



Bundesministerium  
der Verteidigung

# Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2021

Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte

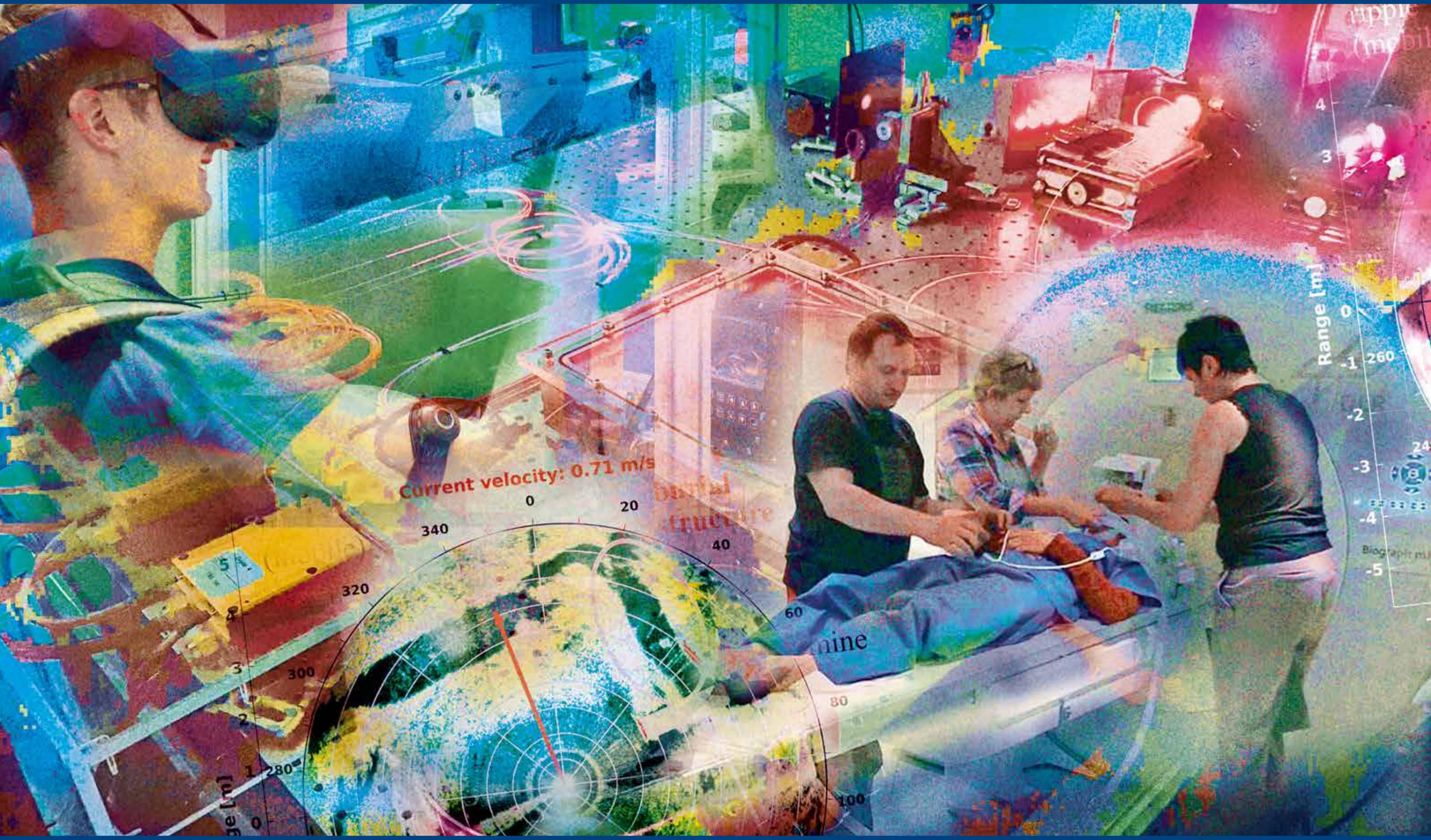


BUNDESWEHR

---

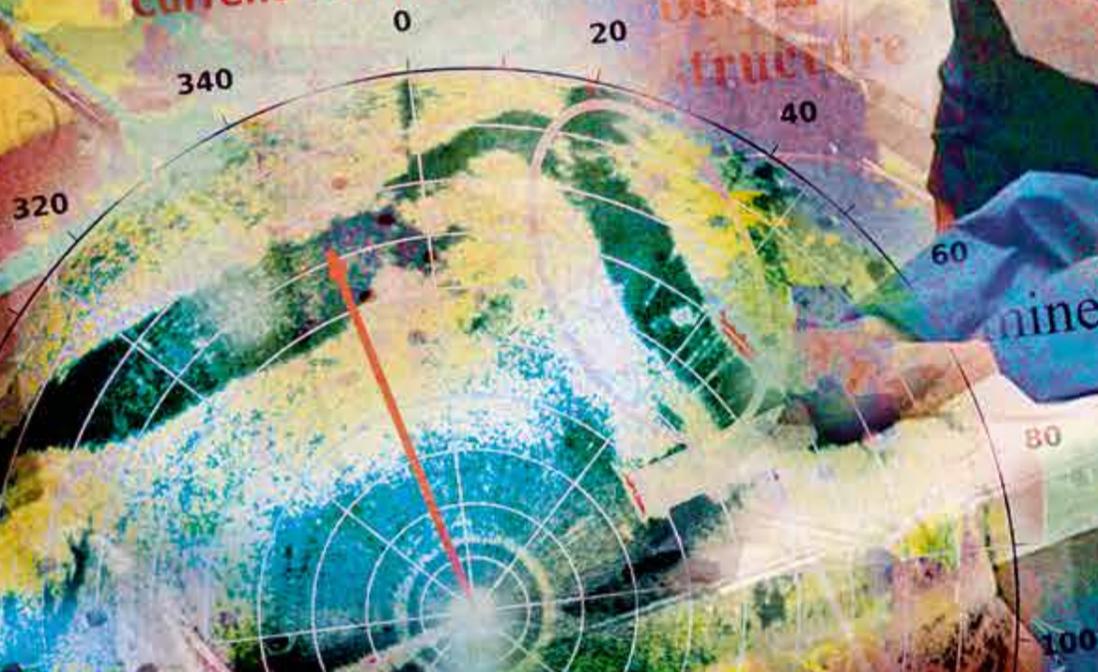
## Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2021

Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte



Current velocity: 0.71 m/s

Range [m]



Biograph m

-5

-4

-2

-1

0

3

4

applic  
(mobil



---

## Wehrwissenschaftliche Forschung für die Streitkräfte

Zurückblickend war das Jahr 2021 mit dem Ende des Afghanistan-Einsatzes, der Hochwasser- und Coronahilfe und den parallellaufenden Einsätzen eines der Anspruchsvollsten in der Geschichte der Bundeswehr. Es hat sich wieder gezeigt, dass die sicherheits- und verteidigungspolitischen Herausforderungen für Deutschland nicht abnehmen. Weiterhin blieb der Trend zu höherer Volatilität und Komplexität der Aufgaben der Bundeswehr auch 2021 ungebrochen.

In diesem schnelllebigen und anspruchsvollen Umfeld hat die Bundeswehr folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Landes- und Bündnisverteidigung im Rahmen der NATO und gemäß den Vorgaben der Europäischen Union
- Cybersicherheit /-verteidigung
- nationales Risiko- und Krisenmanagement
- Heimatschutz und „Host Nation Support“
- Betrieb der Basis Inland

Die wehrwissenschaftliche Forschung mit ihren Forschungsbereichen

- Wehrtechnische Forschung,
  - Wehrmedizinische und Militärpsychologische Forschung,
  - Militärgeschichtliche und Sozialwissenschaftliche Forschung,
  - Geowissenschaftliche Forschung und
  - Cyber / Informationstechnische Forschung
- liefert zur Erfüllung dieser Aufgaben einen bedeutenden Beitrag. Sie stellt der Bundeswehr die notwendigen Technologien und wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Verfügung, um auch zukünftige Herausforderungen meistern zu können, und unterstützt dabei, neue Bedrohungen frühzeitig zu erkennen. Die wehrwissenschaftliche Forschung sichert so die Zukunftsfähigkeit der Bundeswehr. Ergänzend trägt sie zur technologischen Souveränität Deutschlands und Europas bei.

Die großen Forschungsthemen unserer Zeit, wie z. B. Digitalisierung, Künstliche Intelligenz, un-

bemannte Systeme, Biotechnologien, Weltraum, Quantentechnologie und Cybersicherheit, spiegeln sich natürlich auch 2021 in den Forschungsvorhaben der wehrwissenschaftlichen Forschung wider. Es werden hier zumeist im Rahmen von Dual-Use und nach dem Add-On-Prinzip Forschungsansätze und -ergebnisse aus der aktuellen zivilen Forschung aufgegriffen und für den Bedarf der Streitkräfte weiterentwickelt.

Der hier vorliegende Jahresbericht 2021 fasst Beiträge aus den verschiedenen Forschungsbereichen der wehrwissenschaftlichen Forschung beispielhaft zusammen und gibt einen Überblick über die Highlights der wehrwissenschaftlichen Forschung im Jahr 2021.



Gerhard Coors



*Durch Anklicken direkt zum Artikel gelangen*

**Vorwort 06 Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte**

**Teil 1 13 Wehrtechnische Forschung**

- 14 Hochenergielaser-Reflexionsmessungen – Lasersicherheitsbetrachtungen
- 16 Das Vorhaben OCEAN2020 – Verbessertes maritimes Lagebild mittels vernetzter ISTAR-Fähigkeiten
- 18 Werkstoffmechanik des endballistischen Versagens von transparenten Schutzwerkstoffen bei Beschuss
- 20 Werkstoffdesign für Anwendungen in der Ballistik am Beispiel von 3D-gedrucktem Wolfram-Komposit
- 22 Intelligente, vernetzte HF-Sensorik
- 24 Agiles Entwickeln und Überprüfen von Waffensystemen mit begreifbarer erweiterter Realität (tangible XR)
- 26 Sensordatenfusion und Ressourcenmanagement als Kernfunktionen für FCAS/NGWS
- 28 Abwehr von autonomen Kleindrohnen und Drohnenschwärmen – Einsatzmöglichkeiten von High Power Electromagnetics (HPEM)
- 30 Untersuchung der Empfindlichkeit moderner selbstsperrender GaN-Leistungshalbleiter auf hochenergetische Neutronen
- 32 3D-Echtzeit-Millimeterwellenkamera
- 34 Verschränkte Photonenpaare aus miniaturisierten Photonenquellen
- 36 Die Rettungskette der Zukunft
- 38 Analyse und Bewertung von Gesundheits- und Umweltaspekten beim Einsatz von Irritationskörpern im Übungsbetrieb
- 40 Realisierung signaturarmer Brennstoffzellen-APUs mit heutigen logistischen Kraftstoffen
- 42 Holistische Risikomodellierung zur optimierten Planung von UAS-Missionen
- 44 DRONAR – Ein drohnengetragenes Radar zur Detektion von Landminen und Sprengfallen
- 46 Intelligentes GPS Spoofing zur Abwehr von Angriffen mit unbemannten Luftfahrzeugen
- 48 Hyperspektrale Fernerkundung



# 21

- 50 V3C: Verlegfähiges und kompaktes Kontrollzentrum für Kleinsatelliten
- 52 Signalerfassende raumgestützte Aufklärung mit TerraSAR-X/ TanDEM-X
- 54 Kosteneffiziente Fertigung von Triebwerkeintrittsleitschaufelstrukturen aus Verbundwerkstoffen
- 56 Entwicklung von Infrarot-Lichtquellen für DIRCM-Gegenmaßnahmen
- 58 Hypersonische Forschungsarbeiten am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
- 60 Simulation und Modellbildung für aerodynamische Anwendungen
- 62 Die MedXFit-Studie – Einfluss von CrossFit®-Training auf Kraft, Mobilität, Rückenproblematiken und Wohlbefinden bei Soldaten und Soldatinnen sowie Zivilangestellten der Bundeswehr
- 64 Verträglichkeit von konventionellen und additiv gefertigten Elastomeren mit synthetischen Kraftstoffen
- 66 Maschinelles Lernen auf Quantencomputern: Die Zukunft für Angreifer-Verteidiger-Szenarien
- 68 Perspektiven der deutschen sicherheitspolitischen Kooperation im Westpazifik aus der Sicht des internationalen Systems – Relevanz für das sicherheitspolitische Handeln des BMVg
- 70 Die Entwicklung des Hamburger Stärkentests „Berufe Radar“ als Berufsorientierungstool für Absolventinnen und Absolventen sowie Berufseinsteigerinnen und Berufseinsteiger
- 72 Ärztliche Weiterbildung im Fokus: Das Forschungsprojekt „Evaluation, Konzeptionalisierung und Implementierung arbeitsprozessorientierter ärztlicher Weiterbildung am BwK Hamburg (E.K.I.)“
- 74 Strukturelles Kleben von Luftfahrzeugstrukturen bestehend aus Hochleistungsthermoplasten und darauf basierenden Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen (Thermoplastic Bonding)
- 76 Entwicklung eines validierten und einheitlichen Prüfaufbaus für menschliche Hautsurrogate für die Untersuchung der Wirkung Nichtletaler Wirkmittel in Form von kinetischen Projektilen
- 78 Neue technologische Entwicklungstrends in der Detektion und Identifikation ionisierender Strahlung
- 80 Ein kompakter Sensor zur Detektion und Klassifikation von Angriffen mit gepulster elektromagnetischer Strahlung hoher Leistung
- 82 Additive Fertigung von Elektronik
- 84 Kunststoffpyrolyse
- 86 3D-bildgebende Sensorik für die Detektion von vergrabenen Kampfmitteln



- 88 Rapid Deployable Reconnaissance System (RDRS)
- 90 Entwicklung, Inbetriebnahme und Test eines modernen 900N Turbostrahltriebwerks
- 92 Sedimenttransport und Minenversandung
- 94 Messung elektrischer und magnetsicher Signaturen mit unbemannten Unterwasserfahrzeugen
- 96 Der virtuelle Handlungstrainer – Neue Möglichkeiten in der Teamausbildung

## Teil 2 99 Wehrmedizinische und Militärpsychologische Forschung

- 100 Evaluierung der Leistungsfähigkeit von SARS-CoV-2 Antigenschnelltests
- 102 Rationales Wirkstoff-Design von Antidoten für die Behandlung von Nervenkampfstoffvergiftungen
- 104 Fitnessregister „Grundausbildung Heer“ als Element zur Leistungsüberprüfung und Trainingssteuerung sowie für ein evidenzbasiertes Lagebild
- 106 Deutsch-japanische Entwicklung eines neuen Softwaretools zur Optimierung medizinischer Gegenmaßnahmen bei Radioiodexposition
- 108 Isolierte Unterbringung und Quarantäne vor dem Einsatz: Einfluss auf Adhärenz und psychosoziales Wohlbefinden
- 110 Luft- und raumfahrtmedizinisch relevante Befunde des Zentralen Nervensystems – Internationale Lösungsansätze für mehr Flugsicherheit
- 112 Tauchmedizinische Untersuchung auf mögliche Residuen nach SARS-CoV-2 Infektion vor Wiederaufnahme des Taucherdienstes – Klinische Beobachtungsstudie an betroffenem Personal der Bundeswehr
- 114 Identifikation von prädiktiven Biomarkern für den schweren Verlauf einer COVID-19 Erkrankung
- 116 Die Entwicklung und Anwendung eines 3D-Druckverfahren nutzenden Ausbildungsmoduls zur Trepanationsplanung
- 118 Der „Terror and Disaster Surgical Care“-Kurs (TDSC®)
- 120 Erweiterte Evaluation molekularer Diagnostikverfahren für tropische Parasitenerkrankungen
- 122 Der digitale Weg des Verwundeten – Künstliche Intelligenz im Dienst der Patientenversorgung
- 124 Die Testpsychologie Psychische Fitness im Psychologischen Dienst der Bundeswehr



# 21

## Teil 3 127 Militärgeschichtliche und Sozialwissenschaftliche Forschung

- 128 Politische Zwecke und Ziele des internationalen militärischen Afghanistan-Engagements in den Jahren 2001 – 2014
- 130 Sozialwissenschaftliche Forschung zur Digitalkultur in der Bundeswehr

## Teil 4 133 Geowissenschaftliche Forschung

- 134 Herausforderungen der Her- und Bereitstellung digitaler Geoinformationen
- 136 Vogelzugvisualisierung mittels Machine Learning – Entwicklung eines Modells zur Erkennung von Vogelzugmustern in Radardaten
- 138 Vorhersage der Waldbrandgefährdung für Infrastruktur und Personal der Bundeswehr in Grundbetrieb, Ausbildung und Einsatz

## Teil 5 141 Forschung Cyber / Informationstechnik

- 142 ErzUntGlas – Erzeugung eines gläsernen Gefechtsfeldes zur Unterstützung dynamischer Operationen
- 144 Moderne Kurzwellen-Kommunikation
- 146 Adversariale Angriffe gegen textverarbeitende Künstliche Intelligenz (KI)
- 148 Design informationssicherer Field Programmable Gate Arrays (FPGAs)

## Teil 6 151 Anhang

- 152 Adressen und Kontakte
- 158 Impressum



# 1

## Wehrtechnische Forschung

Das Fähigkeitsprofil der Bundeswehr bedingt eine intensive Beobachtung und Erschließung aller für wehrtechnische Anwendungen relevanten natur- und ingenieurwissenschaftlichen Felder. Für die hierzu erforderliche Analyse- und Bewertungsfähigkeit werden überwiegend Erkenntnisse der zivilen Forschung aufgegriffen und technologische Entwicklungen hinsichtlich ihrer zukünftigen militärischen Verwendbarkeit bzw. ihres Bedrohungspotenzials analysiert.

Zur Weiterentwicklung der Fähigkeiten der Bundeswehr und Fokussierung auf wichtige Fragestellungen werden strategische Interessensfelder identifiziert und relevante Zukunftstechnologien zeitgerecht bis zur Produktnähe vorangetrieben. Dabei ist die eigene technologische Souveränität auf dem Gebiet nationaler Schlüsseltechnologien zu erhalten und auszubauen.

Ziel ist es letztlich, das Handlungs- und Leistungsvermögen der Bundeswehr durch verstärkte Nutzbarmachung neuer Ideen und schnelle Umsetzung von technologischen Innovationen zu sichern und zu verbessern, um zeit- und auftragsgerecht die erforderliche Ausrüstung für die Bundeswehr zur Verfügung zu stellen.

Die Durchführung wehrtechnischer Forschung und Technologie (F&T) in Deutschland erfolgt

- in bundeswehreigenen Wehrwissenschaftlichen und Wehrtechnischen Dienststellen,
- im Rahmen einer anteiligen Grundfinanzierung bei der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) sowie dem Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) und
- im Rahmen einer projektfinanzierten Forschung durch die Vergabe von F&T-Aufträgen und Zuwendungen an Dritte, d. h. an Industrie und Wirtschaft, Universitäten und Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen.

In den nachfolgenden Artikeln werden Beispiele von wehrtechnischen F&T-Aktivitäten des Jahres 2021 aus diesen drei Durchführungsbereichen dargestellt.

M. Sc. Michael Henrichsen  
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB  
Ettlingen

info@iosb.fraunhofer.de

Dr. Bernd Eberle  
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB  
Ettlingen

info@iosb.fraunhofer.de

## Hochenergielaser-Reflexionsmessungen – Lasersicherheitsbetrachtungen

**Klassische Lasersicherheitsbetrachtungen basieren im Wesentlichen auf der Berechnung von Gefahrenabständen. Für den Einsatz von Hochenergielasersystemen im Freien ist solch eine Betrachtung unzureichend. Unabdingbar sind Risikoberechnungen, welche die vom Ziel reflektierte Laserstrahlung einschließen, was Experimente und eine Simulation der entfernungsabhängigen Intensitätsverteilungen erfordert.**

Der klassische Weg, die Gefährdung von Personen hinsichtlich der Bestrahlung durch Laserlicht zu ermitteln, basiert anerkannterweise auf den von der Arbeitssicherheit vorgegebenen konservativ festgelegten Expositionsgrenzwerten. Üblicherweise erfolgt dies durch Berechnung des Gefahrenabstandes (NOHD, engl.: Nominal Ocular Hazard Distance), welcher für ideale Laserstrahlausbreitung angibt, wie weit man von einer spezifischen Laserquelle mindestens entfernt sein muss, damit für einen Blick in den direkten Laserstrahl Augenverletzung mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden können. Darüber hinaus geht man grundsätzlich davon aus, dass die Gefahr immer vorhanden ist – der nicht unwichtige Aspekt, wie wahrscheinlich und wie lange eine Person überhaupt gefährdet sein könnte, bleibt in der Regel völlig unberücksichtigt.

Wenn es um den Einsatz von Hochenergielasern (HEL) im Freien geht und sich aufgrund der Gegebenheiten kein definierter Sicherheitsbereich (eingegrenzter Bereich mit Gefahrenabstand und Pufferwinkel) einrichten lässt, ist eine konservative Berechnung der NOHD unzureichend. Zu berücksichtigen sind auch Lichtreflexionen, die an bestrahlten Gegenständen entstehen



Abb. 1: Reflexion von Nahinfrarot (NIR)-Laserstrahlung an einem Bolometer-Objektiv

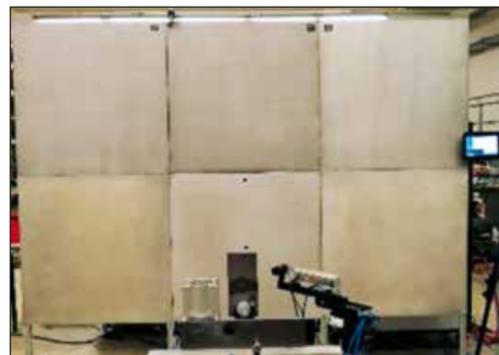


Abb. 2: Testziel im mittleren unteren Bereich vor der Reflexionswand

und gefährlich sein können. Das macht eine realistische Gefährdungsbeurteilung entsprechend komplex, da eine Festlegung des Lasergefährdungsbereichs als eine Hemisphäre mit dem Radius der NOHD um den Laser deutlich zu groß ist. Folglich muss der bisher ausschließlich genutzte klassische Berechnungsweg verlassen werden.

Die gesetzlichen Regelungen, hier insbesondere die „Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV)“ können jedoch nach OStrV §1 (3) explizit auch „Ausnahmen von den Vorschriften dieser Verordnung zulassen“. Im letzten Satz dieses Absatzes wird dann aber auch gefordert: „In diesem Fall ist gleichzeitig festzulegen, wie die Sicherheit [...] auf andere Weise gewährleistet werden [kann].“

An einem alternativen Weg wird am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, IOSB geforscht, indem die Reflexionseigenschaften von typischen Zielen bei Bestrahlung mit HEL-Strahlung experimentell untersucht werden. Darauf aufbauend lässt sich eine Analyse durchführen, mit welcher sich die Wahrscheinlichkeit der Gefährdung einer unbeteiligten Person für das jeweilige Szenario ermitteln lässt. Es hat sich gezeigt, dass bei den untersuchten Proben (wie z. B. Aluminium, Stahl, Weißblech) die reflektierte Laserstrahlung in erster Linie eine größere Strahldivergenz gegenüber der auf das Ziel fokussierten Laserstrahlung aufweist. Die NOHD der reflektierten Strahlung wird dadurch, gegenüber der eigentlichen NOHD des Lasers, um Größenordnungen reduziert. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass durch Lasereinwirkung aufschmelzende Metalloberflächen eine sich zeitlich schnell ändernde, sehr individuelle Reflexionscharakteristik entwickeln.

Dabei können sogenannte Kaustiken entstehen, die wenig mit der initialen Reflexionscharakteristik der Materialien gemein haben. Die Form dieser Kaustiken und damit deren dynamische Intensitätsverteilung ist jedoch von der Betrachtungsentfernung abhängig.

Mit einer am Fraunhofer IOSB erarbeiteten Computersimulation kann, basierend auf diesen Experimenten, die entfernungsabhängige Entwicklung der Intensitätsverteilung der Kaustiken analysiert werden. Hierbei wird die geschmolzene Metalloberfläche mittels eines speziellen Wellenmodells beschrieben, dessen Parameter anhand der experimentellen Ergebnisse bestimmt werden.

Insgesamt ermöglichen es unsere Analysen, angepasste Gefährdungsbereiche für reflektierte Laserstrahlung festzulegen und eine Grundlage für Risikobetrachtungen bei komplexen Reflexionscharakteristiken zu legen. Derartige Betrachtungen sind die Voraussetzung für eine notwendige adäquate wahrheitsbasierte Gefährdungsbeurteilung gegenüber unbeteiligten Personen bei einem HEL-Einsatz im Freien.

Die Abb. 1 bis 3 zeigen Reflexionscharakteristiken von Metallproben. Die ersten beiden Abb. zeigen Reflexionen vor dem Aufschmelzen. In der dritten Abb. sind Kaustiken zu sehen und rechts eine entsprechende Kaustik-Simulation.

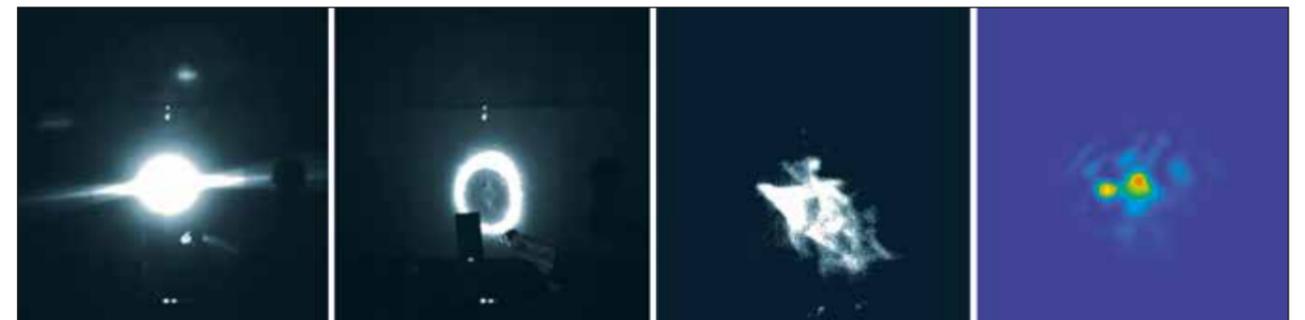


Abb. 3: Kaustiken und rechts eine entsprechende Kaustik-Simulation

Dipl.-Inform. Wilmoth Müller  
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB  
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Arne Schumann  
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB  
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

## Das Vorhaben OCEAN2020 – Verbessertes maritimes Lagebild mittels vernetzter ISTAR-Fähigkeiten

**Unbemannte autonome Systeme ermöglichen es, die Reichweite und Kontinuität der maritimen Überwachung und Aufklärung zu steigern und somit das Lagebild mittels „Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance“ (ISTAR) zu verbessern. Das von der EU geförderte und von der EDA als Projektträger beauftragte Forschungsprojekt OCEAN2020 entwickelte die dazu notwendigen Technologien und erprobte diese in einer Reihe von simulierten Übungen und Live-Demonstrationen.**

Bei multinationalen Verteidigungsoperationen auf Ebene der EU oder der NATO ist der Austausch von Überwachungs- und Aufklärungsdaten wesentlich, um rasch handeln zu können. Im Kontext der Seestreitkräfte ist es das Ziel, ein einheitliches Seelagebild zu erzeugen und aufrechtzuerhalten, das allen an der Operation Beteiligten als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung steht.

Eine der Schlüsselfähigkeiten zur Erzeugung eines einheitlichen Seelagebildes ist ISTAR – also der Gesamtprozess aus Nachrichtengewinnung, Überwachung, Zielerfassung und Aufklärung.

