862.
- [21] Reinert, L., Lasserre, F., Gachot, C., Grützmacher, P., MacLucas, T., Souza, N., Mücklich, F. and Suarez, S., 2017. Long-lasting solid lubrication by CNT-coated patterned surfaces. *Scientific Reports*, 7(1), p.42873.
- [22] Grützmacher, P.G., Suarez, S., Tolosa, A., Gachot, C., Song, G., Wang, B., Presser, V., Mücklich, F., Anasori, B. and Rosenkranz, A., 2021. Superior wear-resistance of Ti3C2Tx multilayer coatings. *ACS nano*, 15(5), pp.8216-8224.