Der Einsatz unbemannter oder sogar autonomer Systeme zusätzlich zu bemannten Einheiten hat das Potenzial, die Reichweite und Kontinuität der maritimen Überwachung und Aufklärung zu steigern und somit das Lagebild zu verbessern.

Die technischen Möglichkeiten diesbezüglich auf ein neues Niveau zu heben, war das Ziel des 2018 gestartete Forschungsprojektes OCEAN2020 (Open Cooperation for European maritime awareNess) mit 43 Partner aus 15 EU-Ländern. Es wurde

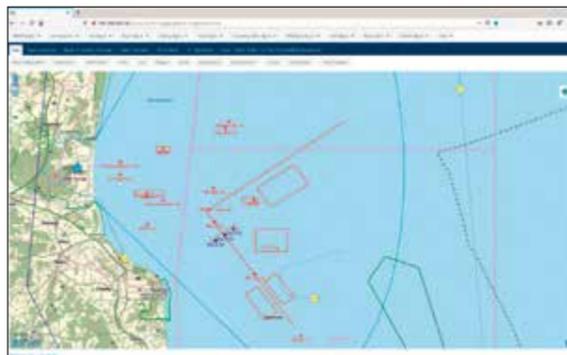


Abb. 1: Maritime Lage des Live Trials in der Ostsee. Der WaterStrider Schwarm bildet eine Überwachungsbarriere zur Detektion von Angriffen aus dem Süden



Abb. 2: WaterStrider an Bord des Forschungsschiffes PLANET

M. Sc. Mathias Anneken  
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB  
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

über die vorbereitende Maßnahme der Europäischen Union zur Verteidigungsforschung (Preparatory Action on Defence Research, PADR) finanziert, Projektträger war die Europäische Verteidigungsagentur (EDA).

Die Hauptaufgabe bestand darin, etablierte und neue Technologien für unbemannte Systeme (UxS), ISTAR-Nutzlasten sowie Effektoren zu integrieren und die vielfältigen Daten und Informationen zu einem einheitlichen Lagebild zu fusionieren. Dafür verbindet das System auf taktischer Ebene unbemannte Plattformen – insbesondere Drohnen, unbemannte Wasserfahrzeuge und unbemannte U-Boote –, ihre Kontrollstationen sowie Funktionalitäten zur Sensordatenauswertung und -fusion mit dem Führungsinformationssystem des Schiffes.

Die auf Führungsinformationssystem-Ebene fusionierten Informationen werden über etablierte interoperable Datenverteilungsmechanismen wie MARSUR oder Coalition Shared Data (CSD) den höheren Führungsebenen, also insbesondere den maritimen Operationszentren (engl. Maritime Operation Center, MOC) auf nationaler und EU-Ebene, zur Verfügung gestellt. Diese sind somit unmittelbar mit den operativen Kommandos und Einheiten verbunden, wobei jeweils konfigurierbar ist, welche Daten in welcher Informationstiefe an wen kommuniziert werden.



Abb. 3: Ein WaterStrider auf Mission

Das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, IOSB, leitete das Arbeitspaket „Technologieentwicklung und simulierte Übungen“, in dem es Algorithmen zur Datenfusion und Tracking sowie zur automatischen Schiffsdetektion in Videodaten entwickelte sowie seine Lage-darstellungssoftware DigLt weiterentwickelte und an die Bedürfnisse von OCEAN2020 anpasste. Diese Anteile wurden zu einem experimentellen Führungsinformationssystem integriert (Abb. 1). Die Ergebnisse des Arbeitspaketes, an dem 20 Projektpartner beteiligt waren, wurden in einer Reihe von simulierten Übungen erprobt. Parallel dazu entwickelte das Fraunhofer IOSB einen Schwarm autonomer, unbemannter Wasserfahrzeuge, WaterStrider, und ein autonomes Unterwasserfahrzeug DEDAVE2000.

Diese sowie das experimentelle Führungsinformationssystem wurden im August 2021 an Bord des Forschungsschiffes PLANET der WTD 71 zum Abschluss des Projektes in einer Live-Demonstration in der Ostsee vorgeführt (Abb. 2 und Abb. 3). Das bei der Live-Demonstration erzeugte Lagebild wurde mittels eines Prototyps eines EU Maritime Operation Centers, der vom IOSB zusammen mit einem weiteren Projektpartner erstellt worden war, in Brüssel bei der EDA vorgestellt (Abb. 4).



Abb. 4: Präsentation des Live-Trials anhand des Prototyps EU Maritime Operation Center in Brüssel

Dr. Steffen Bauer  
Fraunhofer-Institut für Kurzeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

## Werkstoffmechanik des endballistischen Versagens von transparenten Schutzwerkstoffen bei Beschuss

Das Fraunhofer-Institut für Kurzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut EMI erforscht, wie der transparente Schutz von gepanzerten Fahrzeugen gegen ballistische Bedrohungen durch eine tiefere Analyse der dynamischen Impactprozesse mittels numerischer Simulationen gesteigert werden kann. Zur Verbesserung aktueller werkstoffmechanischer Modelle wurden neue Charakterisierungsmethoden für spröde Werkstoffe entwickelt.

Eine transparente Panzerung muss die Insassen vor ballistischen Projektilen schützen und dabei hohe Anforderungen an die optischen Eigenschaften erfüllen. Das Fraunhofer EMI erforscht neuartige Ansätze und Methoden zur wissenschaftlich fundierten Optimierung der transparenten Panzerung hinsichtlich Schutzwirkung, Gewicht und insbesondere Dicke, was ebenfalls für die erzielbaren optischen Eigenschaften von Vorteil ist. Für ein Verbundsicherheitsglas als transparentes Schutzsystem sind eine geeignete Kombination von spröden und duktilen Materialien (Gläser, Keramiken, Klebstoffe, Kunststoffe) sowie die optimale Wahl der einzelnen Lagendicken notwendig.

Hierbei ist die Prognosefähigkeit numerischer Simulationen auf der Basis aktueller Werkstoffmodelle noch nicht hinreichend. Aus diesem Grund wurden am Fraunhofer EMI bestehende Charakterisierungsmethoden für spröde und insbesondere transparente Schutzwerkstoffe weiterentwickelt. Der Fokus aktueller Arbeiten liegt hierbei auf Impactszenerarien gegen Lamine aus Kalk-Natron-Glas als transparenten Schutzwerkstoff, allerdings sind die entwickelten Methoden zukünftig auch auf andere spröde Materialien anwendbar.

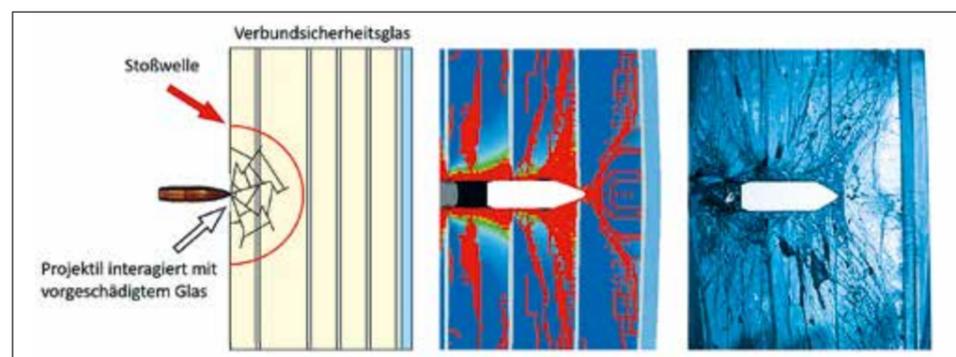


Abb. 1: Links: Aufbau des transparenten Schutzzelements mit Lagen einstellbarer Dicke von Glas (gelb), Klebschichten (grau) und einer Abschlusschicht (blau) zur Unterdrückung von Glassplitterflug. Mitte: Prognose (Simulation) des Versagensverhaltens eines transparenten Schutzzelements für eine exemplarische Lagendickenauswahl bei dem Eindringen eines Projektils. Rechts: Das im Experiment beobachtete Versagensverhalten für das Schutzelement stimmt in wesentlichen Eigenschaften, wie dem Rissverlauf, sehr gut mit der Prognose durch die numerische Simulationsrechnung mit dem werkstoffmechanischen Modell überein

Beim Auftreffen des Projektils, beispielsweise panzerbrechender Munition (AP), werden im Schutzwerkstoff auch sehr schnell propagierende Stoßwellen ausgelöst. Es kommt zu einer Vorschädigung des Schutzwerkstoffs örtlich vor dem eindringenden Projektil (Abb. 1, links). Entscheidend für den ballistischen Widerstand der Schutzanordnung ist daher die Festigkeit dieses vorgeschädigten Materials. Der Grad der Vorschädigung wiederum hängt von der Impactgeschwindigkeit und der Art des Projektils ab. Daher ist die Werkstoffmechanik dieses dynamischen Versagensprozesses auf der Basis einer hinreichenden Charakterisierung und Modellierung des jeweiligen Schutzwerkstoffs detailliert zu beschreiben.

Die vorhandenen Analysemethoden wurden grundlegend überarbeitet und an Werkstoffproben eine umfangreiche hochdynamische Beschusserie bei hohen Auftreffgeschwindigkeiten von bis zu 3000 m/s durchgeführt. Es wurde eine neue Methodik entwickelt, um die Festigkeit von vorgeschädigtem Glas zu charakterisieren. Hierbei wird die Rissdichte in dynamisch geschädigten Glaszylindern in Durchlichtaufnahmen (Abb. 2) und durch Röntgencomputertomografie ermittelt. Anschließend erfolgt die Messung der schädigungsabhängigen Festigkeit der Glasproben in einem weiterentwickelten Druckversuch.

Die Relevanz dieser erweiterten werkstoffmechanischen Beschreibung des endballistischen Versagens konnte bereits für ein gebräuchliches Modell aus der Literatur durch eine erhebliche Steigerung der Modellierungsgenauigkeit für ein exemplarisches ballistisches Szenario mit Starrkörperpenetration (AP-Munition) gegen ein Verbundsicherheitsglas demonstriert werden (Abb. 1, Mitte und rechts). Die große Herausforderung

liegt hier in einer Modellbeschreibung, um das dynamische Versagensverhalten des Glases physikalisch korrekt für verschiedene Annahmen wie Lagenausführung, Glasausführung, Projektilausführung und Auftreffbedingungen, wie z. B. die Projektilgeschwindigkeit, präzise vorhersagen zu können.

Mit derartigen prognosefähigen numerischen Simulationsmodellen sollen zukünftig die Einflüsse der verschiedenen Parameter effizient untersucht werden, um neue Schutzanordnungen hinsichtlich Gewicht, Dicke und Schutzniveau zu optimieren. Hierzu werden in weiterführenden Untersuchungen verschiedene Glassorten mit den neu entwickelten Methoden charakterisiert und die Konzepte in erweiterter Form auch auf transparente Keramiken angewendet.

Mit den neuen werkstoffmechanischen Modellen soll zudem untersucht werden, auf welche Weise sich die Wirksamkeit transparenter Panzerungen gegen Infanteriemunition, beispielsweise durch das Hinzufügen von Frontschichten aus transparenter Keramik, steigern lässt. Weiterhin wird das Potenzial einer Gewichtseinsparung durch höhere Kunststoffanteile untersucht. Zur Steigerung der Mehrfachtreffersicherheit werden Simulationsstudien mit multiplem Projektilimpakt durchgeführt und der Einfluss der Vorschädigung der Panzerung numerisch untersucht.

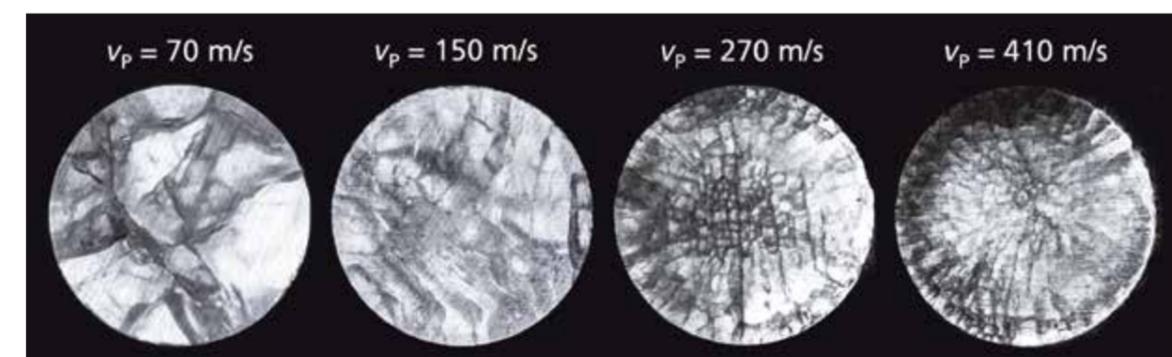


Abb. 2: Experimentelle Durchlichtaufnahmen von dynamisch geschädigten Glaszylindern. Das verbesserte werkstoffmechanische Modell für Schutzglas ermöglicht eine genauere Beschreibung der beobachteten Rissdichten, die mit steigender Impactgeschwindigkeit signifikant zunehmen

## Werkstoffdesign für Anwendungen in der Ballistik am Beispiel von 3D-gedrucktem Wolfram-Komposit

3D-Druckverfahren bieten das Potenzial, neue Werkstoffe auch als Verbundwerkstoffe für die jeweilige Anwendung zu designen. Dies gilt für den jeweiligen Grundwerkstoff und darüber hinaus für dessen lokale Eigenschaften. Beispielsweise kann beim selektiven Laserschmelzen (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) für Metalle durch die örtliche Variation der Laserstrahlintensität der generierte Werkstoff strukturiert werden. Auf diese Weise können Funktionen direkt in Bauteile integriert werden.

Für ballistische Anwendungen sind Werkstoffe mit besonders hoher Dichte von Interesse, da in besonders relevanten Geschwindigkeitsbereichen das Penetrationsvermögen bei identischer Impaktgeschwindigkeit mit der Werkstoffdichte ansteigt. Eine Voraussetzung ist jedoch eine ausreichende Festigkeit des Werkstoffs. Reines Wolfram hat zwar eine der höchsten Dichten aller Elemente, weist jedoch ein sprödes Bruchverhalten auf. Aus diesem Grund werden für ballistische Anwendungen Wolframschwermetalle verwendet, bei denen Wolframpartikel in eine Matrix aus Nickel-Eisen oder Nickel-Kupfer eingebettet sind. Auf diese Weise werden im Verbundwerkstoff sowohl sehr hohe Dichten als auch die notwendige Duktilität und Festigkeit erreicht.

Solche Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe (metal matrix composites, MMCs) können auch in 3D-Druckverfahren wie dem LPBF-Verfahren erzeugt werden. Durch die Einstellung der Pulveranteile von Wolfram und dem Matrixwerkstoff, für den beispielsweise Stahl zum Einsatz kommen kann, kann die Dichte des resultierenden MMCs definiert werden. Im additiven Fertigungsprozess wird dann mittels Laserenergie der Matrix-



Abb. 1: Dieses Beispiel eines 3D-gedruckten Stahl-Wolfram-MMCs zeigt eine hohe erreichbare relative Dichte und eine gleichmäßige Mikrostruktur

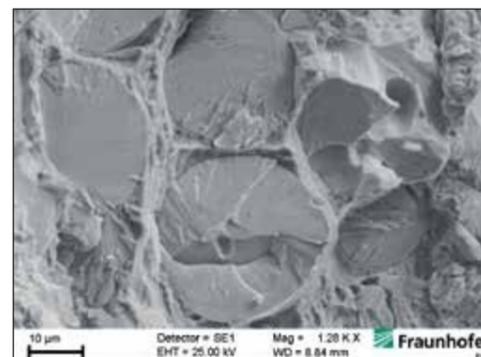


Abb. 2: Die Aufnahme eines Stahl-Wolfram-Kompositwerkstoffs mit einem Rasterelektronenmikroskop zeigt Bruchflächen von Verstärkungspartikeln nach Spaltung im Zugversuch

werkstoff aufgeschmolzen, der die Wolframpartikel umschließt und anschließend wieder erstarrt (Abb. 1). Im Vergleich zu reinem Wolfram kann auch hier eine erhöhte Festigkeit und Duktilität erreicht werden (Abb. 2).

Das 3D-Druckverfahren ermöglicht eine endkonturnahe Herstellung auch von komplexen Bauteilen, wodurch die aufwendige Verarbeitung von Halbzeugen entfällt.

Durch eine gezielte Parameterführung im LPBF-Prozess ist es zudem möglich, die Werkstoffeigenschaften lokal zu beeinflussen. Hierdurch können Bauteilfunktionalitäten im strukturellen Aufbau direkt integriert werden. Ein Beispiel hierfür stellt ein Bauteil dar, das beim Anliegen hoher Drücke kontrolliert fragmentieren soll. Dies kann einerseits durch eine geometrische Formgebung mittels Kerbungen erreicht werden (Abb. 3, links).

Andererseits können beispielsweise durch lokal verringerte Laserstrahlleistungsdichten gezielt Bereiche unvollständiger Metallpulveraufschmelzung erzeugt werden, wodurch eine zylindrische Innenwandgeometrie beibehalten werden kann. Diese definierten, schwächeren Werkstoffbereiche fungieren dann unter Druckbelastung als Sollbruchstelle (Abb. 3, rechts).



Abb. 3: Beispiele für die Integration von Bauteilfunktionalität in den strukturellen Aufbau. Links: Kerbungen sorgen für eine kontrollierte Fragmentierung beim Anliegen hoher Drücke. Rechts: Erzeugung von Sollbruchstellen durch unvollständige Aufschmelzung des Metallpulvers durch lokal verringerte Laserstrahlleistungsdichten

Das Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI baut hier für die jeweiligen Anwendungsgebiete ein Technologieportfolio für die additive Fertigung von wehrtechnisch relevanten Werkstoffen auf, um damit innovative Lösungskonzepte zu ermöglichen.

Stefan Brüggewirth  
 Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR  
 Wachtberg

Daniel O'Hagan  
 Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR  
 Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

info@fhr.fraunhofer.de

## Intelligente, vernetzte HF-Sensorik

**Kohärent vernetzte HF-Sensorik bietet viele Vorteile für moderne Sensornetze. Kognitives Radar ermöglicht die kontinuierliche Optimierung des Senders, etwa zur Synchronisierung und Parametrisierung von multistatischen Moden. Am Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR werden intelligente, vernetzte HF-Sensoren seit vielen Jahren erforscht und experimentell validiert. Diese Technologien werden nun wesentliche Bestandteile aktueller Beschaffungsvorhaben.**

Der „System-of-Systems“-Gedanke spielt bei vielen aktuellen Beschaffungsvorhaben der Bundeswehr, wie etwa FCAS oder MGCS, eine zentrale Rolle. Verteilte Sensorsysteme bieten durch Vernetzung ein umfassenderes und präziseres Lagebild gegenüber Einzelsensoren. Im Bereich der Radar- bzw. multifunktionalen Hochfrequenz (HF)-Sensorik ermöglichen multistatische Ansätze zusätzliche Leistungssteigerungen durch kohärente Signalverarbeitung zwischen den Sensorknoten.

Das Fraunhofer FHR befasst sich seit vielen Jahren durch Grund- und Projektfinanzierung mit der Erforschung der erforderlichen Front-End-Technologie, der Algorithmik und dem Aufbau von Experimentalsystemen. Insbesondere luftgestützte multistatische HF-Systeme werden zukünftig eine wichtige Rolle spielen, da sie aufgrund der räumlichen Trennung von Sender- und Empfänger für gegnerische EloKa-Systeme schwer aufzuklären sind.

Im Gegensatz zu traditionellen monostatischen Radarsystemen erfordert die Auftrennung der Sende- und Empfangskomponente nach dem Super-Heterodyn-Prinzip eine regelmäßige

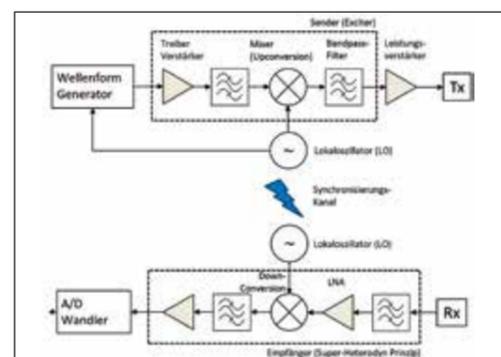


Abb. 1: Front-End-Aufbau eines Bi-Statistischen Radars



Abb. 2: Flugversuche zur Synchronisierung von HF-Sensoren

Synchronisierung der Lokoszillatoren (Abb. 1). Am Fraunhofer FHR werden „over-the-air“-Synchronisierungsverfahren entwickelt, welche die erforderlichen Genauigkeiten im Bruchteil einer Wellenlänge erreichen und für den Gegner schwer zu entdecken sind. Ende 2020 wurden wesentliche Synchronisierungs- und Signalverarbeitungsverfahren am Flugplatz Mönchshöhe durch Radarsysteme am Boden sowie einem luftgestützten Empfänger am institutseigenen Ultraleichtflugzeug „Delphin“ experimentell validiert (Abb. 2).

Ein kognitives Radarsystem zeichnet sich durch die kontinuierliche Adaption und Optimierung der Sendeparameter an Mission und Umgebung aus. Das Radar-Ressourcen-Management steuert dabei die zeitliche Abfolge von Zielbeleuchtungen, wählt optimale multistatische Moden aus und stellt die hinreichende Synchronisierung der Empfänger sicher (Abb. 3). Häufig kommen dazu Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz zum Einsatz.

Auch die Identifizierung nicht-kooperativer Ziele profitiert von multistatischen Ansätzen, da das Ziel von unterschiedlichen Aspektwinkeln aus gesehen wird, und dieser Informationsgewinn zu höheren Identifizierungsleistungen führt. In den letzten Jahren wurden deshalb am Sensortragebogen der WTD 91 in Meppen sowie auf der Drehplattform am FHR Vermessungen

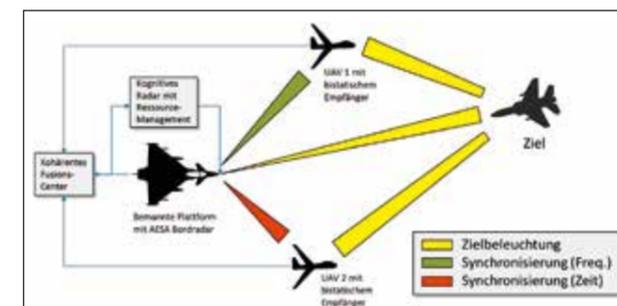


Abb. 3: Systemkonzept eines kognitiven, multistatischen Radars

bistatischer Bodenzielsignaturen vorgenommen (Abb. 4). Im 2021 abgeschlossenen EDA-Vorhaben COGITO (COGnitive Radar for Enhanced Target RecognITiOn) konnte der Mehrwert eines solchen Ansatzes europaweit erstmalig experimentell nachgewiesen werden.

Die Kombination kohärenter Vernetzung mit Ansätzen des kognitiven Radars bietet vielfältige Möglichkeiten für zukünftige verteilte HF-Sensorsysteme der Bundeswehr. Das FHR ist bereits mit Industrie und Behörden im Gespräch, um diese innovative Technologie für die aktuellen Beschaffungsvorhaben FCAS und MGCS verfügbar zu machen.



Abb. 4: Bi-Statistische Vermessung von Bodenzielen am FHR

Dr.-Ing. Marcel Baltzer  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung  
 und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Daniel López  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung  
 und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

## Agiles Entwickeln und Überprüfen von Waffensystemen mit begreifbarer erweiterter Realität (tangible XR)

**Der aktuelle Fortschritt von Technologien und der Einsatz von künstlicher Intelligenz werden begleitet von sich ändernden Anforderungen an die Bedienbarkeit künftiger Waffensysteme. Human Systems Integration und agile Methoden ermöglichen, darauf effizienter zu reagieren. Dazu können Methoden erweiterter Realität (XR) durch haptische Elemente ergänzt werden und neue Systeme begreifbarer machen.**

Durch die Komplexität moderner Waffensysteme, die auch durch den Einsatz von KI erhöht wird, stellt sich deren (Weiter-)Entwicklung aufwendig sowie kosten- und zeitintensiv dar. Balanced Human Systems Integration (HSI) kann diese in Kombination mit agilen Methoden deutlich effizienter, sicherer und kostengünstiger gestalten. Balanced HSI ist eine Disziplin, die sich mit der Integration von Organisation, Technologie und Mensch zu ausbalancierten Systemen befasst. Entscheidend ist dabei die richtige Balance der auftretenden Spannungsfelder zu finden, z. B. zwischen Schutz und Situation Awareness (inkl. Außensichten), zwischen Informationsangebot und Überforderung, Reaktionsschnelligkeit (Fighting at machine speed) und Kontrollierbarkeit. Um Chancen und Risiken bereits früh in der Entwicklung adressieren zu können, bietet sich der Einsatz agiler Methoden und von Simulation an. Neben den herkömmlichen Simulationen können neue Simulationstools und -verfahren zum Untersuchen und Gestalten der Kooperation und Interaktionen zwischen Mensch und Maschine genutzt und Empfehlungen für die Arbeitsplatzgestaltung gegeben werden.

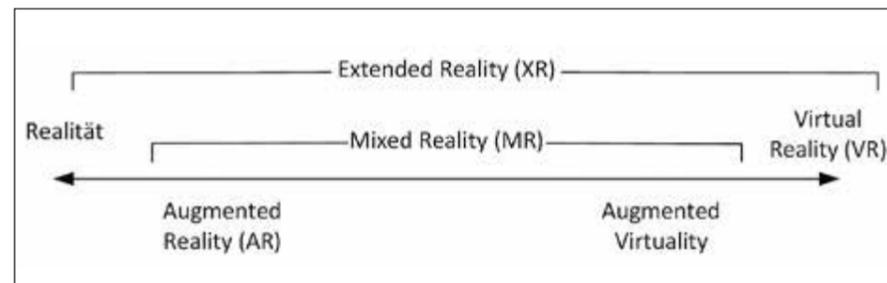


Abb. 1: Vereinfachtes Realität-Virtualität Kontinuum nach Milgram, P., & Kishino, F, 1994, hier erweitert um Extended Reality

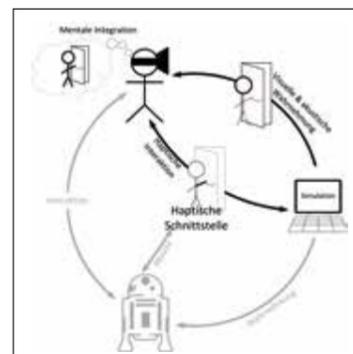


Abb. 2: Regelkreis der Tangible XR nach Flemisch et al. 2020 und López et al. 2020

Konrad Bielecki  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung  
 und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Frank Flemisch  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung  
 und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

In der Vergangenheit haben sich dazu verschiedene Verbindungen von künstlichen und realen Inhalten entwickelt. Die Virtual Reality (VR) beschreibt dabei einen Gegenpol zur Realität, indem eine vollständig künstliche Welt simuliert wird. Innerhalb dieses Realität-Virtualität-Kontinuums (s. Abb. 1) befindet sich die Mixed Reality (MR). Einerseits kann eine Anreicherung der Realität um künstliche Inhalte (Augmented Reality, AR) stattfinden, z. B. durch Hervorhebungen von Points of Interest, stattfinden. Andererseits kann eine Anreicherung der VR mit realen Inhalten, wie z. B. das Einblenden der realen Hände, erfolgen (Augmented Virtuality). Als Dachbegriff für diese Technologien wird mittlerweile Extended Reality (XR) verwendet, welche als übergeordnetes Konzept alle realen und virtuellen Inhalte umschließt.

Tangible XR (s. Abb. 2) ist eine Methodik, die übliche visuelle und akustische Darstellung um haptische (tangible) Interaktion zu erweitern, womit Sachverhalte sowohl physisch als auch kognitiv besser und schneller begreifbar werden. Sie wurde eingesetzt, um eine Sichtmittelverbesserung im Projekt SPz PUMA strukturiert zu analysieren und Empfehlungen für die Weiterentwicklung geben zu können. Abb. 3 zeigt hier die Interaktionen in der Realität, Abb. 4 die Entsprechung in der VR. Insbesondere wird hier auf die Erweiterung des aktuellen SPz PUMA Fahrerarbeitsplatzes um Bildschirme, die als Kamera-

Monitor-System lediglich in der VR integriert wurden (s. Abb. 4), hingewiesen. Diese virtuellen Bildschirme können nun agil vergrößert oder anders positioniert werden. Dabei kann direktes Feedback zu Öffnungswinkel, Bildschirmgröße, Position etc. gegeben werden. Weiterhin kann untersucht werden, welche Bildschirm- und Kameraanordnungen bspw. für das Rückwärtsfahren oder die 360°-Nahfeldbeobachtung sinnvoller sind.

Über den direkten Fahrzeugbezug hinaus bietet sich diese Methodik für zukünftige Waffensysteme wie dem Future Combat Air System (FCAS) oder dem Main Ground Combat System (MGCS) an. Hierbei kann frühzeitig die Bewertung technischer und nicht-technischer Anforderungen auf Basis von Nutzerstudien und Explorationen mit den entsprechenden Ansprechpartnern unterstützt werden, wodurch insgesamt gut ausbalancierte leistungsfähige und kostengünstigere Waffen- und Verteidigungssysteme realisiert werden können.



Abb. 3: Nutzer, der mit dem Hardware Mock-up interagiert, wobei der Winkelspiegel die tangible Schnittstelle darstellt



Abb. 4: Darstellung der Nutzer-Interaktion in der VR Simulation, wobei sich der Winkelspiegel aufgrund der physischen Interaktion verdreht

## Sensordatenfusion und Ressourcenmanagement als Kernfunktionen für FCAS/NGWS

Das Next Generation Weapon System (NGWS), eingebettet in ein Future Combat Air System (FCAS), kann zur Blaupause wehrtechnischer Systeme werden, in denen Informationsüberlegenheit und Entscheidungshoheit zentral sind. Der Beitrag umreißt Forschungsergebnisse für Sensordatenfusion und Ressourcenmanagement, die zu Schlüsseltechnologien werden und u. a. Methoden der Künstlichen Intelligenz nutzen.

FCAS/NGWS steht für das ambitionierteste europäische Verteidigungsprojekt der kommenden Jahrzehnte. Ab 2040 wird es zum Pfeiler einer europäischen Sicherheitsarchitektur. Konkret geht es bei NGWS um einen Verbund aus Kampfflugzeugen neuester Generation, unbemannten Flugsystemen sowie bestehender und noch zu entwickelnder Systeme.

Relevante Daten eines solchen System-of-Systems fließen in eine *Combat Cloud*, den Kern eines FCAS, werden verteilt, verifiziert, organisiert, evaluiert, verarbeitet und fusioniert. Zugleich verknüpfen derartige *Backbones* die verschiedenen militärischen Dimensionen im Sinne von *Joint All Domain Operations* (JADO). Zulieferer dieser Informationsarchitektur für Datenbuchhaltung und Steuerung sind Subsysteme wie Plattformen, Sensoren, EloKa, Kommunikation oder Wirkmittel.

In dieser Technosphäre unterstützen kognitive Maschinen durch künstlich intelligente Automation menschliche Intelligenz und Autonomie, die sie weit über natürliches Maß steigern und Informationsüberlegenheit sowie Entscheidungshoheit



Abb. 1: FCAS *Combat Cloud* – Sensorfusion und Ressourcenmanagement für Manned-Unmanned Teaming (MuM-T) in Kampf- und Aufklärungsmissionen

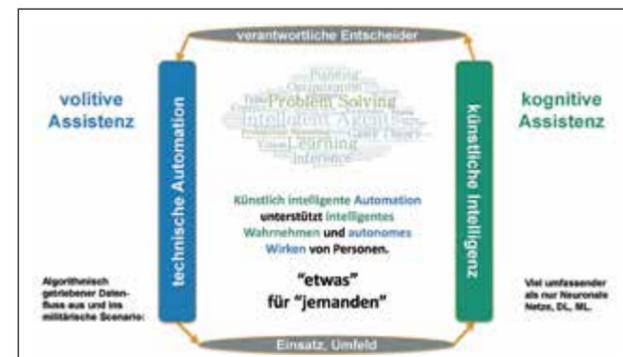


Abb. 2: Algorithmische Assistenz für den Verstand und Willen verantwortlicher Entscheider im Kontext eines FCAS-System-of-Systems

ermöglichen. Angetrieben werden sie durch Datenfusion und Ressourcenmanagement. Sie erstellen Lagebilder, automatisieren Wirkungsketten und steuern Sensoren, Plattformen sowie Wirkmittel. Dies legt die Basis für *Manned/Unmanned Teaming* (MUM-T).

Forschungsergebnisse, die im Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE erarbeitet wurden, tragen dazu bei, massenhaft einströmende Sensordaten auszuwerten, komplexes Kontextwissen mit aktuellen Daten zu fusionieren, sich ergänzende und verschiedenartige Sensoren zu verknüpfen, die Plausibilität der gewonnenen Information abzuschätzen, zielentsprechende Wirkungsoptionen, ggf. basierend auf mobilen und interagierenden Plattformen, anzubieten und dabei den ethischen Wirkungsrahmen zu respektieren. Schließlich müssen sich kognitive Maschinen den Nutzern anpassen, damit diese tun können, was sie nur als Menschen können, nämlich bewusst wahrnehmen und verantwortlich wirken.

Eine Schwachstelle ist Datenintegrität. Im Fraunhofer FKIE erforschte Methoden beantworten systemtechnische Fragen: Sind die Sensor- und Kontextdaten korrekt und entsprechen Datenfehler den Annahmen über sie? Denn bei verletzter Datenintegrität wird aus Fusion leicht Konfusion. Zudem erzeugen Algorithmen stets auch Artefakte, Dinge, die es in Wirklichkeit nicht gibt, oder weisen „blinde Flecken“ auf. Zu nennen sind auch EloKa und die Cyberbedrohung, die Übernahme von Sensoren oder Subsystemen durch Gegner, die dann „böartig“ werden, täuschende Daten liefern oder sich gegen den Nutzer wenden. Zu fordern ist daher von zulassbaren Systemen eine Fähigkeit zur „Selbstkritik“.

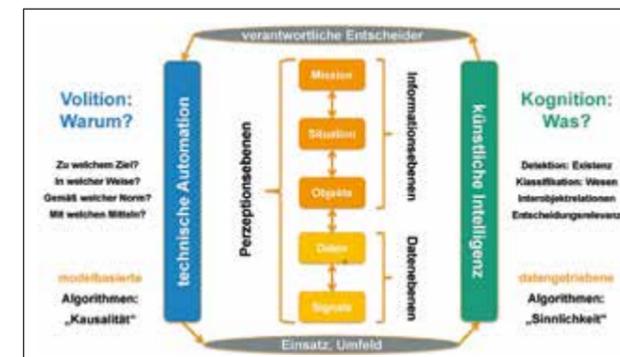


Abb. 3: Perzeptionsebenen der datengetriebenen und modellbasierten Assistenz im FCAS-Verbund

Aber auch Nutzer müssen Künstlicher Intelligenz gegenüber kritikfähig bleiben. Sonst entsteht die Gefahr freiwilliger Unterordnung, blinden Vertrauens und kritikloser Akzeptanz der Angebote, die mentale Weigerung, Verantwortung tatsächlich zu tragen. Ergonomische Forschungsergebnisse des FKIE tragen dazu bei, dass KI-basierte Systeme die Wachsamkeit ihrer Nutzer trainieren und ihnen ein *Tell me why?* für Lösungsangebote vermitteln. Denn nur menschliche Intelligenz vermag Plausibilitäten einzuschätzen, tatsächlich Verständnis zu entwickeln.

Zentral bleiben modellbasierte Algorithmen für logisches Schließen auch bei unscharfen Ausgangsdaten, die wahrscheinliche Kausalstrukturen aufdecken. Zugleich ermöglicht *Bayesian Learning*, wie es im FKIE erforscht wird, ein systematisches Algorithmen-Design, in das Kontextinformation und Expertenwissen explizit integrierbar sind. Da die Modellierung oft zu komplex ist, bleiben datengetriebene Algorithmen wie *Deep Learning* unverzichtbar. Also liegt es nahe, beide Ansätze zu verknüpfen und *Explainable Artificial Intelligence* (XAI) zu erforschen.

Viele Fragen sind noch unbeantwortet. Dennoch legt das Fraunhofer FKIE schon jetzt wissenschaftliche Grundlagen für die Zertifizierung und Qualifizierung von FCAS-Subsystemen.

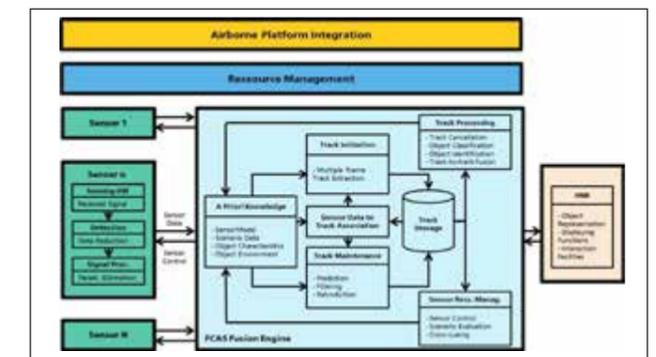


Abb. 4: FCAS-Fusion-Engine, von Industrie und Forschung im Rahmen des FCAS-Masterplan entwickelt

Dr.-Ing. Marian Lanzrath  
Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

Dr. rer. nat. habil. Michael Suhrke  
Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

## Abwehr von autonomen Kleindrohnen und Drohnenschwärmen – Einsatzmöglichkeiten von High Power Electromagnetics (HPEM)

Von Unbemannten Flugsystemen (UAS) geht ein zunehmendes Bedrohungspotenzial im militärischen und zivilen Kontext aus. Schon Kleindrohnen (sUAS) verfügen heute über erweiterte Automatikfunktionen, die bisherige Abwehrlösungen ineffektiv machen. Zur Beurteilung der Anwendbarkeit von HPEM-Wirksamkeit wurden hierzu Verwundbarkeitsuntersuchungen an einer Vielzahl von aktuellen sUAS durchgeführt.

Kleine unbemannte Flugsysteme mit einem Abfluggewicht bis 25 kg (auch small oder sUAS genannt) erfreuen sich zunehmender Beliebtheit bei zivilen und militärischen Anwendern. Neben der Verwendung der sUAS als fliegende Kamera in Industrie, Medien und privatem Umfeld finden sie auch zunehmend Anwendung bei Behörden, Ordnungskräften und Militär. Hier sind vor allem die Lagebilderstellung aus der Luft und die verdeckte Beobachtung von Zielpersonen oder Einrichtungen relevant. Getrieben durch die hohen Absatzzahlen werden in regelmäßigen Abständen neue Modelle (Abb. 1), Zusatzausstattungen und Funktionalitäten von den Herstellern zur Marktreife gebracht.

Wie sich in den letzten Jahren gezeigt hat, nutzen aber auch zunehmend kriminelle und terroristische Vereinigungen gängige zivile sUAS für ihre Zwecke, beispielsweise als flexible und schnelle Angriffsmittel mit adaptierten kinetischen Waffen. Weitere Beispiele sind der Transport von IEDs (Improvised Explosive Devices) durch den Islamischen Staat (IS) in Afghanistan und die Observierung von gegnerischen Stellungen und Einsatzkräften.



Abb. 1: Exemplarische Aufstellung von handelsüblichen zivilen sUAS im Jahr 2020



Abb. 2: Musterbeispiel einer mobilen HPEM-Quelle, dankenswerterweise zur Verfügung gestellt vom Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz (Quelle: WIS, Munster)

Dr. Thorsten Pusch  
Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

Martin Schwarz  
Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie  
und Elektronik WTD81  
Greding

wtd81410@bundeswehr.org

Sowohl der Einsatz in akuten Konflikten als auch die Ausspähung von sensiblen Einrichtungen der Bundeswehr im In- und Ausland ergeben einen signifikanten Bedarf nach geeigneten Abwehrmaßnahmen für unbemannte Flugsysteme der sUAS-Kategorie. Bislang wird vorrangig durch Hochfrequenz-Jammer eine Unterbindung der Fernsteuerung erreicht, weitere Konzepte sehen die Täuschung der Satellitennavigation durch Spoofing vor. Eher physisch gehen robuste Abwehrohren durch direkte Kollision mit dem Ziel vor, es können auch Netzwerfer aus der Luft oder vom Boden aus verwendet werden.

Wie die jüngsten Entwicklungen im Bereich der Automatikfunktionen der sUAS zeigen, werden die genannten Abwehrsysteme zunehmend an Wirksamkeit verlieren. Es sind bereits sUAS verfügbar, welche ohne Satellitennavigation oder Fernbedienungsverbindung auskommen. Sie führen, basierend auf bildgestützter Navigation oder rein mit inertialer Sensorik, autonome Flüge und Ausweichmanöver durch, weswegen Jamming und Spoofing hier nicht mehr greifen. Die genannten Entwicklungen ermöglichen auch den Einsatz von sUAS in Drohnenschwärmen, sowohl zentral koordiniert und per Funk gesteuert als auch bestehend aus geclusterten autonom fliegenden sUAS, wodurch Abwehrohren und Netzwerfer ineffektiv werden. Diesen veränderten Rahmenbedingungen muss mit erweiterten Abwehroptionen begegnet werden.

Aussichtsreich sind Abwehrsysteme die auf elektromagnetischen Hochleistungsfeldern (HPEM) basieren (Abb. 2). Durch die quasi instantane Einwirkung auf die Elektronik eignen sich HPEM-Abwehrsysteme auch zur Bekämpfung von autonom fliegenden sUAS und Drohnenschwärmen. Die Ergebnisse von eigenen F&T-Studien der letzten Jahre zeigen eine gute Wirksamkeit der HPEM-Signale zur Abwehr der auf dem Markt verfügbaren sUAS. In umfangreichen Labortests wurde die Verwundbarkeit der sUAS gegenüber HPEM-Störsignalen erfasst und evaluiert (Abb. 3). Basierend auf den Erkenntnissen der Studien konnten Quellenparameter identifiziert werden, welche auf hohe Wirkdistanz hin optimiert werden können.

Auf Grund des breiten Spektrums an verfügbaren sUAS-Modellen auf dem zivilen und dem militärischen Markt basieren Erfolg versprechende Abwehrkonzepte auf einem Multi-Sensor-Detektionssystem mit Objektklassifizierung, welches den zielgenauen Einsatz eines Multi-Aktuator-Abwehrsystems unter Einbezug eines HPEM-Wirkmittels ermöglicht.



Abb. 3: HPEM-Verwundbarkeitsuntersuchungen an einem UAS in einer Absorberkammer

Dr Stefan K. Höffgen  
Fraunhofer Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

Dorothea Wölk  
Fraunhofer Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

## Untersuchung der Empfindlichkeit moderner selbstsperrender GaN-Leistungshalbleiter auf hochenergetische Neutronen

Selbstsperrende GaN HEMTs (HEMT: high electron-mobility transistor) werden einen hohen Stellenwert für die Mobilität, insbesondere auch für die „postfossile“ Bundeswehr, haben. Es wurden die ersten drei kommerziell verfügbaren Transistoren dieses Typs auf ihre Empfindlichkeit gegenüber Zerstörung durch hochenergetische Neutronen untersucht.

Schon seit einiger Zeit versucht man die gestiegenen Herausforderungen an die Leistungselektronik durch Verwendung von Materialien mit einer größeren Bandlücke als Silizium zu erfüllen. Als geeignete Kandidaten haben sich dabei Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) herausgestellt. Dabei sind Bauteile mit SiC im Prinzip ähnlich aufgebaut wie Silizium Bauteile. Aufgrund der besseren physikalischen Eigenschaften des Materials sind sie jedoch kleiner, schneller, effizienter und robuster als Silizium-Bauteile. Auf GaN basierende Transistoren sind jedoch, anders als die Si- und SiC-Transistoren, lateral aufgebaut unter Ausbildung eines zweidimensionalen Elektronengases, sogenannte High Electron Mobility Transistors (HEMT). Erst vor kurzem ist es gelungen GaN HEMTs zu produzieren, die selbstsperrend sind, eine in der Leistungselektronik notwendige Voraussetzung.

Ausgehend von gegenwärtigen Entwicklungen werden diese Bauteile einen großen Stellenwert auch für die Mobilität in einer „postfossilen“ Bundeswehr haben. Gleichzeitig sind aber gerade bei den für hocheffiziente Elektromotoren notwendigen hohen Spannungen die gesperrten Leistungsbauelemente



Abb. 1: ChipIr Kontrollraum am Rutherford Appleton Laboratory in Großbritannien



Abb. 2: Testboard mit Bauteilen im Neutronenstrahl an ChipIr

empfindlich für ein zerstörendes strahlungsinduziertes Durchbrennen (Single Event Burnout, SEB). Hierbei reicht ein durch die kosmische Höhenstrahlung (oder auch durch eine Kernwaffe) erzeugtes Neutron aus um das Bauteil zu zerstören.

Während bereits einige Publikationen zu der Strahlungsempfindlichkeit von SiC Leistungsbauteilen existieren, gibt es für die Technologie selbstsperrender GaN HEMTs bisher nur wenige Publikationen weshalb sie vom Fraunhofer Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen, INT untersucht wurden. Dazu wurden drei der ersten kommerziell verfügbaren kommerziellen Transistoren gekauft. Zwei dieser Transistoren erreichen das selbstsperrende Verhalten dabei über eine zusätzliche p-dotierte GaN- bzw AlGaN-Schicht unterhalb des Gates. Ein dritter wurde durch einen vorgeschalteten Niederspannungsiliziumtransistor in Kaskodenschaltung selbstsperrend gemacht. Die maximalen Sperrspannungen lagen bei diesen Bauteilen bei 600 V bzw. 650 V. Zum Vergleich wurde auch ein gängiger SiC MOSFET mit vergleichbaren Parametern gekauft.

Erste Tests wurden an der ChipIr Einrichtung am Rutherford Appleton Laboratory in England durchgeführt (Abb. 1 und 2). Hier wird ein Neutronenspallationsfeld mit einem kontinuierlichen Energiespektrum mit einer Maximalenergie von 800 MeV erzeugt, welches die Neutronen aus der kosmischen Höhenstrahlung sehr gut simuliert. Die Neutronenflüsse an der Anlage reichten jedoch nicht aus um unterhalb einer Sperrspannung von 850 V (weit oberhalb der spezifizierten maximalen Sperrspannung) auch nur einen Durchbruch innerhalb mehrstündiger Bestrahlungen zu sehen. Im Falle solch unempfindlicher Bauteile ist es in der Strahlungseffektforschung üblich die Effekte

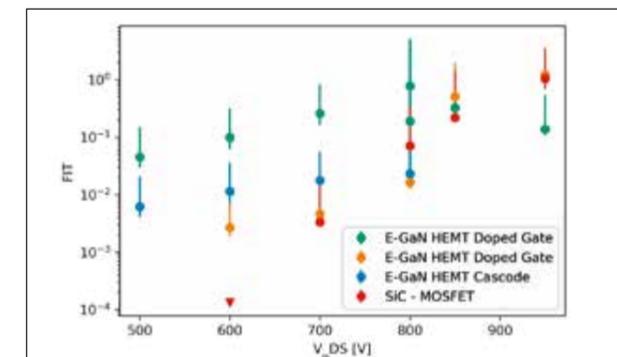


Abb. 3: FIT Raten gegen die Sperrspannungen für die untersuchten Bauteile. Die selbstsperrenden GaN-HEMTs der ersten Generation sind noch empfindlicher als der vergleichbare SiC-MOSFET

hochenergetischer Neutronen mittels eines Protonenstrahls zu untersuchen, da die Kernwirkungsquerschnitte von Neutronen und Protonen ab etwa 50 MeV gleich sind. Dies wurde am 200 MeV Protonenzyklotron der ONCORAY Einrichtung in Dresden durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 3 dargestellt. Hier wurde die FIT Rate (1 FIT gleich ein SEB auf 109 h auf Meereshöhe) gegen die Sperrspannung aufgetragen. Es fallen hier insbesondere zwei Beobachtungen auf. Zum Ersten scheint es keine direkte Abhängigkeit der Art, wie das selbstsperrende Verhalten erzeugt wurde, zu geben, da die Empfindlichkeit des Bauteils mit Kaskodenschaltung zwischen den beiden anderen liegt. Hier scheint die SEB Empfindlichkeit durch andere Designelemente bestimmt zu sein. Zum Zweiten scheinen zumindest die kommerziellen selbstsperrenden GaN HEMTs der ersten Generation noch empfindlicher zu sein als der SiC MOSFET.

Dr. Christian Zech  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

David Schneider  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

## 3D-Echtzeit-Millimeterwellenkamera

**Abbildende Radare zur Detektion kleinster Objekte mit entsprechend geringem Rückstreuquerschnitt (beispielsweise Miniaturdrohnen) gewinnen zunehmend an Interesse. Zur dreidimensionalen Zielortung ist bislang eine hohe Anzahl an Sende- und Empfangskanälen erforderlich. Eine neuartige 94 GHz-Millimeterwellenkamera reduziert den erforderlichen Hochfrequenz-Hardwareaufwand deutlich.**

Klassische Radarsysteme mit nur einem Sende- und Empfangskanal stoßen in der militärischen Anwendung zunehmend an ihre Grenzen: Die zu detektierenden Objekte werden immer kleiner, wendiger und schneller – erste Streitkräfte nutzen bereits Miniaturdrohnen. Zwar können klassische Systeme durch die kohärente Kombination mehrerer Sende- und Empfangskanäle (MIMO-Radar) neben der Entfernung auch die Raumwinkel von Objekten bestimmen, doch sind die zur Erfassung beider Raumwinkel erforderlichen zweidimensionalen Anordnungen mit einem sehr hohen Hardwareaufwand verbunden.

Am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik, IAF wurde erstmals ein Millimeterwellen-Mehrkanalaradar mit einer hybriden Antennenarchitektur um 94 GHz realisiert, das eine digitale Signalerzeugung aufweist und nach dem orthogonalen Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) arbeitet. Das System erreicht eine gleichmäßige Auflösung in beiden Winkeldimensionen, sodass es mit der Abbildungsleistung eines klassischen, zweidimensionalen MIMO-Radars vergleichbar ist, jedoch mit einer deutlich geringeren Anzahl an aktiven Kanälen auskommt. Hierzu werden die Vorteile der hauseigenen Verbindungs-



Abb. 1: Fotografie der mobilen 94-GHz-Echtzeit-Millimeterwellen-Kamera



Abb. 2: Hochfrequenz-Frontend mit jeweils acht Sende- (rechter Teil) und Empfangskanälen (linker Teil)

Dr. Axel Tessmann  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

halbleiter-Transistortechnologie (InGaAs mHEMT) genutzt. Diese bietet beispielsweise sehr hohe Betriebsbandbreiten. Die verfügbare Bandbreite wird in diesem Fall nicht in dieselbe Raumrichtung abgestrahlt und zur Erhöhung der Entfernungsauflösung genutzt, sondern mithilfe einer frequenzsteuerbaren Antenne zur Variation der Abstrahlrichtung eingesetzt. Somit ist für den zweiten Winkel ein eindimensionales MIMO-Array ausreichend.

Aufgebaut ist die realisierte 94-GHz-Millimeterwellen-Radarkamera des Fraunhofer IAF in einem fahrbaren Rack (Abb. 1). In einer oben links angebrachten Box befindet sich die gesamte W-Band-Hochfrequenzelektronik inklusive der zugehörigen Sende- und Empfangsantennen (Abb. 2). Das System verfügt über acht Sende- und acht Empfangskanäle, sodass in der MIMO-Dimension eine Zeile von 64 virtuellen Kanälen aufgespannt wird. Die erzielten Ergebnisse führen dabei sowohl zu einer Auflösung als auch einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis, die einem klassischen zweidimensionalen MIMO-Radar mit einer um den Faktor sechs bis sieben höheren Kanalanzahl entsprechen.

Eine Versuchsmessung von neun jeweils im selben Abstand, jedoch in verschiedenen Winkelsektoren verteilten Radarreflektoren zeigt, wie deutlich Ziele mit der Millimeterwellen-

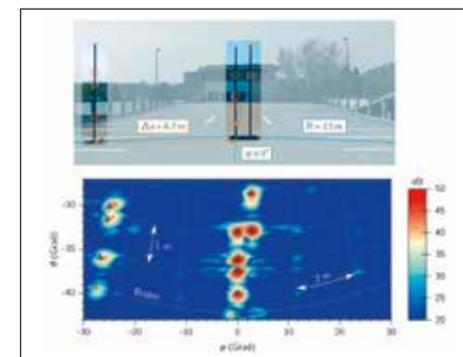


Abb. 3: Fotografie (oben) und Radarbild (unten) einer Szene mit neun Radarreflektoren in verschiedenen Winkelsegmenten

Radarkamera zu erkennen und voneinander zu unterscheiden sind (Abb. 3, die eingezeichneten Dreiecke geben die realen Positionen wieder). Die Winkelauflösungen in beiden Dimensionen unterscheiden sich trotz der unterschiedlichen Mechanismen (frequenzsteuerbare Antennen / MIMO) qualitativ nicht. Ein weiterer Versuch hat ergeben, dass auch die Detektion kleiner Ziele mit entsprechend geringem Rückstreuquerschnitt gelingt, die für bildgebende Radare grundsätzlich eine besondere Herausforderung darstellen. Auf dem Radarbild einer kommerziellen Miniaturdrohne in einer Flughöhe von 10 m und einem Abstand von etwa 32 m zum Radar ist die Drohe sowohl von der Seite (Abb. 4, linker Teil) als auch frontal (Abb. 4, rechter Teil) deutlich zu erkennen.

Je nach Parametrisierung ist das System in der Lage, eine Bildwiederholrate von 5 bis 25 Bildern pro Sekunde zu erreichen. Der Demonstrator eignet sich somit zur mobilen Echtzeit-Bildgebung. Eine zukünftige Anwendung ist beispielsweise zur hochauflösenden Detektion von Geschossen oder Drohnen im nahen bis mittleren Entfernungsbereich, als 3D-Landehilfe unter erschwerten Sichtbedingungen oder zum Schutz von Feldlagern denkbar.

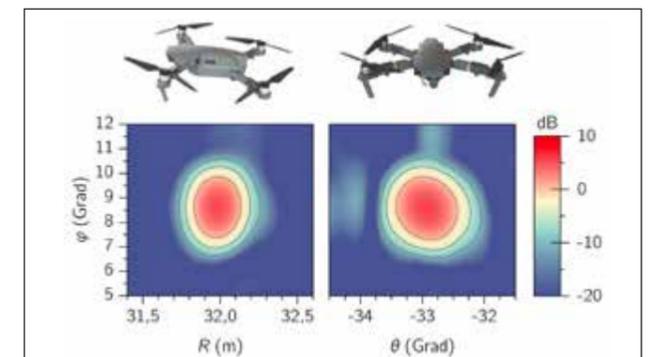


Abb. 4: Detektion einer Kleindrohne im Abstand von 32 m von der Seite (links) und von vorn (rechts)

Dr. Thorsten Passow  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

Dr. Marko Härtelt  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

## Verschränkte Photonenpaare aus miniaturisierten Photonenquellen

**Verschränkte Photonenpaare sind Grundlage für die Quantenbeleuchtung und Quantenkommunikation. Für den praktischen Einsatz in quantentechnologischen Anwendungen außerhalb des Labors sind miniaturisierte Quellen für verschränkte Photonen erforderlich. Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF erforscht daher AlGaAs-basierte Wellenleiter zur Erzeugung von verschränkten Photonen.**

Zu den militärischen Anwendungen für verschränkte Photonenpaare gehören die Quantenbeleuchtung und die Quantenschlüsselverteilung. Bei der Quantenbeleuchtung wird ein verschränktes Photonenpaar getrennt. Das eine Photon wird zum zu detektierenden Objekt gesendet, das andere wird für die Bildgebung verwendet, d. h. es findet keine Wechselwirkung des für die Bildgebung verwendeten Photons mit dem Objekt statt. Dies ermöglicht es, für die Detektion des beobachteten Objektes eine maßgeschneiderte Wellenlänge zu verwenden.

So können z. B. im infraroten Spektralbereich, in dem Effekte durch Streuung und Turbulenz reduziert sind, für die Bildgebung Photonen im sichtbaren Spektralbereich verwendet werden. Dadurch wird Bildgebung auch unter ungünstigen Bedingungen wie Turbulenz, Feuer und Rauch möglich. Zudem erfolgt die Bildgebung im Einzelphotonbereich und ist durch die Quantenkorrelation untergrund- und rauschfrei. Da nur wenige Photonen pro Pixel erforderlich sind, ist die Bildgebung augensicher und ohne das zweite Photon nicht vom Untergrund zu unterscheiden und durch externe Beobachter nicht erkennbar.

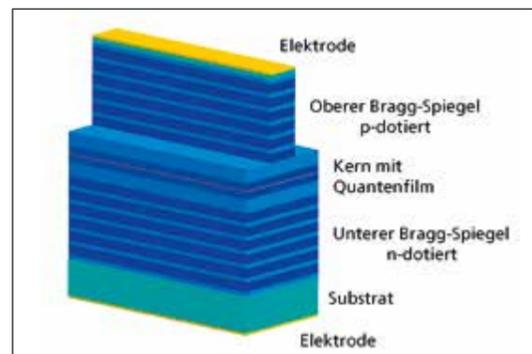


Abb. 1: Schematische Darstellung eines direkt elektrisch gepumpten AlGaAs-Wellenleiters für die Erzeugung von verschränkten Photonenpaaren

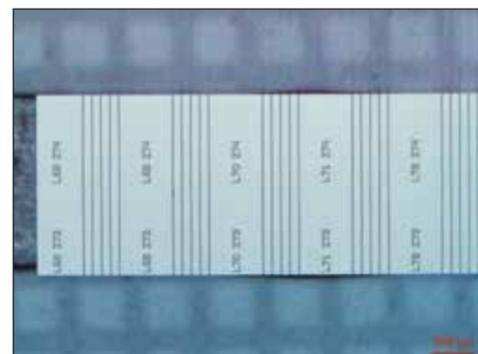


Abb. 2: Bild eines Chips mit AlGaAs-Wellenleitern einer Länge von 2 mm. Die Wellenleiter sind auf dem Chip in Ser-Gruppen angeordnet

Dr. Ralf Ostendorf  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

Bei der Quantenkommunikation, genauer: der Quantenschlüsselverteilung, wird die Verschränkung der Photonen genutzt, den Schlüssel so zu übertragen, dass es aus physikalischen Gründen nicht möglich ist, unbemerkt mitzuhören. Die Sicherheit bei der heute üblicherweise verwendeten asymmetrischen Verschlüsselung mit einem öffentlichen Schlüssel zur Verschlüsselung und einem privaten Schlüssel zur Entschlüsselung, beruht auf der enormen Rechenleistung, die für das Brechen dieser Verschlüsselung erforderlich ist. Die sich aktuell in Entwicklung befindenden Quantencomputer können diese Verschlüsselung dagegen leicht brechen. Bei Verwendung der Quantenschlüsselverteilung würde die Sicherheit dagegen auf physikalischen Grundprinzipien beruhen und damit auch Sicherheit bieten, wenn entsprechende Quantencomputer zur Verfügung stehen. Die Verwendung von verschränkten Photonen für die Quantenschlüsselverteilung erlaubt darüber hinaus auch die Überprüfung der Vertrauenswürdigkeit der Quelle, wodurch Quantenschlüsselverteilung über Satellit möglich wird, ohne anderweitig sicherstellen zu müssen, dass der Satellit nicht kompromittiert wurde.

Verschränkte Photonen werden bereits seit Jahrzehnten im Labor erzeugt und für die Grundlagenforschung genutzt. Derartige Laboraufbauten sind jedoch groß und wenig robust. Ein Einsatz ist weder in der fasergebundenen noch der satelli-

tengestützten Kommunikation oder für die Bedingungen bei der Quantenbeleuchtung im Feld geeignet. Daher erforscht das Fraunhofer IAF mit Förderung durch die Bundeswehr das Design und die Herstellung von auf dem Halbleitermaterial AlGaAs basierenden Wellenleitern (Abb. 1) mit dem Fernziel einer miniaturisierten Quelle für verschränkte Photonen. Die Erarbeitung der Epitaxie- und Prozesstechnologie zur Herstellung der Strukturen ist auf Grund der hohen Anforderungen sehr anspruchsvoll und es werden sehr homogene und anisotrope Strukturierungs- und Ätzverfahren benötigt. (Abb. 2 und Abb. 3) Die verschränkten Photonen entstehen in den AlGaAs-Wellenleitern spontan durch optisches Pumpen (Abb. 4). Dabei ist AlGaAs hervorragend für die Erzeugung verschränkter Photonen im Telekommunikations-Bereich (Wellenlänge bei 1550 nm) geeignet. Das eigentlich Besondere an AlGaAs ist jedoch, dass die benötigten Pump-Laserdioden ebenfalls auf AlGaAs basieren und dadurch eine Integration von Pump-Laserdiode und Wellenleiter auf demselben Chip möglich ist. Dadurch können sehr kompakte und robuste Quellen für verschränkte Photonen realisiert werden.

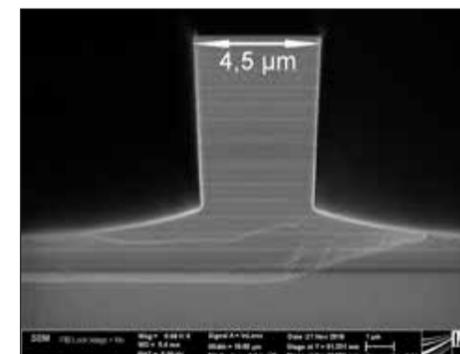


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer gespaltenen Facette eines AlGaAs-Wellenleiters zur Erzeugung von verschränkten Photonenpaaren



Abb. 4: Messaufbau zur Charakterisierung der AlGaAs-Wellenleiter. Pumplicht wird über eine konische Faser in einen Wellenleiter eingekoppelt

## Die Rettungskette der Zukunft

**Das Projekt HPE-STAR (Human Performance Enhancement: Smart Textiles and Augmented Reality) untersuchte, wie ein Human-Biomonitoring-Demonstrator in das Lagebild und ggf. in die Rettungskette integriert werden kann. Es wurde eine Studie mit Schwerpunkt „Human-Biomonitoring“ durchgeführt, an der u. a. die Fraunhofer-Institute für Integrierte Schaltungen IIS, für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM und für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE beteiligt waren.**

Im ersten Schritt wurde herausgearbeitet, in welchen Einsatzszenarios Human-Biomonitoring und Augmented Reality eingesetzt werden können. Dabei stellte sich heraus, dass die Erfassung von Temperaturstress und Verwundungen von besonders hoher Relevanz für die Bundeswehr ist. Aus diesem Grund fokussierte sich das Projekt auf die Integration von Human-Biomonitoring in die Rettungskette. Bei konkreten Einsatzsituationen stehen vor allem die automatische Erkennung von Temperaturstress-Belastungen und Verletzungen, die schnelle Weiterleitung von Notfallmeldungen sowie die unmittelbare Bereitstellung von Echtzeit-Human-Biomonitoring-Daten im Vordergrund. Für die militärische Führung ist dabei die Einsatzfähigkeit der Soldatinnen und Soldaten relevant, für die Mediziner hingegen Aussagen zur Schwere der Verletzungen. Hilfestellungen zur Rettung von Verletzten können über AR-Technologien (Augmented Reality) weitergeleitet werden, um Rettungskräfte vor Ort zu unterstützen. Des Weiteren sind die Human-Biomonitoring-Daten vom Einsatzersthelfer Bravo und medizinischen Personal vor Ort auslesbar.



Abb. 1: Verschiedene funktionale und schützende Ausrüstungskomponenten für den Infanteristen der Zukunft



Abb. 2: Textilintegrierte Sensorik für Human Biomonitoring

Um den Mehrwert von Human-Biomonitoring im Feldexperiment (Abb. 3) aufzuzeigen, wurde ein Demonstrator entwickelt, der aus textilen Komponenten (Smart Textiles), interner Datenaufzeichnung und -verarbeitung über einen Controller, externer Datenweiterleitung und -verarbeitung, Datenvisualisierung und einer Kommunikationsschnittstelle bestand. Der Infanterist bzw. die Infanteristin der Zukunft trägt dazu körpernahe Sensorik zur Erfassung von Human-Biomonitoring-Parametern (Abb. 2). Die Daten werden zunächst intern auf dem Controller gespeichert. Im Falle einer Belastung, Verwundung oder einer Statusabfrage erfolgt eine externe Datenweiterleitung vom Controller an den Gruppenführer vor Ort, den Kompaniechef im Gefechtsstand und den Mediziner in der „Zelle Sanitätsdienst“ sowie das „Patient Evacuation Coordination Centre“ (kurz: PECC). Zur Darstellung der Human-Biomonitoring-Daten wurde eine interaktive Visualisierungsoberfläche für verschiedene Nutzergruppen entwickelt und im Rahmen von mehreren Experimenten evaluiert (Abb. 4).

Zusätzlich wurden körpernahe, akustische, optische oder auch haptische AR-Systeme betrachtet, mit denen Informationen, Warnungen oder Hinweise an den Träger bzw. die Trägerin weitergegeben werden, um deren Situationsbewusstsein (Situational Awareness) zu verbessern. Beispiele sind etwa drohende Dehydrierung des Körpers, drohende Überlastung oder Beschuss.

Darüber hinaus sind auch direkte Rückkopplungssysteme denkbar, z. B. die automatische Thermoregulation durch Kühlen oder Heizen und somit der Schutz vor Überhitzung oder Unterkühlung.



Abb. 3: Notfallszenario mit Erfassung und Weiterleitung von Human-Biomonitoring-Daten



Abb. 4: Visualisierungen für die Zelle Sanitätsdienst

Bei Weiterentwicklungen muss besonders auf eine robuste und nicht-einschränkende Ausführung der körpernahen Technologien sowie ein militärisch gehärtetes Human-Biomonitoring-System geachtet werden.

Konkrete Beiträge der Fraunhofer-Institute bei HPE-STAR waren die körpernahe Human-Biomonitoring-Sensorik-Analyse (Fraunhofer IIS), die Entwicklung des haptischen Feedbackdemonstrators (Fraunhofer IZM und IIS) und der interaktiven Visualisierungsoberfläche (Fraunhofer FKIE). Diese Technologiekomponenten (Abb. 1) und die Projektergebnisse wurden beim VIP-DAY des Planungsamtes der Bundeswehr im Oktober 2021 zahlreichen Teilnehmern vorgestellt. Die Teilnehmenden konnten sich über den aktuellen Stand der Entwicklung informieren und sich mit den Experten vor Ort austauschen. Das Human-Biomonitoring-System mit der Verknüpfung verschiedener technischer Komponenten und Schnittstellen fand Anerkennung bei den Nutzern, da ein solches System derzeit noch nicht vorhanden ist. Ein Nutzer konstatierte, dass dieses System besonders für Landes- und Bündnisverteidigung geeignet wäre. Voraussetzung ist, dass das Human-Biomonitoring-System zukünftig in ein bestehendes Battle Management System integriert wird.

Dipl.-Phys. Sebastian Knapp  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

M. Sc. Fabian Frank  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

## Analyse und Bewertung von Gesundheits- und Umweltaspekten beim Einsatz von Irritationskörpern im Übungsbetrieb

Die Freisetzung von gasförmigen und festen Reaktionsprodukten beim Einsatz von Irritationskörpern im Übungsbetrieb führt zu einer Exposition von Soldatinnen und Soldaten sowie von Übungseinrichtungen. Zur Analyse und Bewertung von Gesundheits- und Umweltaspekten wurde eine Methodik entwickelt, die eine Prognose der zeitlichen und räumlichen Ausbreitung der Reaktionsprodukte in beliebigen Einsatzszenarien ermöglicht.

Die Berücksichtigung von Gesundheits- und Umweltaspekten gewinnt im Übungsbetrieb zunehmend an Bedeutung, um eine Gefährdung von Personen oder die Kontamination von Übungseinrichtungen zu vermeiden. Bisherige Untersuchungen beschäftigten sich dabei mit Tarnnebeln, Treibladungspulvern und pyrotechnischen Simulatoren, wobei sich die experimentellen Untersuchungen auf die Bestimmung der Zusammensetzung der Reaktionsprodukte beschränkten. Über die Menge und die zeitliche und räumliche Ausbreitung der Reaktionsprodukte von Irritationskörpern war bisher wenig bekannt. Ziel der Arbeiten des Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT war es deshalb, eine Methodik zu entwickeln und zu validieren, die eine Prognose für beliebige Einsatzszenarien von Irritationskörpern ermöglicht.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden zunächst mit experimentellen und theoretischen Methoden die gasförmigen und festen Reaktionsprodukte quantitativ nach Zusammensetzung und Eigenschaften hin analysiert. Dazu werden einzelne Irritationskörper in einem 140 Liter Druckbehälter bei konstantem Volumen zur Umsetzung gebracht. Die gasförmigen Produkte werden



Abb. 1: 3D-Tomografie der anfänglichen Schwadenwolke eines Irritationskörpers

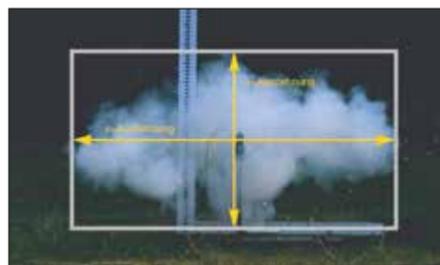


Abb. 2: Vermessung der Ausdehnung der Schwadenwolke eines Irritationskörpers

Dr.-Ing. Sebastian Wurster  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

mittels Gaschromatografie analysiert. Die kondensierten Produkte werden hinsichtlich Partikelgröße und chemischer Zusammensetzung mittels Röntgendiffraktometrie, energie-dispersiver Röntgenspektroskopie, Rasterelektronenmikroskopie und Laserbeugung charakterisiert. Die experimentellen Arbeiten werden gegebenenfalls durch thermodynamische Berechnungen ergänzt, die ebenfalls die Produktzusammensetzung und deren Mengen liefern.

Die Ausbreitung der Schwadengase wird durch Versuche im Freifeld charakterisiert. Dabei werden die Irritationskörper freihängend zur Umsetzung gebracht und die Ausbreitung der Schwadengase mittels Hochgeschwindigkeitskamera erfasst, siehe Abb. 1 und 2. Durch eine entsprechende tomographische Auswertung der Hochgeschwindigkeitsvideos werden das Anfangsvolumen und die anfängliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwadenwolke bestimmt.

Die so bestimmten Eigenschaften der Irritationskörper dienen als Eingabedaten für eine anschließende Modellierung und deren Umsetzung in einem fluiddynamischen Simulationscode. So kann der Einsatz der Irritationskörper unter beliebigen Umgebungsbedingungen, wie der baulichen oder der Belüftungssituation, simuliert werden. Die Simulationen liefern z. B. die räumliche und zeitliche Überschreitung bestimmter Grenzwerte

für einzelne gasförmige oder kondensierte Produktspezies. Diese können mit Informationen aus der Gefahrstoffdatenbank GESTIS bzw. Arbeitsplatzgrenzwerten nach der Technischen Regel für Gefahrstoffe TRGS 900 verglichen werden. Dies ist beispielhaft in Abb. 3 dargestellt, bei der die Überschreitung der Kohlenstoffmonooxid-Konzentrationswerte zu einem bestimmten Zeitpunkt der Simulation durch die lilafarbene Isofläche gekennzeichnet ist. So lassen sich z. B. Lüftungsintervalle im Übungsbetrieb festlegen und optimieren. Ebenso können die Deposition kondensierter Reaktionsprodukte am Boden und an den Wänden für einzelne Spezies prognostiziert und so z. B. Reinigungsintervalle bestimmt werden, siehe Abb. 4.

Der Vorteil der erarbeiteten Methode ist, dass sie sich prinzipiell auch auf beliebige andere Waffensysteme und Einsatzszenarien, wie z. B. aus einem Innenraum verschossene, schultergestützte Panzerabwehrwaffen, übertragen lassen und damit eine umfassende Analyse und Bewertung zur Beachtung der im Übungsbetrieb zu berücksichtigenden gesetzlichen Vorgaben ermöglicht.

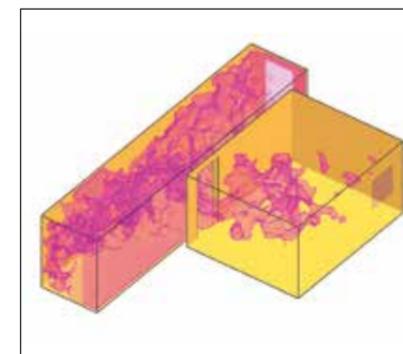


Abb. 3: Darstellung der Überschreitung bestimmter Konzentrationswerte zu einem bestimmten Zeitpunkt der Simulation

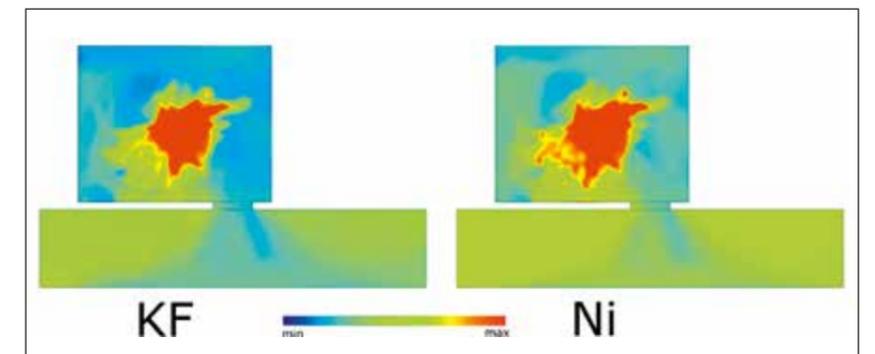


Abb. 4: Prognose zur Deposition kondensierter Reaktionsprodukte hier beispielhaft von Kaliumfluorid (KF) und Nickel (Ni) am Boden und den Wänden für einzelne Produktspezies

Dr. Carsten Cremers  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

Martin F. Groß, M. Sc.  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

info@ict.fraunhofer.de

## Realisierung signaturarmer Brennstoffzellen-APUs mit heutigen logistischen Kraftstoffen

**Brennstoffzellen-APUs (Auxiliary Power Units) ermöglichen die signaturarme Stromversorgung von Einsatzfahrzeugen. Bislang war dies nur mit speziellen Brennstoffen möglich. Im Rahmen des von Deutschland, den Niederlanden, Österreich, Slowenien und Schweden finanzierten EDA-Vorhabens IAPUNIT (Innovative Auxiliary Power UNIT) wurden nun die Kernkomponenten für eine mit Nato F-34 Jet-Fuel betreibbare Brennstoffzellen-APU entwickelt und erfolgreich getestet.**

Hilfskraftaggregate (APU) unterstützen die Stromversorgung von Einsatzfahrzeugen bei abgeschaltetem Antriebsmotor, z. B. im Silent Watch. Hier ist Signaturarmut ein wichtiges Merkmal. Brennstoffzellen bieten Vorteile bezüglich Geräusch- und IR-Signatur. Um einen erhöhten logistischen Aufwand zu vermeiden, ist jedoch der Betrieb mit logistischen Kraftstoffen erforderlich. Im Rahmen des von Deutschland, den Niederlanden, Österreich, Slowenien und Schweden finanzierten EDA-Vorhabens IAPUNIT wurden Kernkomponenten für eine Brennstoffzellen-APU entwickelt und validiert, die mit Jet-Fuel (NATO F-34) betreibbar ist. Zu den Kernkomponenten gehören ein Entschwefelungsreaktor zur Reduktion des Schwefelgehalts, ein Brennstoffprozessor zur Umsetzung des schwefelreduzierten Kraftstoffs in ein H<sub>2</sub>-reiches Gas sowie eine Brennstoffzelle, die mit dem resultierenden CO- und H<sub>2</sub>S-haltigen Gas betreibbar ist.

Für die Entschwefelung wurde von Catator A. B. (SE) ein Hydrodesulfurierung (HDS) Reaktor entwickelt. Dieser nutzt das etablierte HDS-Verfahren in einer modifizierten Form, die eine kleine, fahrzeuginintegrierbare Anlage erlaubt. Tests mit kommer-



Abb. 1: IAPUNIT-Partner und finanzierende EDA-Mitgliedsstaaten

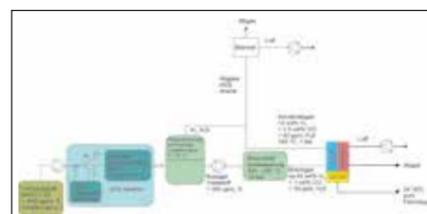


Abb. 2: Angesetztes Flusschema zum IAPUNIT-System

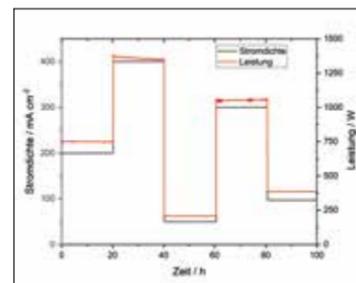


Abb. 3: Validation der fünf festgelegten Betriebspunkte von minimaler bis maximaler Leistung bei Betrieb mit Surrogatreformate mit 0.5 Vol.-% CO und 10 ppm H<sub>2</sub>S. Stabiler Betrieb wurde durch Anpassung der Stacktemperatur und Anodenstöchiometrie für den jeweiligen Betriebspunkt erzielt

Max Cleven, M. Sc.  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

ziellen Jet A1 Treibstoff, dessen Schwefelgehalt auf 3000 ppm erhöht wurde, haben gezeigt, dass sich der Schwefelgehalt des Kraftstoffs verlässlich auf Werte von ca. 100 ppm reduzieren ließ.

Vom Institut Jozef Stefan (SI) und vom National Institute of Chemistry (SI) wurde ein Kraftstoffprozessor entwickelt, der bei Betrieb mit kommerziellem Diesel zuverlässig ein Gasgemisch mit < 0.5 Vol.-% CO und < 5 ppm H<sub>2</sub>S produzierte. Bei der Prozessierung des entschwefelten Jet Fuels stieg der CO-Gehalt auf knapp über 1 Vol.-%, was von Hochtemperatur-Polymermembran-Brennstoffzelle (HT-PEMFC) toleriert wird.

Bezüglich der Brennstoffzelle wurden kommerzielle HT-PEMFC betrachtet. Im Rahmen des Vorhabens hat sich die TU Graz auf Einzelzellebene mit den Grenzen der Toleranz für CO und H<sub>2</sub>S unter realen Betriebsbedingungen, sowie möglichen Ein- und Ausschaltprozesse befasst. Es wurde ein Verfahren zum Ausschalten mit Luftspülung bestimmt, dass keine stärkere Degradation hervorruft.

Das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, ICT hat intensiv den Betrieb kommerzieller HT-PEMFC-Stacks unter simulierten Betriebsbedingungen untersucht. Neben der Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Brenngaskomponenten auf den Stackbetrieb und der Bestimmung geeigneter

Betriebspunkte für den Betrieb mit Reformate gehörte hierzu auch die Untersuchung des Einflusses von Vibrationsbelastungen, die der Stack ohne nachweisbare Schäden überstand.

Gemeinsam mit der AVL List GmbH (AT) wurde die Nutzung moderner Impedanzmethoden zur Überwachung des Stackzustands untersucht. Mit der Distribution of Relaxation Times (DRT) Methode konnte eine Methode bestimmt werden, die eindeutig bekannte, ungünstige Betriebszustände indiziert.

Schließlich wurde durch die TU Eindhoven die thermische und durch das Fraunhofer ICT die mechanische Integration des Systems in einem Aspen- bzw. CAD-Modell betrachtet. Dabei wurde gezeigt, dass durch einfache thermische Integrationsmaßnahmen Wandlungseffizienzen um 35 % erreichbar sind. Zudem ließe sich ein System aufbauen, das in den APU-Schacht des TPz Fuchs passen würde und in der Simulation auch als Gesamtsystem die Vibrationsbelastungen für Fixed Cargo nach NATO AECTP 240 toleriert.

Wir bedanken uns bei den Partnern des IAPUNIT Vorhabens, den Mitgliedern der Project Arrangement Management Group, M. Schwebach (DE), I.P. Barendregt (NL), R. Kirchmayer (AT), S. Bogataj (SI) und E. Prisell (SE) und den EDA Project Officers M. Kalbarczyk und M. Martinho.

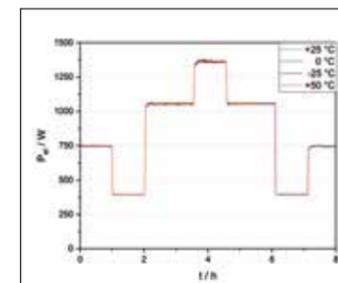


Abb. 4: Betrieb bei den Betriebspunkten in der Klimakammer bei Außentemperaturen von - 25 °C bis + 50 °C



Abb. 5: Versuchsaufbauten und Frequenzspektren für die Vibrations-tests nach NATO AECTP 240

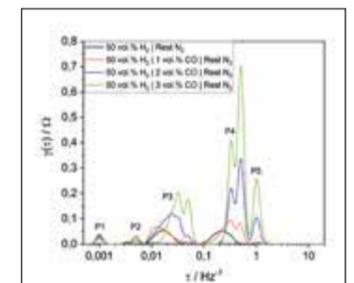


Abb. 6: DRT Signalentwicklung bei zunehmenden CO-Gehalt des Brennstoffs

Max Friedrich, M. Sc.  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
 Institut für Flugführung  
 Braunschweig  
 info-pks@dlr.de

Dr. rer. nat. Dagı Geister  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
 Institut für Flugführung  
 Braunschweig  
 info-pks@dlr.de

## Holistische Risikomodellierung zur optimierten Planung von UAS-Missionen

Um die Entscheidungsfindung bei militärischen UAS-Einsätzen (UAS: Unmanned Aerial System) zu unterstützen, wurde ein Risikoberechnungsschema entwickelt. Das Schema unterscheidet die vier Risikoklassen Luft-Luft, Luft-Boden, Boden-Luft und Boden-Boden. Diese Klassifizierung ermöglicht eine vollständige Abdeckung der potenziell auftretenden Risiken bei UAS-Einsätzen in militärischen Operationen.

Risikomanagement ist von entscheidender Bedeutung für die Gewährleistung der Sicherheit in so genannten High Reliability Organizations (HROs) wie z.B. der Flugsicherung. HROs zeichnen sich u. a. durch hohe Komplexität, mehrere Systemebenen, zahlreiche Entscheidungsträger mit unterschiedlichen Verantwortungsgraden sowie dem simultanen Eintreten mehrerer kritischer Ereignisse aus. Alle genannten Faktoren sind entscheidend für die Planung und Durchführung von Missionen unbemannter Luftfahrtsysteme (UAS) in der (zukünftigen) militärischen Verteidigung und Überwachung.

Um die Entscheidungsfindung bei militärischen UAS-Einsätzen zu unterstützen wurde ein Risikoberechnungsschema entwickelt. Dieses Schema basiert auf der Specific Operations Risk Assessment (SORA) der Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems (JARUS), erweitert allerdings die darin enthaltenen Konzepte. So beschreibt SORA nur zwei Risikoklassen, nämlich Boden-Risiko (GRC) und Luft-Risiko (ARC). Das entwickelte Bewertungsschema differenziert hierbei vier Risikoklassen, nämlich Luft-zu-Luft-Risiken (A2A), Luft-zu-Boden-Risiken (A2G), Boden-zu-Luft-Risiken (G2A) und

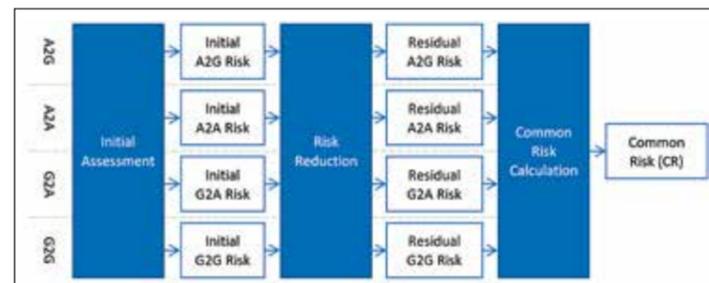


Abb. 1: Veranschaulichung des Risikoberechnungsschemas

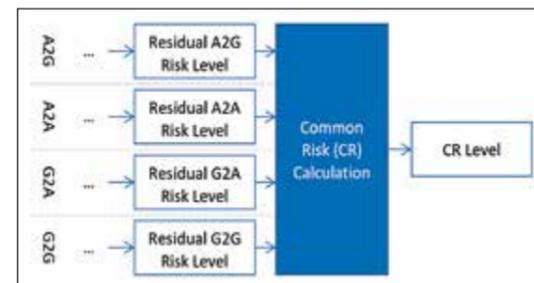


Abb. 2: Berechnung des CR Levels aus den Restrisikowerten

Boden-zu-Boden-Risiken (G2G). Diese Einteilung erlaubt eine vollständige Erfassung möglicherweise auftretender Risiken in der Planung militärischer UAS Missionen.

Zur Veranschaulichung der vier identifizierten Risikoklassen soll im Folgenden ein kurzes Beispiel pro Risikoklasse gegeben werden:

- Risiken, die vom UAS ausgehen und den anderen Luftverkehr (A2A) beeinträchtigen, z. B. das UAS stellt ein Risiko einer Kollision in der Luft mit anderen fliegenden Einheiten (bemannt und unbemannt) dar.
- Risiken, die vom UAS ausgehen und den Boden betreffen (A2G), z. B. das Risiko, dass ein UAS bei einer Terminierung Bodeneinheiten und Infrastruktur gefährdet.
- Vom Boden ausgehende Risiken, die das UAS (G2A) betreffen, z. B. feindliche Einheiten, die das UAS gefährden.
- Risiken, die vom Boden ausgehen und den Boden betreffen (Boden-zu-Boden-Risiken), z. B. eine Feuerlinie, die eine Gefahr für Bodeneinheiten darstellt.

Die Risiken werden initial in einer der vier Risikoklassen erfasst. Die Mitigation von Risiken kann mittels Risiko-Reduktionsmethoden durchgeführt werden. Abschließend wird mittels einer gewichteten Berechnung das Risiko-Level einer bestimmten Missionsroute berechnet. So kann dann aus einer Vielzahl an verschiedenen Missionsrouten die Missionsroute mit dem geringsten Risiko – oder aber, je nach Missionsziel, eine mit einem in Kauf genommenen Risiko – ausgewählt werden.

Das entwickelte Risikoberechnungsschema definiert die vier Risikoklassen als Zahlen zwischen 1 und 10, wobei 1 die niedrigste und 10 die höchste Risikoklasse darstellt. Für jede der

vier Risikoklassen wird ein anfängliches Risikoniveau für die Mission definiert. Hierbei werden alle verfügbaren Daten über die Mission und ihren Kontext betrachtet (z. B. geografisches Missionsgebiet oder Positionen feindlicher Flugzeuge).

Die anfänglichen Risikoniveaus werden als initiale A2G-, A2A-, G2A- und G2G-Risikostufen bezeichnet. Basierend auf den initialen Risikostufen kann der Mission Operator spezifische Strategien zur Risikominderung anwenden, wenn das aktuelle Missionsrisiko zu hoch ist. Diese Strategien können ad hoc angewandt und somit anstelle einer Neuplanung von Teilen oder sogar der gesamten Mission eingesetzt werden. Die sich daraus ergebenden neuen Risikowerte werden als A2G-, A2A-, G2A- und G2G-Restrisiko bezeichnet (vgl. Abb. 1). Auf der Grundlage der Restrisikostufen wird eine gemeinsame Risikostufe (CR) für die Mission berechnet (vgl. Abb. 2).

In einem nächsten Schritt soll eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI) entwickelt werden, die die berechneten Risikostufen, mögliche Risikominderungsstrategien sowie die CR-Stufen für die verschiedenen Strategien visualisiert. Abb. 3 zeigt eine MMI, die im Rahmen des DLR-Projekts ALAAdy entwickelt wurde. Die MMI visualisiert Risikobereiche, in diesem Fall Gebiete mit dichter Besiedlung, und die vorgeschlagene, risikominimierte Flugroute für die Mission. Die MMI wird aktuell weiterentwickelt und an die Anforderungen von militärischen UAS Missionen angepasst.



Abb. 3: MMI zur Visualisierung von Risikobereichen, in diesem Fall Gebiete mit dichter Besiedlung, und die vorgeschlagene, risikominimierte Flugroute für die UAS Mission

Dipl.-Ing. Stephan Dill  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Dipl.-Ing. Andreas Heinzel  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

## DRONAR – Ein drohnengetragenes Radar zur Detektion von Landminen und Sprengfallen

**Die Aufklärung bei militärischen und sicherheitsrelevanten Missionen ist eine Grundvoraussetzung für deren Erfolg. Die effiziente Detektion von Bedrohungen wie Landminen und Sprengfallen ist für die Sicherheit von Mensch und Material unerlässlich. Das System DRONAR wurde daher als drohnengetragenes Radar zur schnellen großflächigen Aufklärung verdächtiger Areale oder Marschrouten entwickelt.**

In der radarbasierten, bodengebundenen Aufklärung existieren heutzutage im Grunde zwei Konzepte. Im ersten Fall wird das Prinzip des Bodenradars (Englisch GPR – Ground Penetrating Radar) eingesetzt, bei dem mittels einer sehr nah an der Bodenoberfläche betriebenen Antenne Radarsignale meist senkrecht in den Boden eingekoppelt und deren Echos empfangen und ausgewertet werden. Im zweiten Fall wird ein Radar in bestimmter Höhe auf ein Fahrzeug montiert und schräg in Fahrtrichtung nach vorne unten schauend betrieben (Englisch FWLR – ForWard Looking Radar). Dadurch ist aber je nach Einfallswinkel bzw. Abstand zum Fahrzeug eine recht eingeschränkte Messtiefe gegeben.

In einem EU-Projekt zur humanitären Landminendetektion wurde beim Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, DLR-HR das fahrzeuggetragene Seitensicht radar TIRAMISAR entwickelt, dessen Möglichkeiten im Hinblick auf wehrtechnische Relevanz in „Wehrwissenschaftliche Forschung“ 2015 beschrieben wurden. Bei diesem System ist eine Antennengruppe (2 Sende- und 4 Empfangskanäle) quer zur Fahrtrichtung auf das kontami-



Abb. 1: Photographie des entwickelten DRONAR-Systems



Abb. 2: Messaufbau mit Bodenstationen für Drohne und Radar

Marius Engel, M. Eng.  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

nierte Areal gerichtet. Durch das Verfahren des Radars mit synthetischer Apertur (Englisch SAR – Synthetic Aperture Radar) konnten so bis dato unerreichte zwei- bzw. dreidimensionale Detektionsergebnisse von vergrabenen Landminen und Sprengfallen mit räumlicher Auflösung von wenigen cm erzielt werden. Jedoch benötigt diese Aufnahmegeometrie eine verfahrensbedingte Nähe von sicherem Fahrstreifen zu kontaminiertem Gebiet.

Die in den letzten Jahren zur Verfügung stehenden Kleindrohnen bis 25 kg Abflugmasse eröffnen für die abstandsfähige Aufklärung neue Möglichkeiten. Eine fast beliebige Gestaltung der Flugtrajektorien sowie ein fern- oder wegpunktgesteuerter Flugbetrieb ermöglichen mit einem abbildenden Radar als Nutzlast die Detektion von Landminen und Sprengfallen ohne das Betriebspersonal einer direkten Bedrohung auszusetzen. Dazu wurde beim DLR-HR, aufbauend auf Erkenntnissen weiterer Experimente mit TIRAMISAR, in den letzten Jahren das kompakte und leichte Radarsystem DRONAR entwickelt und an einer kommerziellen Drohne vom Typ DJI M600P angebaut, wie in Abb. 1 gezeigt. Es weist ähnliche Fähigkeiten wie das TIRAMISAR-System auf, jedoch mit einigen signifikanten technologischen Unterschieden, um den Betrieb auf einer Drohne zu ermöglichen.

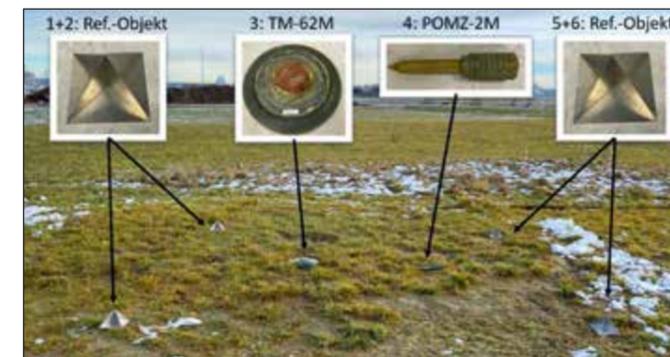


Abb. 3: Szenario mit zwei Landminen und vier Referenzobjekten auf der Messfläche des DLR

Dr.-Ing. Markus Peichl  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Das Radarsystem arbeitet im Frequenzbereich von 0,5 – 3 GHz und verfügt über einen Sende- und einen Empfangskanal. Ein Microcontroller steuert das gesamte DRONAR-System und erfasst alle System- und Messdaten. Das gesamte DRONAR-Modul wiegt nur ca. 3,5 kg und besitzt eine eigene drohnenunabhängige Spannungsversorgung.

Durch die Kombination linearer Flugtrajektorien in unterschiedlichen Höhen von ca. 5 – 8 m sind ähnliche Radarabbildungen wie mit TIRAMISAR möglich. Darüber hinaus lassen sich durch die beliebigen Flugtrajektorien der Drohne auch neue Aufnahmegeometrien, wie bspw. der Kreisflug realisieren. Die Szenengröße kann theoretisch beliebig gewählt und durch passende Flugtrajektorien abgedeckt werden. Typischerweise werden lineare Trajektorien von ca. 20 m Länge oder Kreisradien von 10 m verwendet.

Abb. 2 zeigt den Messaufbau mit Bodenstation von Drohne und Radar. Ein Szenario mit zwei Landminen und vier Referenzobjekten auf der Messfläche des DLR ist in Abb. 3 gezeigt. Abb. 4 zeigt das SAR-Bild dieses Szenarios, bei dem die SAR-Daten von 4 Flughöhen zwischen 5 und 8 m überlagert wurden. Durch die verbesserte Clutterunterdrückung sind die Ziele deutlich vom umgebenden Bodenecho unterscheidbar.

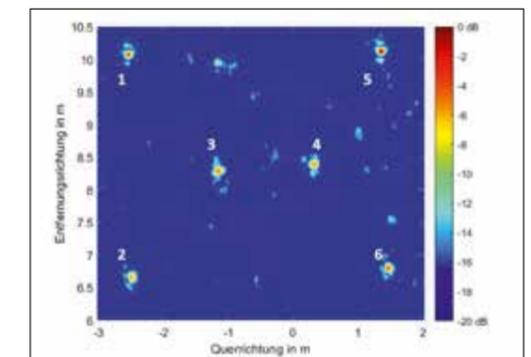


Abb. 4: Zugehöriges prozessiertes SAR-Bild aus überlagerten Daten von 4 Flughöhen zwischen 5 und 8 m

Dr. Andriy Konovaltsev  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Kommunikation und Navigation  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Dr.-Ing. Ivo Buske  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Technische Physik  
Stuttgart

info-pks@dlr.de

## Intelligentes GPS-Spoofing zur Abwehr von Angriffen mit unbemannten Luftfahrzeugen

**Kleine unbemannte Luftfahrzeuge (Micro Unmanned Aerial Vehicles oder Micro UAVs) stellen zunehmend ein Problem für die zivile, aber auch die militärische Sicherheitslage dar. Zur Abwehr von Angriffen solcher vermehrt autonom fliegenden UAVs wurde in einem Verbundprojekt von drei DLR-Instituten ein Konzept entwickelt und erfolgreich erprobt, das auf dem Ansatz von intelligentem GPS-Spoofing basiert.**

Kleine ferngesteuerte UAVs genießen in den letzten Jahren zunehmende Beliebtheit. Die Ausstattung handelsüblicher UAVs erlaubt auch ungeübten Hobby-Piloten sicher und komfortabel zu fliegen. Jedoch ist ein solches Fluggerät schon nach einfachen Modifikationen in der Lage, große Schäden anzurichten. Da mittels GPS-Navigation solch ein UAV vorgegebene Wegpunkte über größere Entfernungen autonom anfliegen kann, sind RF-Funkdetektoren und Jamming-Sender keine geeigneten Abwehrmittel.

Eine der vielversprechendsten Abwehrstrategien in diesem Szenario ist der Einsatz von intelligentem GPS-Spoofing. Durch die Generierung und Abstrahlung von modifizierten GPS-Navigationssignalen wird die Positionsmessung des GPS-Empfängers an Bord des UAVs derart manipuliert, dass das autonom fliegende UAV seine ursprüngliche Flugbahn verlässt und auf eine neue umgelenkt wird. Der Spoofer bekommt damit die Fähigkeit, das UAV aus dem Gefahrenbereich in einen sicheren Bereich zu lenken und dort gezielt zur Landung zu zwingen. In einem Verbundprojekt namens KABUL (Konzept zur Aufklärung und Bekämpfung von unbe-



Abb. 1: Demonstrator des intelligenten GPS-Spoofing



Abb. 2: Optisches Trackingsystem zur 3D Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung von kleinen agilen UAVs im referenzierten Koordinatensystem

Dr.-Ing. Björn Dietrich  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

bemannten Luftfahrzeugen) wurde diese UAV Abwehrmethode von drei DLR-Instituten erstmals erfolgreich demonstriert.

Das Institut für Kommunikation und Navigation stellte für die Versuche seinen eigens entwickelten GPS-Spoofing (Abb. 1) zur Verfügung. Der vorliegende Spoofer ist in der Lage, am Ort des UAVs Code- und Doppler-synchrone Kopien der sichtbaren GPS-Satellitensignale zu generieren. Das macht es für handelsübliche GPS-Empfänger nahezu unmöglich, den Spoofing-Angriff zu bemerken. Die Code-Phasen und Doppler-Frequenzen können anschließend derart modifiziert werden, dass das UAV der virtuellen Flugführung durch den Spoofer folgt.

Notwendige Voraussetzung für die Generierung speziell auf das anfliegende UAV angepasster Spoofing-Signale ist die aktuelle und präzise Information über dessen Position und Geschwindigkeit. Diese Daten werden von einem modifizierten optischen Trackingsystem bereitgestellt, welches vom Institut für Technische Physik speziell für kleine agile UAVs entwickelt wurde (Abb. 2). Erreicht wurden die Anforderungen u. a. durch bildsynchrone Auswertung der Positionscodes und das Feintracking des integrierten Laser Ranging.

Parallel wurde die Detektion und Klassifikation anfliegender UAVs durch den Einsatz eines K-Band-Radarsystems (Abb. 3)



Abb. 3: Radar zur Detektion und Identifikation von UAVs

erprobt, welches vom Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme betrieben wird. Das Radargerät selbst ist eine kauffertige Lösung, die notwendige Konfiguration und nachfolgende Datenverarbeitung ist eine Eigenentwicklung des Instituts.

Die volle Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems konnte wiederholt erfolgreich im Freifeld unter realistischen Bedingungen nachgewiesen werden. In einem der getesteten Szenarios befand sich das UAV im autonomen Schwebemodus. Das UAV hat dabei die Aufgabe, an seiner ursprünglichen Position zu verbleiben. Nach Aktivierung des intelligenten GPS-Spoofing wird jedoch die Kontrolle über die Flugposition übernommen. Das UAV wird durch den Spoofer entlang einer definierten Route bewegt und am Ende zu Boden gebracht. In Abb. 4 ist als typisches Beispiel das Ergebnis eines erfolgreichen Feldversuches zu sehen. Im Kartenausschnitt ist die vom intelligenten GPS-Spoofing vorgegebene Flugbahn als Sollposition dargestellt. Die tatsächlich geflogene Flugbahn des GPS-gestützten autonomen fliegenden UAV stimmt sehr gut mit der vorgegebenen Flugbahn überein.

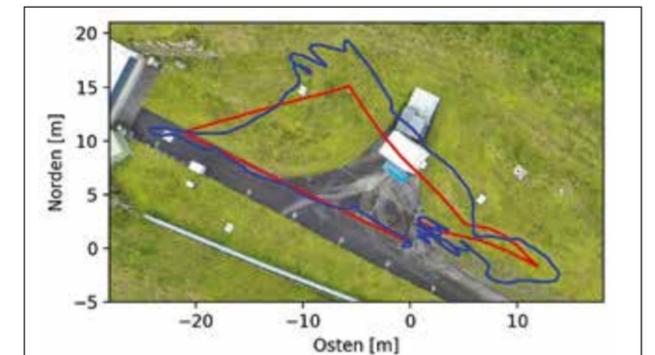


Abb. 4: Typisches Beispiel einer extern kontrollierten Flugbewegung eines im autonomen Schwebemodus fixierten UAVs.  
Rot: vom intelligenten GPS-Spoofing vorgegebene Flugbahn  
Blau: vom UAV tatsächlich erzwingene Flugbahn

Rupert Müller  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Methodik der Fernerkundung  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Dr.-Ing. Erwin Lindermeir  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Methodik der Fernerkundung  
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

## Hyperspektrale Fernerkundung

**Hyperspektrale Fernerkundung nimmt mit der Verfügbarkeit geeigneter Sensorik auf verschiedenen Plattformen, von UAVs über Flugzeuge und Helikopter zu Satelliten, auch im militärischen Bereich stetig zu. Diese Technologie mit einer hohen spektralen und teilweise auch räumlichen Auflösung für die Bereiche Aufklärung, Identifizierung, Zielerfassung und thematische Kartographie wird demonstriert.**

Sensoren für hyperspektrale Fernerkundung sind im Vergleich zu multispektralen oder thermalen Instrumenten vielseitig einsetzbar, da diese einen großen Wellenlängenbereich (typischerweise zwischen 400 nm und 2500 nm) mit einer hohen spektralen Auflösung (typischerweise im Bereich von 2 nm bis 20 nm) kontinuierlich abdecken und Feinstrukturen in der reflektierten spektralen Signatur von Targets messen. Dadurch ist es möglich, durch Vergleich mit bekannten Spektren (z. B. aus Labormessungen) unterschiedliche Materialien im Bild zu identifizieren. Im Bereich der Sensorik betreibt das DLR verschiedene Systeme, wie das Cubert System installiert auf einem UAV, HySpex mit Flugzeug als Messträger oder DESIS auf der Internationalen Raumstation ISS, bzw. bereitet zukünftige Missionen vor (Abb. 1). Eine komplexe Verarbeitungskette zur radiometrischen, geometrischen und atmosphärischen Korrektur der Daten liefert georeferenzierte Reflektanzwerte für jeden Bildpunkt und beschreibt die physikalischen Eigenschaften der Targets.

Das Projekt NVH (Nutzung von Hyperspektraldaten für die bathymetrische Datengewinnung und Bestimmung der Boden-

Kenngröße	HySpex VNIR 1600	HySpex SWIR 320m-e	EnMAP	DESI	Cubert UHD 185 Firefly
Typ	Pushbroom	Pushbroom	Pushbroom	Pushbroom	Frame
Spektralbereich [nm]	416-992	968-2498	400-2450	400-1000	450-950
Spektralkanäle [Anzahl]	160	256	94@VNIR 134@SWIR	235	125
Spektrale Auflösung [nm]	3.5 - 6.0	5.6 - 7.0	8.5@VNIR 10.0@SWIR	2.55	8
Räumliche Pixel [Anzahl]	1600	320	1000	1024	50
Max. räumliche Auflösung [m]	0.3	0.7	30	30	-
Dynamikbereich [bit]	12	14	14	12 (+1 gain)	12
Messträger	Flugzeug	Flugzeug	Satellit	ISS	UAV

Abb. 1: Spezifikationen der hyperspektralen Sensoren

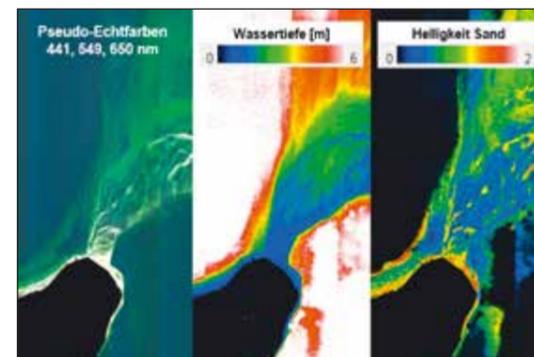


Abb. 2: Beispiel einer Auswertung im Projekt NVH. Links: Ausschnitt einer atmosphärenkorrigierten HySpex-Szene (Eingabebild). Mitte: Abgeleitete Bathymetrie (Ausgabebild). Rechts: Abgeleitete Untergrundkarte für die Klasse Sand (Ausgabebild)

bedeckung zur Unterstützung von Anlandeoperationen im Einsatzraum) zusammen mit dem Fraunhofer IOSB dient der Entwicklung von Verfahren zur Ermittlung der Tiefe von Küstengewässern (Bathymetrie), der Beschreibung der Topographie im Übergangsbereich von Land und See sowie der Bestimmung der Bodenbedeckung (Vegetation, Materialien) im Küstenbereich (Klassifikation) (Abb. 2). Das Projekt ist ausgerichtet auf die Erschließung des Potenzials von Hyperspektraldaten aus dem Weltraum hinsichtlich Anlandeoperationen in Vorbereitung auf die operationelle Verfügbarkeit von EnMAP-Daten sowie basierend auf den momentan verfügbaren Daten des DESIS Instruments.

Insbesondere hyperspektrale (HS) Daten, aufgenommen aus dem Weltraum, haben auf Grund der hohen spektralen Auflösung eine verminderte räumliche Auflösung, um ein ausreichend hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu bekommen, was deren Anwendung, wie z. B. im Projekt NVH, einschränkt. Deswegen werden neuartige spektrale Entmischungsverfahren von hyperspektralen Daten entwickelt und darauf basierend Verfahren abgeleitet, um die räumliche Auflösung von HS Bilddaten durch Verwendung von meist räumlich höher aufgelösten Multispektraldaten (MS) zu verbessern.

Die im HS Bildelement geschätzte Verteilung der reinen Materialien wird durch eine weitere spektrale Entmischung im räumlich höher aufgelösten MS Bild verortet und damit die Auflösung des hyperspektralen Bildes erhöht. Abb.3 zeigt beispielhaft die Fusion von multispektralen und hyperspektralen Daten unterschiedlicher räumlicher Auflösung. Das Verfahren geht dabei über die reinen Pansharpener Methoden hinaus.

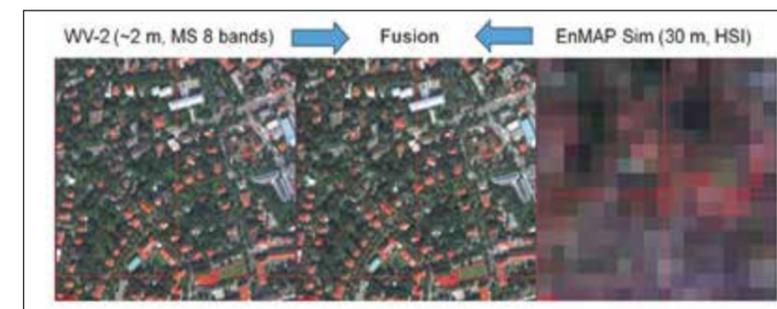


Abb. 3: Fusion einer Worldview-2 multispektralen Szene (ca. 2 m Bodenauflösung; 8 spektrale Bänder) (linkes Bild) mit (simulierten) EnMAP Daten (ca. 30 m Bodenauflösung; 230 spektrale Bänder) (rechtes Bild). Das fusionierte (mittlere) Bild ergibt dann ein hyperspektrales Bild mit hoher Bodenauflösung (~ 2 m) und 230 spektralen Bändern. Die physikalische Signatur wird dabei soweit möglich erhalten

Eine weitere wichtige Anwendung von hyperspektralen Bilddaten ist die detaillierte Charakterisierung städtischer und industrieller Flächen als Grundlage für die Erkennung einfacher Ziele in schattigen Bereichen und Detektion im Subpixel-Bereich. Die Ableitung von Gebäudeumrissen in urbanen und industriellen Gebieten aus Fernerkundungsdaten dient unter anderem der Zustands- bzw. Veränderungserfassung der Objekte. HS Daten können zur eindeutigen Detektion von Materialien genutzt werden, während digitale Oberflächen Modelle (DSM) die Objektextraktion auf der Basis von (relativen) Höhen (z. B. Gebäudehöhen) erlauben. Räumliche Diskontinuitäten (Kanten) im HS Bild durch Änderung der Materialeigenschaften und im DSM durch Höhenunterschiede beschreiben mit sehr großer Wahrscheinlichkeit dasselbe Objekt.

In einem probabilistischen Fusionsprozess werden diese komplementären Informationen genutzt, um hochgenaue Gebäudeumrisse abzuleiten (siehe Abb. 4). Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der multi-modale Ansatz zur Extraktion von Gebäudeumrissen zu besseren Ergebnissen führt, sowie die Robustheit erhöht wird.



Abb. 4: Beispiel von automatisch detektierten Gebäudeumrissen mit unterschiedlichen Dachmaterialien

## V3C: Verlegfähiges und kompaktes Kontrollzentrum für Kleinsatelliten

**Im Rahmen der reaktionsschnellen Verbringung von Kleinsatelliten in einen niedrigen Erdorbit innerhalb weniger Tage oder Stunden wird ein geeignetes Bodensegment benötigt. Mit dem „Verlegfähigen Compact Control Center“ V3C wird ein auf einem Laptop lauffähiges mobiles und kompaktes Bodenbetriebssystem entwickelt und mit einem Satelliten des DLR erfolgreich demonstriert.**

Bodensegmente für Satellitenbetrieb werden typischerweise in Kontrollzentren aufgebaut, belegen dedizierte Kontrollräume und sind eng in die dortige Infrastruktur integriert. Die Möglichkeit ein Missionsbetriebssystem aus einem solchen Zentrum herauszulösen eröffnet neue Einsatzszenarien für Katastrophenhilfe, Sicherheit und Verteidigung, dezentralen Zugang zu wissenschaftlichen Missionen und Bildung. Besonders im Rahmen von Sicherheit und Verteidigung wird schnelle Identifikation und Reaktion auf Gefahren durch die Bereitstellung von Aufklärungsdaten direkt im Feld ermöglicht, indem ein oder mehrere Kompaktkontrollzentren vor Ort eingesetzt werden. Weiter ist es möglich ein solches System mit einem klassischen Kontrollzentrum zur zentralen Planung und Kommandierung zu kombinieren. Im Falle eines Verlustes des Primär- oder Backup-Kontrollzentrums stellt ein mobiles System durch seine verteilte Kommandierungsfähigkeit zusätzliche Resilienz her.

Die hier vorgestellte Forschungsaktivität zielt auf die Entwicklung eines solchen Systems ab: V3C – Verlegfähiges Compact Control Center, dargestellt in Abb. 1. Es ist aus flugerprobten Multimissionskomponenten klassischer Missionsbetriebs-



Abb. 1: V3C-System integriert auf einem handelsüblichen Laptop

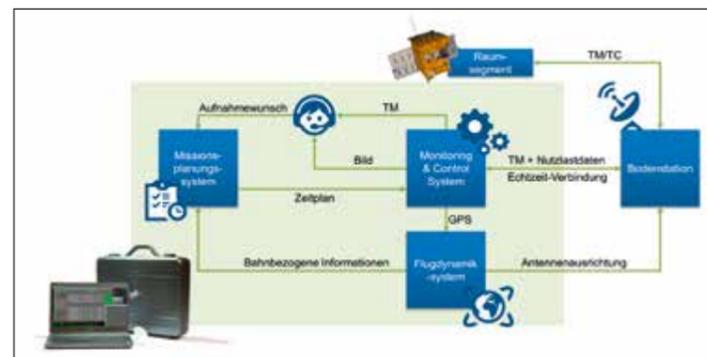


Abb. 2: Überblick über das Systemdesign des V3C-Bodensegments

systeme des Deutschen Raumfahrtkontrollzentrums GSOC am DLR zusammengesetzt. Abb. 2 zeigt eine Übersicht über das Systemdesign. Das Monitoring & Control-System sammelt, interpretiert und archiviert Satellitentelemetrie (TM) und dient der Vorbereitung und Absetzung von Telekommandos (TC). Das Missionsplanungssystem generiert einen konsistenten und konfliktfreien Zeitplan für die Kommandierung der Kameranutzlast und des Satellitenbusses. Weiterhin unterstützt es beim Planungs- und Bestellprozess für Bildaufnahmen. Bahndaten und Ausrichtung des Satelliten werden durch das Flugdynamiksystem verarbeitet und sowohl der angeschlossenen Bodenstation in Form von Antennenanrichtung zur Verfügung gestellt als auch in das Missionsplanungssystem eingespeist.

Alle Komponenten werden auf einem handelsüblichen Laptop-computer integriert. Dieser stellt eine Umgebung für eine Reihe von virtuellen Maschinen zur Verfügung, innerhalb derer die Komponenten ausgerollt werden. Sogenannte „Infrastructure as code“-Techniken erlauben eine vollautomatische Provisionierung der Hardware, sodass das System schnell einsatzbereit gemacht werden kann. Während der Entwicklung wurde der automatische Provisionierungsprozess in sog. Continuous Integration / Continuous Deployment-Pipelines eingebunden zur schnellen Rückmeldung an die Entwickler. Es wurde auf eine minimale Anzahl an externen Schnittstellen geachtet, um einen möglichst autonomen Betrieb zu gewährleisten: Eine Bodenstationsanbindung, eine Zeitquelle, sowie gelegentliche Erdrotations- und Sonnenaktivitätsdaten werden benötigt. Die Auswirkung letzterer auf Einschränkungen im Missionsdesign wurde in einer Studie untersucht.



Abb. 3: Satellitenbetrieb mithilfe von V3C (am unteren Bildrand)

Das V3C-Konzept wurde erfolgreich am BIROS-Satelliten des DLR demonstriert, einer 130 kg-Plattform in einer polaren Umlaufbahn mit Infrarot- und optischer Nutzlast an Bord. V3C wurde derart in die GSOC-Infrastruktur integriert, dass es direkt an die Stelle des klassischen Missionsbetriebssystems treten konnte, welches für mögliche Fehlerfälle in Bereitschaft gehalten wurde. Der Demonstrationsbetrieb umfasste die gesamte Kette für die Bereitstellung von Bilddaten: Das Zielgebiet wurde unter Berücksichtigung der Bahndaten aus der Satellitentelemetrie interaktiv ausgewählt, der Aufnahmewunsch in einen Zeitplan überführt und entsprechende Telekommandos generiert. Diese wurden in einem zehnminütigen Kontakt über der Bodenstation Weilheim hochgeladen, siehe Abb. 3. Die Aufnahme wurde zeitgesteuert durch den Satelliten ausgeführt und während eines Folgekontakts über Weilheim heruntergeladen. Die Nutzlastdaten wurden ebenfalls durch das V3C-System prozessiert und angezeigt, siehe Abb. 4.

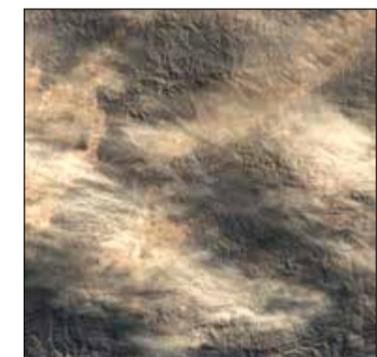


Abb. 4: Aufnahme der Gegend um Truth or Consequences, New Mexico, USA, aufgenommen während der V3C-Demonstrationskampagne

Dr. Thomas Neff  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme  
Oberpfaffenhofen

Info-pks@dlr.de

Wolfgang Jung  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung (RSC<sup>3</sup>)  
Trauen

Info-pks@dlr.de

## Signalerfassende raumgestützte Aufklärung mit TerraSAR-X / TanDEM-X

Bei der nationalen und internationalen Krisenprävention spielt die weltweite Aufklärung zur Lageabschätzung eine wichtige Rolle. Ohne Intrusion ist dies nur mit Satellitensystemen möglich. Die raumgestützte abbildende Aufklärung ist in Deutschland bereits etabliert. Weitere Aufklärungsprodukte wie zum Beispiel die Signalerfassung durch Satellitensysteme gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung.

Die zahlreichen aktuellen und geplanten Satelliten-Missionen für die Erdbeobachtung beinhalten ein großes Potenzial für die weltweite raumgestützte Aufklärung. Dies wird bislang in erster Linie im Rahmen der bildgebenden Aufklärung (Image Intelligence, IMINT) genutzt, teils durch militärische, teils durch zivile beziehungsweise kommerzielle Systeme. Eine weitere Aufklärungskomponente, die signalerfassende Aufklärung (Signal Intelligence, SIGINT) beschränkt sich, zumindest in Deutschland, bislang auf see-, land- und luftgestützte Plattformen. International wird schon seit geraumer Zeit an raumgestützten SIGINT-Systemen geforscht. Auch drängen zunehmend kommerzielle Anbieter wie beispielsweise die US-amerikanische Firma Hawkeye 360 oder die französische Firma Unseenlabs auf den Markt und bieten SIGINT-Daten zum Kauf, welche von firmeneigenen Kleinsatellitensystemen erfolgen werden. Da das Interesse an solchen Systemen auch hierzulande groß ist werden derzeit im Rahmen von Studien die Möglichkeiten und Fähigkeiten solcher Systeme untersucht und innerhalb des DLR durch das Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung (engl. Responsive Space Cluster Competence Center RSC<sup>3</sup>) koordiniert.

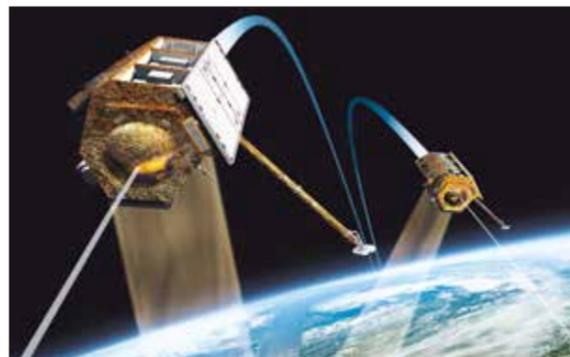


Abb. 1: TerraSAR-X und TanDEM-X im Formationsflug



Abb. 2: IoSiS-System

Für erste, zeitnahe Überprüfungen und Verifikationen dieser Überlegungen liegt es nahe, bereits im Orbit befindliche nationale Systeme zu nutzen. Eine Option bietet hierbei die deutsche TerraSAR-X / TanDEM-X Mission, deren beide SAR-Satelliten in enger Formation mit einem elftägigen Wiederholzyklus fliegen. Aus den aufgenommenen Daten werden üblicherweise Bildinformationen nach dem Prinzip eines Radars mit synthetischer Apertur (Synthetic Aperture Radar, SAR) generiert. Da die Satelliten von Deutschland betrieben und kommandiert werden ist es mit diesem System jedoch auch möglich, die Aussendung von Radar-Pulsen zu unterdrücken und unter ausschließlicher Nutzung des Empfangszweigs von der Erdoberfläche ausgehende elektromagnetische Wellen zu erfassen und aufzuzeichnen.

Erste Datensätze wurden im vierten Quartal 2021 auf diese Art und Weise erflogen und werden derzeit analysiert und ausgewertet. Als definierte Quelle für die von der Erdoberfläche abgestrahlten elektromagnetischen Wellen kam dabei das Experimentalsystem IoSiS (Imaging of Satellites in Space) der Abteilung Aufklärung und Sicherheit des DLR zum Einsatz, welches sich am Standort Weilheim befindet und vom Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme entwickelt und betrieben wird. Die Analysen werden ergeben, bis zu welcher Abstrahlleistung eine Erfassung der Signalquelle möglich ist und mit welcher Genauigkeit die Geolokalisation durchgeführt werden kann.

Die vielversprechenden vorliegenden Daten der ersten Experimentierphase lassen gute Auswerteergebnisse erwarten. Im weiteren Verlauf der Arbeiten werden unterschiedliche Signalformen der Signalquelle und die Auswirkungen des externen

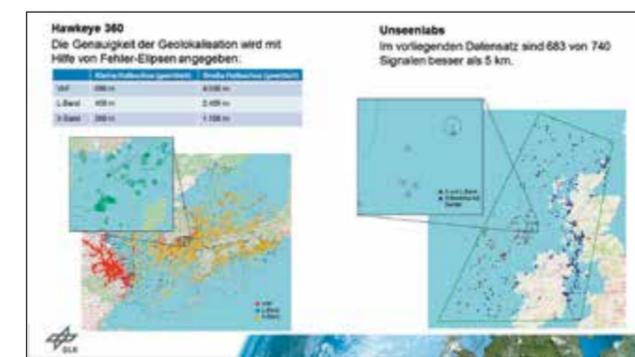


Abb. 3: Aufbereitete SIGINT-Daten der Systeme von Hawkeye 360 und Unseenlabs

Signals auf ein Standardbildprodukt untersucht. Außerdem werden in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr in München weitere Möglichkeiten untersucht, zusätzliche Experimentaldaten zu generieren.

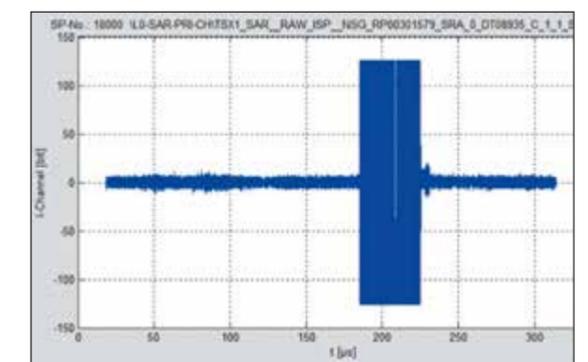


Abb. 4: Erster SIGINT-Testdatensatz, abgestrahlt von IoSiS, aufgenommen von TerraSAR-X; Die Sättigung des Empfängers durch das abgestrahlte Signal ist deutlich erkennbar

Dipl.-Ing. Fabian Neumann  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig

info-pks@dlr.de

Dipl.-Ing. Michael Hanke  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig

info-pks@dlr.de

## Kosteneffiziente Fertigung von Triebwerkseintrittsleitschaufelstrukturen aus Verbundwerkstoffen

**Herkömmliche Fertigungsverfahren für multifunktionale Hochleistungsfaserverbundstrukturen stoßen bei besonderen Herausforderungen oft an ihre Grenzen. Das DLR untersucht Möglichkeiten, wie kosteneffiziente Triebwerkseintrittsleitschaufelstrukturen aus derartigen Werkstoffen gefertigt werden können. Syntaktische Schäume bieten eine Möglichkeit zur lokalen Anpassung der Eigenschaften des Laminataufbaus.**

Um ein Faserverbundbauteil hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften lokal anzupassen, wird in erster Linie der Lagenaufbau lokal auf die auftretenden Beanspruchungen hin optimiert. Die notwendige Steifigkeit von Sandwichstrukturen wird über die Verwendung eines Stützstoffes, auch Sandwichkern genannt, zwischen den Faserlagen erzielt. Der Kern, in Abb. 1 in weißer Farbe gut zu erkennen, erhöht das Trägheitsmoment und damit die Steifigkeit des Bauteils gemäß dem Satz von Steiner. Dadurch muss der verwendete Stützstoff selbst in der Regel keine hohen physikalischen Eigenschaften aufweisen, sondern kann nach geringer Dichte ausgewählt werden.

Gängige Stützstoffe sind z. B. Polymerschäume, Balsaholz oder Wabengitter aus Papier, Pappe, Metall oder Kunststoff. Syntaktische Schäume stellen eine Kombination aus Kugeln, vorzugsweise Glas, Metall oder Kunststoff innerhalb einer Metall- und Kunststoffmatrix dar. Auswahlkriterien für den Stützstoff sind Dichte, Brandschutzvorgaben, Wirtschaftlichkeit der Herstellung, aber auch die zu erwartenden thermischen und mechanischen Belastungen. Unterscheiden sich letztere



Abb. 1: Detailansicht des Sandwichaufbaus für die Composite Eintrittsleitschaufel

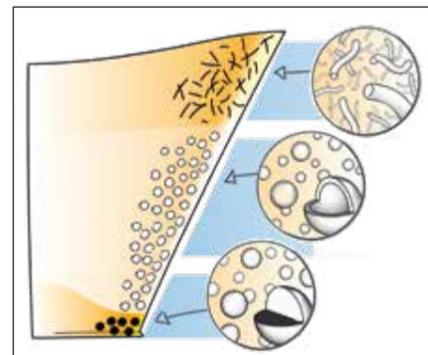


Abb. 2: Schematische Darstellung des Sandwichkerns

lokal über das Bauteil stark, erfolgt die Auswahl meist basierend auf der höchsten geforderten Belastbarkeit. Bei einer Auswahl des Stützmaterials nach der global dimensionierenden Maximalbelastung kann in Bereichen geringerer Belastung unter Umständen nicht das maximal mögliche Leichtbaupotential ausgeschöpft werden. Alternativ können mehrere Einzelkerne verwendet werden. Werden in diesem Fall für die einzelnen Regionen verschiedene Einzelkerne aus unterschiedlichen Materialien verwendet, so erhöht dies den Fertigungsaufwand teilweise erheblich. Die exakte Positionierung der Kerne zueinander und am Faserhalbzeug ist schwierig. Die Folge sind zusätzliche Positioniervorrichtungen.

Im Tränkungsprozess bilden die Kernzwischenräume sogenannte „Runner“, in denen das Harz vor eilt. Die Prozesssicherheit wird dadurch maßgeblich verschlechtert. Dass es auch anders gehen kann, zeigt die entwickelte Composite Eintrittsleitschaufel für ein Luftfahrzeug, wie in Abb. 2 skizziert. In den Randbereichen sind zur Strukturanbindung erhöhte Anforderungen an die Druck- sowie Zugbelastbarkeit gestellt, im Mittelteil zählt vor allem eine geringe Dichte des Stützstoffes. Durch das Verjüngen und kurz darauf wieder Aufweiten der Schaufel bei Übergang in eine Schwalbenschwanzverbindung am Innenring erhöht sich der Fertigungsaufwand mit geteiltem Kern oder als Monolith erheblich. Als Lösung wird ein syntaktischer Kern verwendet.

Durch die sehr dünne Ausführbarkeit des Materials ist es möglich die gesamte Schaufel mit einem einzigen Kern, wie in Abb. 3 zu sehen, aufzubauen und dabei den Lagenaufbau sowie die Lagengeometrien ohne Ausschnitte und Patches zu realisieren. Dafür werden unterschiedliche Füllstoffe (Glashohl- und -vollkugeln, Kurzfasern und ähnliches) in einer Epoxidharz-

matrix eingebettet. Prozesstechnisch wird dabei sichergestellt, dass in zuvor definierten spezifischen Bereichen unterschiedliche Füllstoffe getrennt voneinander vorliegen, die Matrix jedoch durchgängig ist. So können harte Phasengrenzen oder Phasenübergänge ermöglicht werden. Die Herstellung erfolgt in einem geschlossenen Werkzeug, welches die gewünschte Kernform als Kavität aufweist. Durch die Herstellung des Kerns in Endkontur, entfällt eine weitere Bearbeitung vor dem Einbringen in den Sandwichaufbau.

Im Vergleich zu einer konventionell gefertigten Schaufel mit drei gefrästen Einzelkernen, konnte der Fertigungsaufwand deutlich reduziert werden. Die Positionierung eines einzelnen Kerns ist über die Werkzeugränder ohne Hilfsmittel möglich. Des Weiteren sind die Lagengeometrien durch die verringerte minimal fertigbare Kerndicke deutlich einfacher gehalten.

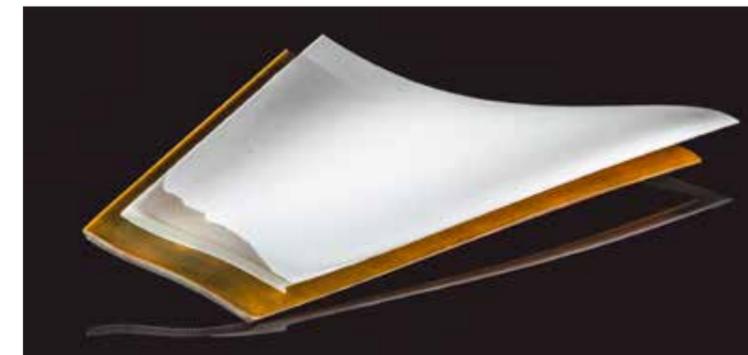


Abb. 3: Sandwichkern und Composite Eintrittsleitschaufel

Dr. Anne Dhollande  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)  
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Dr. Christian Müller  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)  
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

## Entwicklung von Infrarot-Lichtquellen für DIRCM-Gegenmaßnahmen

**Infrarotgelenkte Lenkflugkörper gehören zu den größten Bedrohungen für Boden- und Luftfahrzeuge. Zum Schutz mobiler Plattformen entwickelt das Deutsch-Französische Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) neue Lichtquellen für gerichtete Infrarot-Gegenmaßnahmen (DIRCM, Directed Infrared Counter Measures), die den Infrarot-Zielsuchkopf des Lenkflugkörpers stören, blenden oder beschädigen.**

Die Lasertechnologie-Forschung am ISL orientiert sich bei der Entwicklung neuer DIRCM Lichtquellen im Infrarotbereich an der Technologie weitverbreiteter Infrarot-Zielsuchköpfe. Zudem erforscht und entwickelt das ISL über den Stand der Zielsuchkopf-Technik hinaus vielseitige DIRCM Lichtquellen für den kurzen bis mittleren Infrarotbereich.

DIRCM Anwendungen erfordern leistungsstarke, robuste und kompakte Laserquellen mit guter Strahlqualität und spezifischer Wellenlänge, die es gestatten, über Entfernungen von mehreren Kilometern optronische Wirkung zu erzielen. Effiziente und kompakte Lösungen basieren beispielsweise auf Faserlasern mit einer Emissionswellenlänge von 2  $\mu\text{m}$ , deren Strahlung in optisch-parametrischen Oszillatoren (OPO) in den Wellenlängenbereich zwischen 3  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$  konvertiert werden.

Für den Erfolg der am ISL entwickelten Faserlasertechnologie sind monolithische Vollfaserlaser entscheidend, deren Komponenten fusionsgespleißt werden (Abb. 1). Bei der Entwicklung dieser hocheffizienten, robusten und justagefreien Vollfaserlaser widmet sich das ISL der Untersuchung von Faserlasern

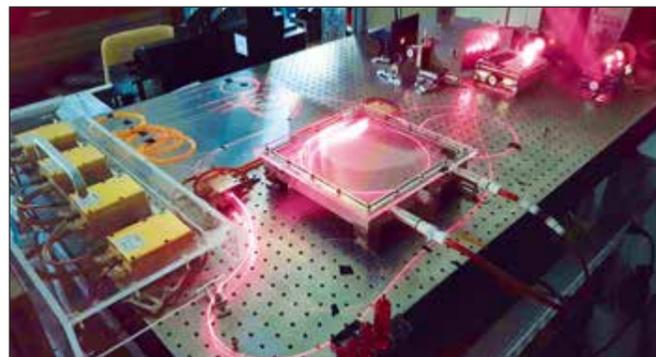


Abb. 1: Vollfaserlaser mit einer Emissionswellenlänge von 2  $\mu\text{m}$



Abb. 2: Miniaturisierter OPO-Resonator vom FIRE-Typ für den Emissionswellenlängenbereich 3 – 5  $\mu\text{m}$

und Faserarchitekturen, und der Entwicklung von Faserkomponenten wie z. B. der Entwicklung von Faserkombinierern und Endkappen. In 2021 berichtete das ISL erstmals über Ergebnisse, die mit einem auf einer  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ -kodotierten aktiven Faser basierenden monolithischen Oszillator erzielt wurden. Dieser Faserlaser lieferte, bisher unter Laborbedingungen, bei einer Emissionswellenlänge von 2,1  $\mu\text{m}$  und einem nahezu beugungsbegrenzten Strahlprofil, eine Leistung von bis zu 200 W im Dauerstrichbetrieb. Das stellt einen einzigartigen Spitzenwert hinsichtlich Effizienz und Leistung einer  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ -kodotierten aktiven Faser dar.

Ein wichtiger Wellenlängenbereich für die Entwicklung von DIRCM Lichtquellen ist das atmosphärische Transmissionsfenster zwischen 3  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$ . Für diesen Wellenlängenbereich hat das ISL einen Zinkgermaniumphosphid basierten linearen OPO Resonator entwickelt, mit dem ein Rekordwert von 38 W Durchschnittsleistung erzielt werden konnte. Bei der Entwicklung robuster OPO-Architekturen, die eine gute Strahlqualität bei hoher Leistung ermöglichen, untersucht das ISL ebenfalls nicht-planare OPO Anordnungen wie beispielsweise den ISL patentierten OPO Resonator vom FIRE Typ. Der Vorteil dieses Resonators besteht in seinem robusten und kompakten Design, das einen stabilen, justage- und rückreflexionsfreien Betrieb ermöglicht. Mit dem neuen miniaturisierten FIRE Resonator (Abb. 2) konnte eine Durchschnittsleistung von bis zu 24 W bei guter Strahlqualität ( $M^2 = 1,6$ ) erzielt werden, die beste Strahlqualität aller literaturbekannten OPO Quellen vergleichbarer Durchschnittsleistung.

Für den mittleren Infrarotbereich entwickelt das ISL darüber hinaus Superkontinuum-Quellen auf der Grundlage von neuar-

tigen nichtlinearen Fasern. Die Superkontinuum-Technologie stellt aufgrund ihrer hohen spektralen Abdeckung, die es erlaubt, optronischen Gegen-Gegenmaßnahmen entgegenzuwirken, und der Möglichkeit, sie als Vollfaser-System vollständig durch Faserkomponenten zu realisieren, eine vielversprechende DIRCM Zukunftstechnologie dar. Das ISL beschäftigt sich sowohl mit der Entwicklung von Pikosekunden-Faserlaserquellen bei 2  $\mu\text{m}$  als auch mit der Superkontinuumserzeugung.

In enger Zusammenarbeit mit den Wehrtechnischen Dienststellen in Oberjettenberg (WTD 52) und Greding (WTD 81) hat das ISL mehrfach Messkampagnen durchführen können, um seine DIRCM Laserdemonstratoren hinsichtlich ihrer Strahleigenschaften und ihrer optronischen Wirkung bei langreichweitiger Propagation zu charakterisieren. Während der Messkampagne 2021 an der WTD 81 konnte beispielsweise die gute Übereinstimmung des experimentellen Strahlprofils des ISL Laserdemonstrators mit einer der atmosphärischen Turbulenz Rechnung tragenden Simulation demonstriert werden (Abb. 3).

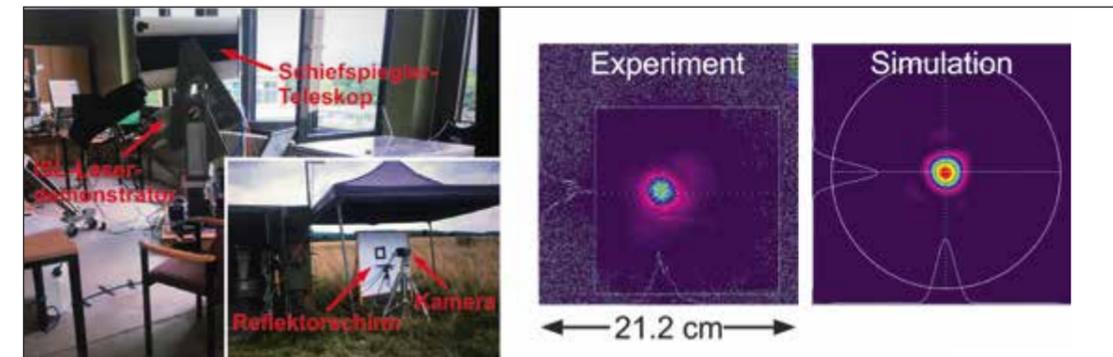


Abb. 3: Experimenteller Aufbau der Messkampagne 2021 an der WTD 81 (Greding). ISL Laserdemonstrator mit Schiefspiegler-Teleskop (links), und PtSi Kamera vor Reflektorschirm (kleines Bild). Experimentelles und simuliertes Strahlprofil (rechts) der OPO Strahlung bei 3 – 5  $\mu\text{m}$  nach atmosphärischer Propagation über eine Strecke von 770 m

Dr.-Ing. Richard K. Arning  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)  
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Dr.-Ing. Friedrich Leopold  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)  
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

## Hypersonische Forschungsarbeiten am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)

Nach den jüngsten Fortschritten verschiedener Staaten bei Hyperschallgleitern und Marschflugkörpern sind Hyperschallwaffen und deren Abwehr wieder auf der westlichen Tagesordnung – beim Militär, in der Industrie und in der Forschung. In mehreren Projekten werden am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) verschiedene Konzepte und Grundlagenarbeiten für die Luftverteidigung und die Bekämpfung von Zielen am Boden vorangetrieben.

Das deutsch-französische Forschungsinstitut Saint-Louis, als europäisches Kompetenzzentrum für Ballistik, Rohraffen, Projektile und Schutz, treibt seit Jahren die Forschung im Bereich Hyperschall voran. Dabei werden im Wesentlichen drei Entwicklungen verfolgt: Die Entwicklung einer Schienenkanone (Abb. 1), die Entwicklung von Hyperschalleffektoren (Abb. 2) für die Schienenkanone oder leistungsgesteigerte Rohraffen sowie im Forschungsverbund Beiträge zur Signatur (IR und Radar) bei hypersonischen Strömungsbedingungen (Abb. 2 und 3). Zu den Grundlagenforschungsarbeiten gehören auch Themen der Ablation (Abb. 4), des Thermalmanagements durch Materialwahl und aerodynamische Formgebung, sowie von Kompressibilitäts-, Realgas- und Plasmaeffekten. Neben der eigenen Entwicklung von Simulationscodes, stützt sich das ISL auf seine Versuchsinfrastruktur des trisonischen Windkanals, der Stoßrohre, der Leichtgaskanonen (Geschwindigkeiten bis zu 8 km/s) und einer umfangreichen Freiflugmesstechnik mit instrumentierten, rohrverschossenen Projektile.

Als einzige europäische Einrichtung entwickelt das ISL das Konzept der elektromagnetischen Schienenkanone weiter.

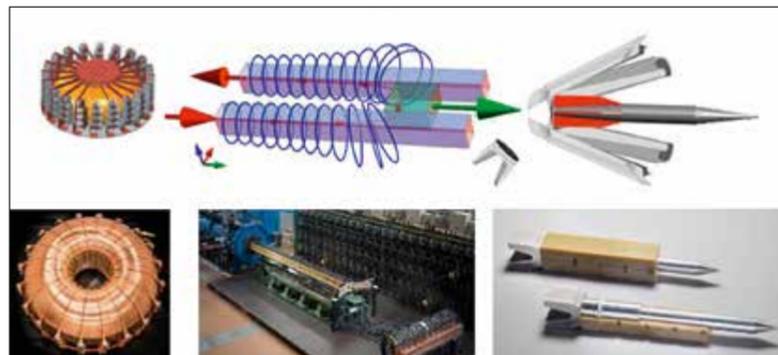


Abb. 1: ISL Schienenkanone

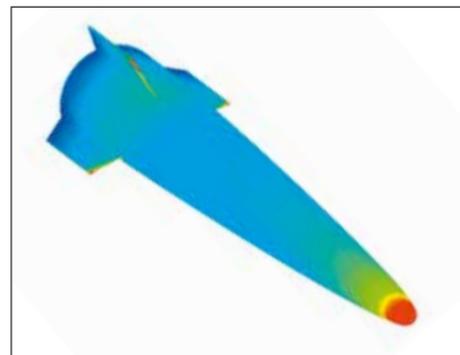


Abb. 2: Waverider Projektil

Mit der ISL- Technologie sind unter Nutzung der 10 MJ Energieversorgungsanlage Geschosse im Kilogramm-Bereich auf hypersonische Geschwindigkeiten von mehr als 2500 m/s beschleunigt worden. Mit über 65 % Wirkungsgrad in Bezug auf die Umwandlung von elektrischer in kinetische Energie wurde ein neuer Benchmark aufgestellt.

Zur Untersuchung möglicher Einsatzszenarien zur Abwehr schnell anfliegender Bedrohungen, zum Beispiel von Seeziel-Flugkörpern, wurde am ISL ein Demonstrator verwirklicht. Dieser ermöglicht es, im Kaliber von 25 mm<sup>2</sup> bei Beschleunigungen von mehr als 100.000 g und Mündungsgeschwindigkeiten von 2.400 m/s Feuerstöße von bis zu fünf Schuss zu realisieren, bei Kadenz von mehr als 75 Hz.

Parallel dazu werden auch klassische Pulverkanonen weiterentwickelt. So kann das ISL mittlerweile auf seinem eigenen Schießplatz bereits Geschwindigkeiten um 2.000 m/s bei Geschossgewichten von 2 kg erreichen. Instrumentiert mit Sensoren und Telemetrie, steht damit eine kostengünstige Freiflugversuchstechnik zur Verfügung, um Entwürfe von Hyperschallkörpern zu testen.

Beim Flug mit Hyperschallgeschwindigkeit kommt es zu sehr speziellen aerodynamischen und thermodynamischen Phänomenen, die typisch für die sehr hohen Geschwindigkeiten und enormen Gastemperaturen sind. Insbesondere werden am ISL vier Grundlagenthemen untersucht:

**Kompressibilität und Flugleistung:** Ein Beitrag unserer Arbeiten liegt auf der Flugleistung von KE (Kinetic Energy) Projektilen für MGCS (Main Ground Combat System). Hier kommt es zu

starken Kompressibilitätseffekten, die mit den klassischen Methoden der Aerodynamik nicht abgedeckt werden. Zum Beispiel wird entgegen der durch die Aufheizung vergrößerten Grenzschicht der Widerstandsbeiwert im Hyperschall geringer.

**Ablation und Flugstabilität:** Durch Aufwärmung und Reibungskräfte an der Oberfläche entstehen zusätzliche Ablationerscheinungen (Abb. 4). Diese sind u.a. für die Flugstabilität von KE Geschossen von entscheidender Bedeutung.

**Aufheizung und IR-Signatur:** Vor allem in niedriger Atmosphäre werden die Flugkörper sehr stark transient aufgeheizt. So werden im Staupunkt des Railgun-Projektils bis zu 2500 °K erreicht (Abb. 2). Gleichzeitig führt die Aufheizung zu einer für jeden Flugkörper spezifischen IR-Signatur, welche das ISL dem Anwender bereitstellt.

**Plasmabildung und Radarsignatur:** In Versuchen im Stoßrohr des ISL konnte in Zusammenarbeit mit der Fraunhofergesellschaft der Einfluss des im Hyperschall ausgebildeten Plasmas auf den Radarrückstreuquerschnitt experimentell nachgewiesen werden (Abb. 3). Im europäischen Verbundprojekt HYPOTHE-NUSE, zusammen mit den deutschen Partnern von Fraunhofer und Hensoldt, erarbeitet das ISL Lösungen zur Detektion von Hyperschallbedrohungen.



Abb. 3: Untersuchung Radarrückstreuquerschnitt bei Plasmaausbildung (Quelle: Deutsch-Französisches Forschungsinstitut ISL, Fraunhofer FHR)

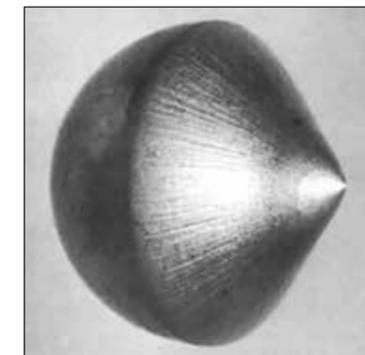


Abb. 4: Nachflugaufnahme einer ablatierten Kugel aus Aluminium bei 5000 m/s

Eike Tangermann  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Angewandte Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen  
Neubiberg

info@unibw.de

Tony Di Fabbio  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Angewandte Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen  
Neubiberg

info@unibw.de

## Simulation und Modellbildung für aerodynamische Anwendungen

**Die Entwicklung moderner Fluggeräte sowie Maßnahmen zu deren Abwehr spielen eine entscheidende Rolle in der Wehrtechnik. Die Beherrschung der strömungsmechanischen Vorgänge in diesen Grenzbereichen der Flugphysik erfordert hochgenaue und teure Methoden der Strömungssimulation. Spezifisch angepasste Modelle machen den Rechenaufwand beherrschbar und tragen somit zu einer Routineanwendung bei.**

In der Untersuchung von aerodynamischen Phänomenen spielt die rechnergestützte Simulation eine tragende Rolle. Die Verfügbarkeit von Strömungsdaten unabhängig von experimentellen Rahmenbedingungen und Einschränkungen macht die Simulation zu einem attraktiven Werkzeug insbesondere in frühen Entwicklungsphasen und beim grundlegenden Verständnis von strömungsphysikalischen Effekten. Stetig zunehmende Rechenkapazität hat weiter dazu beigetragen, dass moderne Simulationsmethoden in fast jedem Entwicklungsprozess zum Tragen kommen.

Trotz der enormen Steigerungen der Rechenleistung ist es erforderlich die Turbulenz in aerodynamischen Strömungen zu modellieren, um so den Rechenaufwand beherrschbar zu machen. Wehrtechnische Anwendungen wie Flugzeuge und Flugkörper agieren typischerweise bei hohen Reynoldszahlen im Trans-, Über- und Hyperschall und weisen strömungsphysikalische Effekte auf, die in anderen Disziplinen nicht in dieser Art oder Ausprägung anzutreffen sind. Dies erfordert die Entwicklung spezifisch angepasster Modelle.

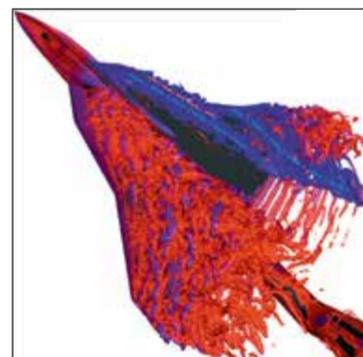


Abb. 1: Deltaflügel bei hohem Anstellwinkel und asymmetrischer Anströmung. Darstellung des nur einseitig ausgeprägten Wirbelsystems (Q-Kriterium), Lage der Primär- und Sekundärwirbel (blaue und orangefarbene Linien)

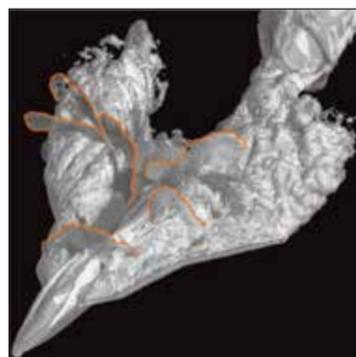


Abb. 2: Verdichtungsstöße am Deltaflügel dargestellt über Isoflächen hoher Dichteänderung. Bei Interaktion mit dem Wirbel kann dieser zusammenbrechen, wobei der aerodynamische Auftrieb sinkt

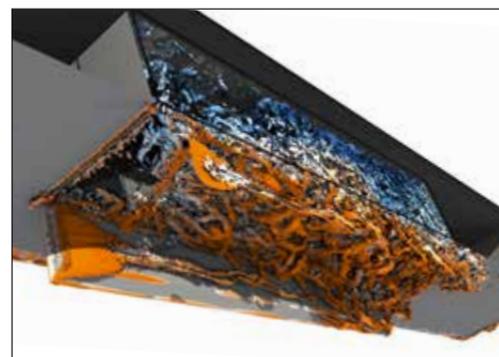


Abb. 3: Modell eines geöffneten Waffenschachtes mit seitlichen Türen. Turbulente Wirbelstrukturen (Q-Kriterium) verursachen aeroakustische Resonanz

Karthick Rajkumar  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Angewandte Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen  
Neubiberg

info@unibw.de

Für hochagile Flugzeugkonfigurationen kommen Deltaflügel mit niedriger Streckung in Frage. Abb. 1 stellt einen solchen Flügel mit mehreren, unterschiedlich gepfeilten Segmenten dar, an dem sich ein komplexes System aus mehreren Vorderkantenwirbeln entwickelt. Wie in der Abb. zu erkennen, bricht bei hohen Anstellwinkeln und asymmetrischer Anströmung der Wirbel einseitig zusammen. Im Transschall interagieren die Wirbel noch mit eingebetteten Verdichtungsstößen wie in Abb. 2 dargestellt. Die akkurate Vorhersage des Vorganges ist zur Bestimmung der Flugleistungen essenziell, was als Ausgangslage jedoch einen sehr hohen Rechenaufwand erfordert. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit Airbus D&S steht die Entwicklung eines angepassten Modells im Fokus, das die turbulenten Vorgänge vollständig abbilden soll, statt sie aufzulösen. Hierfür kommen Methoden des maschinellen Lernens, insbesondere genetische Algorithmen, zum Einsatz.

Ein anderer Anwendungsfall findet sich bei integrierten Waffenschächten. Bei geöffneten Türen entstehen an der offenen Seite Wirbel, die beim Auftreffen auf die Rückwand reflektiert werden. Es kommt zu einer aeroakustischen Resonanz, die zu kritischen Belastungen der Struktur führen kann. Abb. 3 zeigt eine Waffenschachtgeometrie und die darin entstehende turbulente Strömung. Bei diesem stark instationären Vorgang ist die Auflösung von turbulenten Strukturen essenziell für die kor-



Abb. 4: Generischer Hyperschallgleitflugkörper mit Darstellung von Verdichtungsstößen (weißer Nebel) und Druck auf der Oberfläche zur Auswertung aerodynamischer Kräfte

Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Klein  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Angewandte Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen  
Neubiberg

info@unibw.de

rekte Vorhersage des Schallpegels der Resonanzmoden und verlangt nach hohem Einsatz von Rechenleistung. Im laufenden Forschungsvorhaben konnte durch Kombination verschiedener Methoden eine Ersparnis an Rechenzeit von nahezu 80% erzielt werden. Weitere Schritte zielen auf die Fähigkeit zur Simulation industrierelevanter Fälle „über Nacht“.

Die Analyse von Hyperschallflugkörpern (Abb. 4) in Kooperation mit AMDC GmbH führt zu sehr unterschiedlichen Herausforderungen. Neben aerothermodynamischen Effekten treten bei typischen Konfigurationen auch hier Wirbelsysteme auf (Abb. 5), die von turbulenten Vorgängen dominiert werden. In großen Flughöhen sind jedoch die Reynoldszahlen wesentlich niedriger, wodurch signifikante laminare Anteile der Strömung vorliegen und die Transition berücksichtigt werden muss.

Zusammenfassend zeigt die Strömungssimulation ein hohes Potenzial komplexe aerodynamische Vorgänge zu verstehen und vorherzusagen. Mit spezifisch angepassten Modellen können hochwertige Verfahren routinemäßig eingesetzt werden.

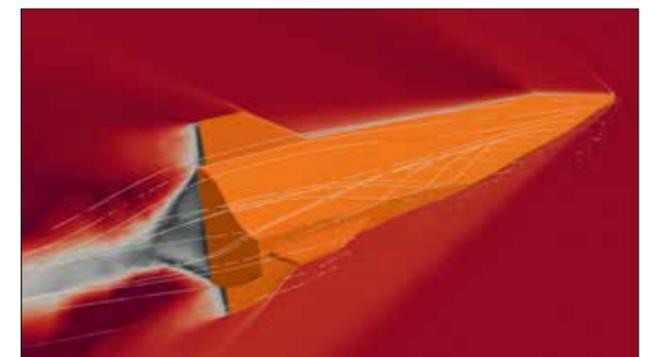


Abb. 5: Wirbelsystem am Hyperschallgleitflugkörper. Stromlinien zeigen die Lage des Vorderkantenwirbels auf der Oberseite, der in tieferen Flughöhen maßgeblich zum Auftrieb beiträgt

OTL d.R. Prof. Dr. Annette Schmidt  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Sportwissenschaften  
Neubiberg

info@unibw.de

Hauptmann Tom Brandt,  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Sportwissenschaften  
Neubiberg

info@unibw.de

## Die MedXFit-Studie – Einfluss von CrossFit®-Training auf Kraft, Mobilität, Rückenproblematiken und Wohlbefinden bei Soldaten und Soldatinnen sowie Zivilangestellten der Bundeswehr

**Chronische Erkrankungen und mangelnde Fitness in Folge sedentären Verhaltens und körperlicher Inaktivität stellen ein weitgreifendes Problem unserer Gesellschaft dar – eine Entwicklung, die auch die Einsatzbereitschaft der Bundeswehr betrifft. CrossFit® erweist sich als effizientes Trainingskonzept für den Dienstsport, um diesem Trend entgegenzuwirken.**

Soldaten und Soldatinnen der Bundeswehr absolvieren in Ausbildung und Einsatz komplexe Aufträge unter hoher körperlicher Belastung. Die Art der Beanspruchung variiert zum Teil stark. Egal ob Marsch, Feuerkampf, Gewässerüberquerung, oder Verwundetentransport – eine vielseitige, funktionale, körperliche Fitness ist Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Auftragserfüllung. Durch dauerhaftes Sitzen und mangelhafte Sportausbildung verschlechtern sich allerdings zunehmend Gesundheit und Fitness vieler Bundeswehrangehöriger. Im Ernstfall resultiert dies in erhöhter Gefahr für Leib und Leben.

Mit CrossFit® (CF) kann diesem Problem begegnet werden. CF beinhaltet ein ganzheitliches, funktionales Trainingskonzept mit ständig wechselnden Belastungsparametern. Charakteristisch ist die Kombination verschiedener Bewegungsmuster aus Gewichtheben, Powerlifting, Turnen, Schwimmen und Rudern in hochintensiven Trainingseinheiten (Abb. 1). Dank hoher Skalierbarkeit und breitgefächertem Trainingsreize können selbst Elitesoldatinnen und -soldaten mit versehrten Kameradinnen und Kameraden die gleiche Trainingseinheit absolvieren und trotzdem ganz individuelle Fortschritte erzielen.



Abb. 1: Technisch anspruchsvolle Übungen aus dem Gewichtheben werden regelmäßig trainiert



Abb. 2: Für das Training bei CrossFit Kokoro steht seit 2021 ein hochwertig ausgestatteter Trainingsraum zur Verfügung

In der vom Lehrstuhl für Sportbiologie der Universität der Bundeswehr München (UniBw M) durchgeführte MedXFit-Studie wurde die Wirkung von CF auf Kraft, Mobilität, Rückengesundheit und Wohlbefinden untersucht. Teilnehmenden konnten zivile und militärische Angehörige der UniBw M (Trainingsgruppe n = 57, Kontrollgruppe n = 34) mit einer vorwiegend sitzenden Tätigkeit, die weniger als zwei Einheiten Kraft- und / oder Beweglichkeitstraining pro Woche durchführten. Die Studie war auf 12 Monate ausgelegt (Messzeitpunkte 0,6 und 12 Monate).

In diesem Zeitraum absolvierte die Trainingsgruppe pro Woche zwei 60-minütige CF-Trainings. Die Military Affiliate CrossFit® Kokoro (Trainingseinrichtung auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr München) stellte die Durchführung von 15 Trainingseinheiten pro Woche sicher (Abb. 2). Während des COVID-19 bedingten Lockdowns wurden Online-Trainings angeboten.

Zu Beginn zeigten die Teilnehmenden stark ausgeprägte Kraft- und Mobilitätsdefizite. Rückenschmerzen gehörten für viele zum Alltag. Das Wohlbefinden befand sich auf einem niedrigen Niveau. Außerdem wiesen die Teilnehmenden erhebliche Mängel bei der Ausführung einfachster Bewegungen wie dem Heben und Tragen von Lasten, Kniebeugen, Laufen oder Springen auf.

Bereits nach 6 Monaten jedoch verzeichnete die Trainingsgruppe signifikante Verbesserungen in allen genannten Bereichen. Dieser Trend setzte sich auf beeindruckende Weise fort. Nach 12 Monaten verfügten die Teilnehmenden schließlich über die notwendige Fitness, um auch in körperlich hochintensiven



Abb. 3: Neben dem Training wird beim CrossFit auch auf eine gesunde Ernährung Wert gelegt, um Gesundheit und Leistung zu steigern

Belastungssituationen noch koordinativ anspruchsvolle Bewegungen gesundheitsschonend auszuführen.

Nach Abschluss der Studie wurden die Teilnehmenden in die reguläre Trainingsgruppe von CF Kokoro integriert. Hier trainieren dauerhaft 150 – 200 Angehörige der UniBw M miteinander – darunter junge Studierende, versehrte Veteraninnen und Veteranen sowie zivile Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter kurz vor der Rente. Das Training wird dauerhaft vom Lehrstuhl für Sportbiologie durch den Einsatz sportwissenschaftlicher Messmethodik begleitet. Gleichzeitig werden über zahlreiche Studienarbeiten ständig neue Erkenntnisse zum Thema CF gewonnen.

Die leistungs- und gesundheitsfördernde Wirkung von CF wurde bereits mehrfach wissenschaftlich belegt (Abb. 3). Mit der MedXFit-Studie wurde nun erstmals im Rahmen einer prospektiven, kontrollierten Langzeitstudie die Effektivität von CF bei Bundeswehrangehörigen nachgewiesen. Nicht zuletzt wegen dieser Ergebnisse und des Erfolgs von CF an der UniBw M insgesamt, sollte CF zukünftig als Trainingskonzept für die Sportausbildung der Bundeswehr in Betracht gezogen werden. Es empfiehlt sich bei einer etwaigen Implementierung auf die langjährige Erfahrung seitens CF Kokoro und des Lehrstuhls für Sportbiologie zurückzugreifen.

M. Sc. Yvonne Breitmoser  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Mechanik  
Neubiberg

info@unibw.de

M. Sc. Benedikt Demmel  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Mechanik  
Neubiberg

info@unibw.de

## Verträglichkeit von konventionellen und additiv gefertigten Elastomeren mit synthetischen Kraftstoffen

**Synthetische Kraftstoffe sollen als Energieträger in der Bundeswehr eingesetzt werden. Ziel der Studie ist zu untersuchen, ob Elastomer-Bauteile mit diesen Kraftstoffen verträglich sind, um in bestehenden Systemen eingesetzt werden zu können. Im Fokus stehen aktuell gealterte, konventionelle Elastomere und additiv gefertigte (3D-gedruckte) Elastomere für den Einsatz in der Luftfahrt oder in Fahrzeugen.**

Synthetische Kraftstoffe werden im Gegensatz zu konventionellen Kraftstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen hergestellt und können eine andere chemische Zusammensetzung aufweisen. Aufgrund dessen zeigen Elastomere, die als Dichtungen, Schläuche und Tankauskleidungen eingesetzt werden, ein anderes Verhalten in Kontakt mit synthetischen als mit erdölbasierten Kraftstoffen. Eine übermäßige Quellung kann eine Verschlechterung der Eigenschaften hervorrufen und die Funktionalität des Bauteils stark einschränken (Abb. 1).

Die Etablierung synthetischer Kraftstoffe hängt ferner davon ab, ob bereits installierte Bauteile aus konventioneller oder additiver Fertigung (AF) mit diesen Energieträgern kompatibel sind. Diese Studie wird von der Universität der Bundeswehr München in Kooperation mit dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) durchgeführt.

Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR) ist ein konventionell hergestelltes Elastomer, das in Dichtungen im Luftfahrzeugbau eingesetzt wird. Aufgrund langer Einsatzzeiten von Flugzeugen, vor allem im militärischen Bereich, kommt es zur Alterung und



Abb. 1: Die Wahl des falschen Dichtungsmaterials führt zu übermäßiger Quellung und Bruch. Links: unquollener Zugstab; Rechts: gequollener, gebrochener Zugstab



Abb. 2: Hydrostatische Waage zur Bestimmung der Volumen- und Dichteänderung gequollener Elastomerproben

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Mechanik  
Neubiberg

info@unibw.de

somit zu einer chemischen Veränderung dieser Elastomere. Die Umstellung auf synthetische Kraftstoffe macht es daher nötig, auch bereits gealterte Dichtungen auf ihre Verträglichkeit mit synthetischen Kraftstoffen zu untersuchen, da so Aussagen zur Verwendung in bestehenden Systemen möglich sind.

Durch die aufstrebende Technologie der AF können bereits Ersatzteile in kurzer Zeit hergestellt und direkt vor Ort Ersatzdichtungen in den erforderlichen Härtegraden und Geometrien gedruckt werden. Die aktuell verfügbaren Fertigungsverfahren verhindern bisher jedoch eine Verwendung konventioneller, vulkanisierter Materialien. Daher unterscheiden sich die marktverfügbaren AF-Elastomere chemisch stark von den konventionellen. Da sie aber ähnliche Materialeigenschaften aufweisen müssen, ist es zwingend erforderlich diese neuartigen Elastomere auf ihre Eignung zu prüfen.

Zur Bewertung der Verträglichkeit von konventionellen und AF-Elastomeren mit synthetischen Kraftstoffen, wurden NBR und thermoplastisches Polyurethan (TPU) im synthetischen Kraftstoff Readijet™ sowie in einem als Referenz dienenden erdölbasierten Jet A-1 gelagert. Neben der Bestimmung der Masse- und Dichte-Änderung (Abb. 2) wurden Zugversuche und Härtemessungen durchgeführt. Die mittels Gaschromatographie/Massenspektrometrie (GC/MS, Abb. 3) gewonnenen



Abb. 3: Gaschromatographie/Massenspektrometrie (GC/MS) wird eingesetzt, um einzelne Kraftstoffbestandteile zu identifizieren

Dr. Tobias Förster  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

Erkenntnisse lassen eine detaillierte Beschreibung der Quellungsphänomene einzelner Kraftstoffbestandteile zu.

Die Bestimmung der Volumenänderung (Abb. 4) zeigt, dass trotz grundlegend unterschiedlicher chemischer Struktur ein Vergleich von AF-Elastomeren mit konventionellen Elastomeren möglich ist. Die Volumenänderung des TPU ist sogar geringer ausgeprägt, was auf eine bessere Verträglichkeit hindeutet. Mit zunehmender Alterung erhöht sich die Vernetzungsdichte des NBR, welche zu geringerer Quellung führt. Zusätzlich sinken mit fortschreitender Quellung neben der Dichte auch die Härte sowie die Reißfestigkeit und -dehnung aller Materialien.

Die durchgeführten Untersuchungen liefern einen tiefen Einblick in das Quellverhalten von konventionell und additiv gefertigten Elastomeren in Kontakt mit synthetischen Kraftstoffen. So lassen sich einerseits neue Materialien hinsichtlich ihres Einsatzfeldes bewerten. Andererseits können Aussagen getroffen werden, ob neuartige Kraftstoffe sicher und zuverlässig in bestehenden Systemen verwendet werden können.

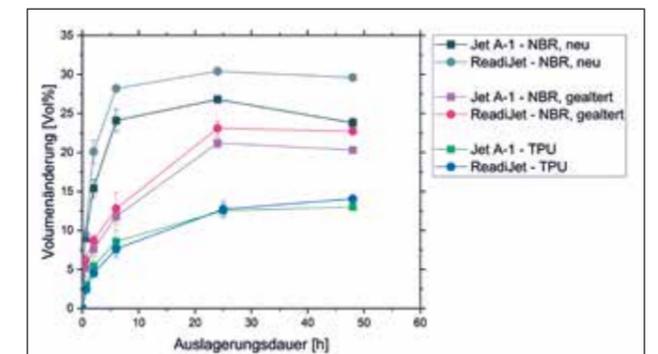


Abb. 4: Volumenänderung von neuem und künstlich gealtertem NBR und von additiv gefertigtem TPU. Die Quellung erfolgte im konventionellen Kraftstoff Jet A-1 und im synthetischen Kraftstoff Readijet™

Dr. Leonhard Kunczik  
 Universität der Bundeswehr München  
 Institut für theoretische Informatik, Mathematik und  
 Operations Research  
 Neubiberg

info@unibw.de

Prof. Dr. Maximilian Moll  
 Universität der Bundeswehr München  
 Institut für theoretische Informatik, Mathematik und  
 Operations Research  
 Neubiberg

info@unibw.de

## Maschinelles Lernen auf Quantencomputern: Die Zukunft für Angreifer-Verteidiger-Szenarien

Politisch wird der in Deutschland produzierte Quantencomputer angestrebt. Gleichzeitig sollte sich die Wissenschaft schon jetzt mit möglichen Anwendungsgebieten auseinandersetzen. Ein vielversprechender Fall sind Angreifer-Verteidiger-Szenarien. Bereits jetzt weisen erste Forschungsergebnisse darauf hin, dass mittels Quantencomputing die Komplexität dieser Probleme handhabbar wird.

Obwohl derzeit noch einige Zweifel herrschen, ob und vor allem wann Quantencomputer aus den Forschungslaboren in die Anwendung gebracht werden, hat sich die Bundesregierung bereits auf den „Quantencomputer made in Germany“ festgelegt (Abb. 1). Bis das ehrgeizige Projekt Wirklichkeit wird, sollte die Zeit aber nicht stillstehen, sondern für die Entwicklung von skalierbaren Lösungsansätzen im Quantencomputing genutzt werden.

Ein zukünftiges Anwendungsgebiet sind komplexe nichtkooperative Spiele. Beispiele für solche Szenarien sind die Planung und Durchführung von präventiven Maßnahmen zur Vereitelung von terroristischen Angriffen, wie z.B. an Flughäfen, die Erkennung und das Verhindern von Hackerangriffen auf Cybersysteme oder aber auch Gesellschaftsspiele wie Schach.

Die zugrunde liegende Dynamik der jeweiligen Situation und die Zeitspanne, über die sich das Szenario hinzieht, machen das Finden von optimalen Strategien in nichtkooperativen Situationen zu hochkomplexen Problemen. Dabei beschreibt die Dynamik, ob beide Parteien aktiv in das Geschehen eingreifen können, oder ob sich eine Partei im Vorhinein auf eine Strategie

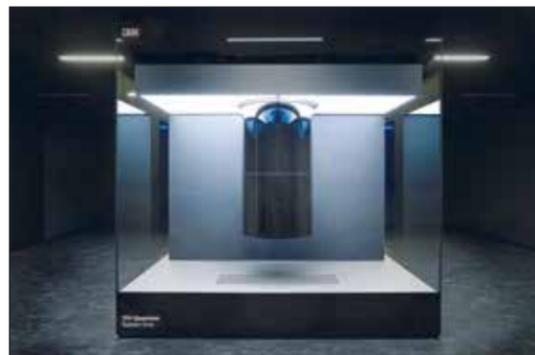


Abb. 1: Das IBM Quantum System One ist der erste kommerziell verfügbare Quantencomputer in Deutschland (Quelle: IBM / CC BY)

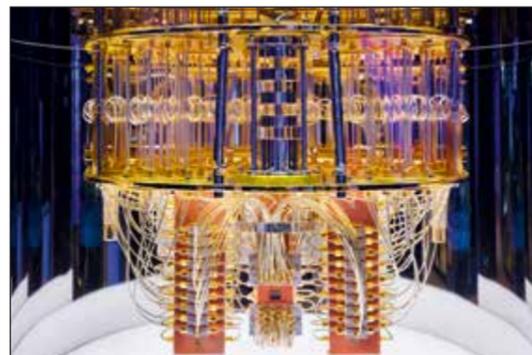


Abb. 2: Das Innere des IBM Quantum System One (Quelle: IBM / CC BY-ND)

Prof. Dr. Stefan Pickl  
 Universität der Bundeswehr München  
 Institut für theoretische Informatik, Mathematik und  
 Operations Research  
 Neubiberg

info@unibw.de

festlegen muss. Das ist beispielsweise an Flughäfen der Fall, wo im Vorhinein feste Sicherheitskontrollen platziert werden und Sicherheitskräfte nach einem bestimmten Schema patrouillieren.

Klassische Methoden zur Lösung von nichtkooperativen Spielen haben ihren Ursprung in der Spieltheorie, die sich mit der mathematischen Lösung von Entscheidungs- und Interaktionssituationen beschäftigt. Sobald diese durch viele verschiedene Handlungsmöglichkeiten in mehreren Runden (wie beim Schach) zu komplex werden, lässt sich die Spieltheorie jedoch nicht mehr ohne weiteres anwenden.

Eine Alternative zur Spieltheorie bietet das Reinforcement Learning als eine Technik aus dem Bereich des Maschinellen Lernens. Reinforcement Learning basiert auf Algorithmen, die anhand von Interaktionen mit einer Simulation eine optimale Strategie zur Lösung des Problems finden.

Der Durchbruch für Reinforcement Learning bei der Lösung komplexer Probleme war im Jahr 2017, als ein Programm auf der Basis von Reinforcement Learning den damaligen Weltmeister im Spiel GO in mehreren Partien schlug. Heutzutage werden ähnliche Ansätze genutzt, um wesentlich komplexere nichtkooperative Spiele zu lösen.

Die derzeitigen Erfolge im Reinforcement Learning werden meist nur unter Aufwendung großer Rechenkapazitäten sowie durch die Nutzung von speziellen Recheneinheiten wie GPUs und TPUs (Graphics/Tensor Processing Units) erzielt. Diese wurden vor allem für das schnellere Berechnen von Deep-Learning Modellen wie z. B. Neuronale Netze entwickelt. Im Reinforcement Learning werden Deep-Learning-Modelle genutzt, um die Algorithmen auf größere Probleme zu skalieren.

Quantum Computing bietet verschiedenen Eigenschaften, die das Lösen von komplexen Problemen vereinfachen, wie z. B. Superposition und Entanglement (Abb. 2). Die Kombination von klassischem Reinforcement Learning mit neuen Methoden wie Quanten-Neuronale-Netze zu sogenannten Quanten-Hybriden Reinforcement Learning Modellen (Abb. 3) kann ein wichtiger Weg sein, um mit weniger Ressourcen gleichwertige Ergebnisse zu erzielen.

Zusätzlich neben der Entwicklung von neuen Quanten-Algorithmen ist es auch das Ziel, in Kooperation mit Unternehmen und Behörden Anwendungsfälle zu identifizieren und erste Lösungsansätze zu evaluieren. So kann der „Quantencomputer made in Germany“ direkt in den produktiven Einsatz gebracht werden, wo er gebraucht wird.

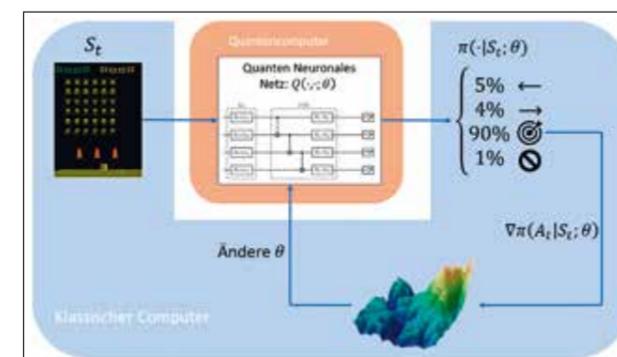


Abb. 3: Schematische Darstellung des Lernprozesses bei Quanten Reinforcement Learning Algorithmen in Angreifer-Verteidiger Szenarien (Quelle: Institut für theoretische Informatik, Mathematik und Operations Research, Fakultät für Informatik der UniBw München)

Prof. Dr. Carlo Masala  
 Universität der Bundeswehr München  
 Center for Intelligence and Security Studies  
 Neubiberg

ciss@unibw.de

Dr. habil. May-Britt U. Stumbaum  
 Universität der Bundeswehr München  
 Center for Intelligence and Security Studies  
 Neubiberg

ciss@unibw.de

## Perspektiven der deutschen sicherheitspolitischen Kooperation im Westpazifik aus der Sicht des internationalen Systems – Relevanz für das sicherheitspolitische Handeln des BMVg

**Ziel dieser Studie ist die konkrete und systematische Bewertung bilateraler Kooperationspotenziale deutsch-australischer sowie deutsch-neuseeländischer sicherheitspolitischer Kooperation vor dem Hintergrund einer umfassenden, politikwissenschaftlichen Kontextualisierung der Machtverschiebungen im Westpazifik und ihrer Auswirkungen auf deutsche Interessen.**

Aufgrund der wirtschaftlichen und politischen Machtverschiebungen hin zum Pazifik wird diese Region eine zentrale Rolle für die Ausgestaltung der internationalen Ordnung im 21. Jahrhundert einnehmen. Der Westpazifik ist ein zentraler Schauplatz des zunehmend intensiver geführten Wettbewerbs zwischen den Großmächten China und den USA. Eine Eskalation hin zu einem offenen Konflikt kann enorme Auswirkungen auf deutsche Interessen haben: einschneidende Einschränkung der Handelsrouten und damit auch der Versorgung deutscher Produktion und Konsumenten; potentieller Verlust getätigter Investitionen; substantielle Bedrohung der für Deutschland essentiellen regelbasierten, multilateralen Ordnung sowie Aufweichung und Abänderung internationaler Normen und Werte; Verlust der politischen Unabhängigkeit deutscher Partnerländer. Sollte Deutschland sich nicht aktiv vor Ort engagieren, wird es mittel- bis langfristig signifikant an strategischem Einfluss in der Region verlieren und auch bei europäischen Entscheidungen hinsichtlich einer pazifischen Strategie weniger Gehör finden. Damit würden für Deutschland wichtige Entscheidungen in Zukunft ohne Deutschland gefällt werden.

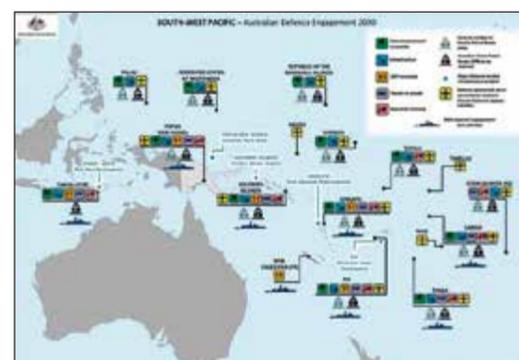


Abb. 1: Engagement der australischen Verteidigungskräfte im Westpazifik (Quelle: Commonwealth of Australia 2020)



Abb. 2: Programm eines Webinars mit Australien und Neuseeland

Dr. Frank Mouritz  
 Universität der Bundeswehr München  
 Center for Intelligence and Security Studies  
 Neubiberg

ciss@unibw.de

Um für die Machtverschiebungen gewappnet zu sein und den damit einhergehenden sicherheitspolitischen Herausforderungen begegnen zu können, muss Deutschland sein Engagement in der Region erhöhen und die Kooperation mit Partner ausbauen. Insbesondere Australien und Neuseeland als westlich geprägte Demokratien mit ähnlichen Wertevorstellungen bieten sich als Schlüsselpartner an. Beide zeigen ein starkes Interesse an einer verstärkten Kooperation mit Deutschland und es bestehen bereits Kanäle und Formate, auf denen man aufbauen kann.

Zielsetzung der Studie ist es, strategische Entscheidungen im BMVg und in der Bundeswehr zu unterstützen, indem Kooperationspotenziale systematisch identifiziert und bewertet werden. Die Studie verfolgt dabei eine Rahmenkonzeption von der theoriegeleiteten Kontextualisierung der sicherheitspolitischen Dynamiken in der Region zu einer dezidierten Auslotung der Bedrohungsperzeptionen und der sicherheitspolitischen Schwerpunktsetzung Australiens und Neuseelands bis zur Erstellung von realistischen Szenarien und der Identifikation von Handlungsoptionen.

Basierend auf der Analyse dieser Rahmenbedingungen wurden konkrete Kooperationsmöglichkeiten erfasst, die zu den Bedürfnissen und Fähigkeiten der Partnerländer passen (s. Abb. 1).

Neben der Auswertung von strategischen Grundlagendokumenten und dem sicherheitspolitischen Diskurs in beiden Ländern wurden auch semi-strukturierte Interviews mit lokalen Experten in Deutschland, Australien und Neuseeland geführt. Zudem hat die Universität der Bundeswehr München in Kooperation mit der BMVg und der Konrad-Adenauer-Stiftung ein Webinar mit politischen Entscheidungsträgern aus allen drei Ländern ausgerichtet (s. Abb. 2), in welchem eine Zusammenarbeit in den Bereichen Cyberspace, Weltraum und maritime Sicherheit, wie z. B. der Entsendung von Schiffen (s. Abb. 3), diskutiert wurde. Die in den vorangegangenen Arbeitsschritten gewonnenen Erkenntnissen wurden genutzt, um eine Szenarioanalyse zu erstellen. Diese bewertet die wichtigsten Schlüsselfaktoren hinsichtlich ihrer wahrscheinlichen Ausprägung und Einfluss auf die zukünftige politische Entwicklung in der Region Westpazifik und ist auf die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen ausgerichtet. Damit trägt die Studie zur aktuellen Diskussion über Rahmenbedingungen und Grundlagen für eine deutsche Positionierung im westpazifischen Raum bei und liefert einen konkreten und umfassenden Beitrag zu einer möglichen Umsetzung der von der Bundesregierung in den Leitlinien versierten Intensivierung der sicherheitspolitischen Kooperation zu westlich geprägten Wertepartnern in der Region und zur Aufstellung des BMVg in den bilateralen Beziehungen zu den Schlüsselstaaten Australien und Neuseeland.



Abb. 3: Route der Fregatte Bayern

Prof. Dr. Jörg Felfe  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Dr. Annabell Reiner  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

## Die Entwicklung des Hamburger Stärkentests „Berufe Radar“ als Berufsorientierungstool für Absolventinnen und Absolventen sowie Berufseinsteigerinnen und Berufseinsteiger

Es wurde ein Testverfahren zur Berufsorientierung entwickelt, welches Absolventinnen und Absolventen sowie Berufseinsteigerinnen und Berufseinsteiger objektiv und unabhängig bei der Berufswahl unterstützen soll. Nach Bearbeitung des onlinebasierten Tests erhalten Interessierte eine Rückmeldung zu ihren individuellen Stärken sowie damit assoziierten Berufsbildern.

Absolventinnen und Absolventen sowie Berufseinsteigerinnen und Berufseinsteiger stehen häufig vor der Herausforderung, aus einer schier endlosen Zahl von Berufen den passenden auszuwählen. Zahlreiche Testverfahren und Tools leisten dabei Unterstützung. Häufig basieren diese aber nicht auf einer transparenten wissenschaftlichen Konzeption oder sind wenig anschaulich gestaltet und nicht frei verfügbar. Ziel des Projektteams der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU Hamburg) war es, ein theoretisch fundiertes und empirisch geprüftes Verfahren zu entwickeln, welches durch eine ansprechende Gestaltung sowie den niedrigschwelligen und kostenfreien Zugang als onlinebasiertes Tool die Zielgruppe optimal erreicht.

Grundlage des Berufe Radars bildet ein theoretisches Modell unterschiedlicher Stärken. Über Stärken verfügt eine Person in Bereichen, wo ihre Fähigkeiten und Interessen aufeinander treffen und hoch ausgeprägt sind. Das Modell basiert auf dem Hexagonal-Modell (Holland, 1997), erweitert um die Bereiche „IT“ und „Führung“, um aktuelle Berufe adäquat abzubilden. Die Dimensionen werden im Berufe Radar durch Prototypen



Abb. 1: Beispiel für Bilditem



Abb. 2: Grafische Rückmeldung der Stärken

Dr. Alexander Klamar  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

repräsentiert, um den Teilnehmenden die Identifikation mit den Ergebnissen zu erleichtern. Zudem wurde erstmals im deutschsprachigen Raum eine systematische Kategorisierung militärischer und ziviler Berufe bei der Bundeswehr vorgenommen. Dadurch ermöglicht das Berufe Radar eine Verknüpfung des individuellen Stärkenprofils mit Karrieremöglichkeiten bei der Bundeswehr.

Basierend auf der theoretischen Konzeption entwickelten unabhängige ExpertInnen für jede Dimension verbale und bildhafte Items, welche anschließend in einer Onlinebefragung sowie in Fokusgruppen Personen aus der Zielgruppe vorgegeben wurden. Neben Fragen zu Verständnis und Passung der Items wurde auch die generelle Akzeptanz und Attraktivität der Inhalte, Verbesserungsvorschläge und Wünsche abgefragt. Psychometrische Berechnungen zeigten zufriedenstellende Ergebnisse und auch das Feedback der Teilnehmenden war positiv.

Die überarbeitete Version wurde mit  $N = 413$  Teilnehmenden erneut auf ihre psychometrische Qualität überprüft. Die Dimensionen weisen dabei gute bis sehr gute Reliabilitäten auf. Die Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse deuten auf eine gute faktorielle Validität hin. Auch die Konstruktvalidität kann durch erwartungskonforme Zusammenhänge mit anderen



Abb. 3: Verbale Rückmeldung der Stärken und des Aspekts Führung

Skalen wie z. B. den Persönlichkeitskonstrukten aus dem BFI-10 (Rammstedt et al., 2014) oder den Basismotiven aus dem FūMo (Felfe et al., 2012) als belegt angesehen werden. Die Kriteriumsvalidität zeigt sich durch hohe Passungen zwischen den Stärken und den verbalisierten Berufswünschen der Teilnehmenden. Im Sinne der sozialen Validität bestätigen die Teilnehmenden dem Verfahren eine hohe Attraktivität und Akzeptanz sowie der Ergebnisrückmeldung zusätzlich eine gute Passung.

Die finale Version des Berufs Radars verfügt über 72 verbale und 13 Bilderitems (s. Abb. 1), welche 11 Dimensionen zugeordnet sind. Die grafische Umsetzung erfolgte durch Castenow GmbH. Der Test ist unter [www.beruferadar.de](http://www.beruferadar.de) verfügbar und liefert innerhalb von 15 – 20 Minuten zunächst eine Rückmeldung zu den zwei individuell am stärksten ausgeprägten Dimensionen, den Stärken (s. Abb. 2 und 3). Anschließend können damit assoziierte Berufsvorschläge eingesehen werden (s. Abb. 4). Ein wesentlicher Mehrwert gegenüber bisher vorhandenen Verfahren ist die systematische Verknüpfung militärischer und ziviler Berufe der Bundeswehr sowie die Berücksichtigung aktueller Berufsbilder, vor allem aus dem IT-Kontext.

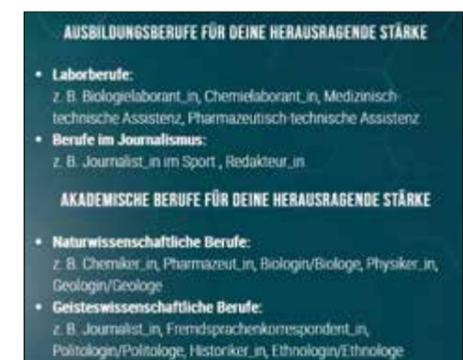


Abb. 4: Rückmeldung von Berufsvorschlägen

Prof. Dr. Christine Zeuner  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg

eki@hsu-hh.de

Dr. Katja Petersen  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg

eki@hsu-hh.de

## Ärztliche Weiterbildung im Fokus: Das Forschungsprojekt „Evaluation, Konzeptionalisierung und Implementierung arbeitsprozessorientierter ärztlicher Weiterbildung am BwK Hamburg (E.K.I.)“

**Immer noch gilt ärztliche Weiterbildung vielen Beteiligten als ein ‚Nebenprodukt‘ des ärztlichen Alltagshandelns, das sich während der Patientenversorgung quasi nebenbei einstellt. Das Gegenteil ist der Fall: Wie die neuen Weiterbildungsordnungen zeigen, steht die ärztliche Weiterbildung vor vielfältigen Herausforderungen, die auch die Gestaltung von Weiterbildung im ärztlichen Berufsalltag betreffen.**

Unter ärztlicher Weiterbildung (Facharztausbildung) wird die Phase des beruflichen Qualifikationserwerbs von Ärztinnen und Ärzten verstanden, die sich an die Erlangung der Approbation anschließt. Sie dauert je nach Fachgebiet ca. fünf bis sieben Jahre mit dem Ziel, fachärztliche Kompetenzen zu erwerben. Welche fachärztlichen Kompetenzen es zu entwickeln gilt, wird von länderspezifischen Weiterbildungsordnungen und den dazugehörigen Richtlinien und Fachgebieten bestimmt. Ärztliche Weiterbildung findet im Rahmen eines Arbeitsverhältnisses in Weiterbildungsstätten statt, die von den Landesärztekammern zugelassen wurden.

Derzeit rücken vor allem ärztliche Kompetenzentwicklung und Digitalisierung in den Mittelpunkt, was sich auch in den neuen Weiterbildungsordnungen der Länder niederschlägt. Weiterbildungsbefugte und Weiterbildende gestalten ärztliche Weiterbildung vor allem auf der Grundlage subjektiver Lernerfahrungen während ihrer eigenen Facharztausbildung. Die daraus resultierenden, über Ärztegenerationen hinweg tradierten Lehr-Lern-Handlungen werden häufig als Bestandteil des ärztlichen Berufsethos verstanden.

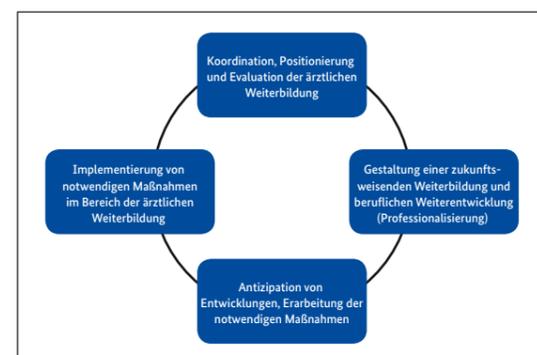


Abb. 1: Ziele von E.K.I.



Abb. 2: Teilnehmer an einem Workshop

Dr. Katja Schmidt  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg

eki@hsu-hh.de

E.K.I. erforscht ärztliche Weiterbildung sowohl in ihren organisationalen Strukturen als auch in ihren subjektiven Bedeutungen für Weiterbildungsbefugte, Weiterbildende und Weiterzubildende. Das Projekt bezieht sich auf das Bundeswehrkrankenhaus Hamburg. Das Forschungsdesign ist als Prozessevaluation angelegt: In einem ersten Schritt wurden bestehende Weiterbildungsstrukturen und Formen des Weiterbildungshandelns ermittelt. Die Auswertung der erhobenen Daten ermöglichte es in einem zweiten Schritt, aus Sicht der Teilnehmenden und der Durchführenden Aussagen zur tatsächlichen Praxis ärztlicher Weiterbildung zu erhalten. Daraus ließen sich in einem dritten Schritt gemeinsam Handlungs- und Gestaltungsoptionen ableiten, die nun im Bundeswehrkrankenhaus implementiert werden.

E.K.I. unterstützt und begleitet die Weiterbildenden sowie die Weiterzubildenden in ihren Lehr-Lernprozessen. Berücksichtigt werden die spezifischen Anforderungen und Bedingungen ärztlicher Weiterbildung wie z. B. fachkulturelle Unterschiede, unterschiedliche Bedürfnisse in den einzelnen Fachdisziplinen oder Zeitstrukturen. Insbesondere die Verzahnung von beruflicher Weiterbildung und Patientenversorgung im ärztlichen Alltag erfordern eine didaktisch-methodische Ausrichtung und Normen der Qualitätssicherung, die mit Fachkenntnissen, pädagogischen Kompetenzen und berufsspezifischen Handlungs-

anforderungen verbunden sind. So können Lehr-Lernprozesse sichtbar gemacht, Lerngelegenheiten und Lernorte im Prozess der Arbeit identifiziert und organisationale Weiterbildungsstrukturen evaluiert und aufgebaut werden, welche die Qualität ärztlicher Weiterbildung umfassender in den Blick nehmen. Dabei wird nicht nur auf Fachkompetenz fokussiert, vielmehr werden auch Sozial-, Methoden- und Reflexionskompetenzen berücksichtigt, um die Entwicklung einer umfassenden beruflichen Handlungs- und Gestaltungskompetenz der Weiterzubildenden zu unterstützen.

Implementierungsformen waren z. B. abteilungsübergreifende Workshops mit Weiterbildenden und jährliche Reflexionsgespräche mit Weiterbildungsbefugten, in denen erwachsenenpädagogisches Wissen und Methoden der Kompetenzerfassung im Prozess der Arbeit vermittelt wurden. Neben den Fachdiskursen zur Kompetenzentwicklung wurde auch über Fragen der Entwicklung von Professionalität im Bereich der ärztlichen Weiterbildung debattiert.

### Konzeptionalisierung und Implementierung

- Reflexionsgespräche
- Mini-Workshops mit Weiterbildenden und Weiterzubildenden
- Workshops für die gesamte Klinik
- Praxishefte
- Umfragen zu aktuellen Themen
- Ärztliche Weiterbildung im Prozess der Arbeit

Abb. 3: Formen der Konzeptionalisierung und Implementierung

Oliver Pelz, M. Sc.  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der  
Bundeswehr Hamburg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Samir Abdul, M. Sc.  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der  
Bundeswehr Hamburg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der  
Bundeswehr Hamburg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

## Strukturelles Kleben von Luftfahrzeugstrukturen bestehend aus Hochleistungsthermoplasten und darauf basierenden Kohlenstoffaserverbundwerkstoffen (Thermoplastic Bonding)

Das strukturelle Kleben von faserverstärkten Hochleistungsthermoplasten stellt für zukünftige Luftfahrzeugstrukturen ein vielversprechendes Gesamtkonzept dar. Für den industriellen Einsatz von sicheren und robusten strukturellen Klebungen muss neben dem Verständnis über den Aufbau von Haftung selbst sowohl der Herstellungsprozess der Struktur als auch der Klebprozess ganzheitlich betrachtet werden.

Die Forschung der letzten Jahre hat zu Erkenntnissen geführt, die die Verwendung faserverstärkter Thermoplasten für den Bau von Strukturen für Flugzeuge als vorteilhaft erscheinen lassen. Ausgehend von den Erfahrungen, die unter anderem im Rahmen von europäischen „Clean Sky“ und den deutschen „LuFo“-Projekten gemacht wurden, müssen die Technologien auf die Eignung zur Herstellung, Montage und Reparatur von Rumpfstrukturen geprüft und validiert werden.

Das strukturelle Kleben von Polymeren wurde in früheren Studien intensiv untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass im Labormaßstab hohe Festigkeiten reproduzierbar sind. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Oberflächenmodifikation, z. B. Schleif- und Strahlverfahren, sowie Plasmabehandlung und Vakuum-UV-Strahlung (VUV), um Haftung zu verbessern. Für Thermoplaste haben sich zur Oberflächenvorbehandlung insbesondere die Plasma- oder VUV-Behandlung als sehr effektiv herausgestellt (siehe Abb. 1).

Zur Herstellung von faserverstärkten Hochleistungsthermoplast-Strukturen stellt das Thermoforming eine vielverspre-

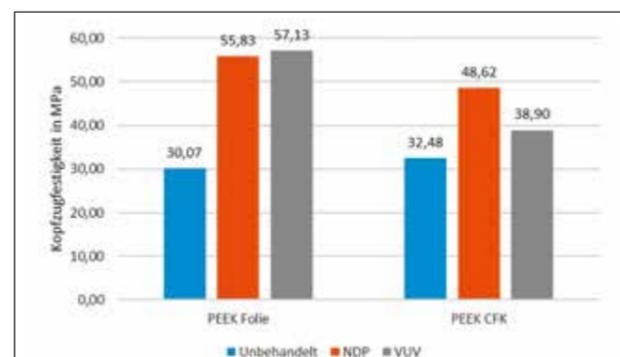


Abb. 1: Ergebnisse Kopffzugversuche vergleich PEEK-Folie mit PEEK-CFK bei verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen

Major d.R. Marc Fette M. Sc. & MBA  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der  
Bundeswehr Hamburg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Dr.-Ing. Elisa Arikan  
Wehrwissenschaftliches Institut für  
Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

PD Dr.-Ing. habil. Jens Holtmannspötter  
Wehrwissenschaftliches Institut für  
Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

chende Technologie dar. Hier werden Bauteile in einer Presse bei hohen Temperaturen und Drücken in zwei Stufen hergestellt. Im ersten Schritt wird eine Platte generiert, die im zweiten Schritt zu einem Bauteil umgeformt wird. Um das Bauteil anschließend entformen zu können, werden Trennmittel verwendet, welche die Oberflächen kontaminieren können. Durch den Herstellungsprozess werden die Bauteile somit thermisch sowie mechanisch belastet und mit Trennmitteln kontaminiert, wodurch oberflächennahe Bereiche geschädigt werden. Diese Schädigungen können adhäsions- und festigkeitshemmend wirken, was wiederum eine tragfähige Klebung verhindern kann.

Mit der Betrachtung von faserverstärkten Hochleistungsthermoplasten und dem Fokus auf das strukturelle Kleben in einem industriellen Prozess ergeben sich somit neue Randbedingungen, die die Auswahl von Oberflächenvorbehandlungsverfahren einschränken. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass Niederdruckplasmen ebenfalls sehr effektiv sind, dieses Verfahren allerdings wirtschaftlich nicht industriell umsetzbar ist. Die VUV-Vorbehandlung ist dagegen ein vielversprechendes Verfahren, das sich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten hervorragend industrialisieren lässt. Erste Ergebnisse lassen jedoch darauf schließen, dass die Oberflächen der Bauteile durch den Herstellungsprozess derart stark geschädigt und kontaminiert

werden, dass die VUV-Vorbehandlung alleine keine ausreichende Steigerung der Klebfestigkeit bewirkt (siehe Abb. 1). Die geschädigte Oberfläche muss erst entfernt werden, damit eine lasttragende Oberfläche gewährleistet werden kann (siehe Abb. 2). Eine Kombination aus Vakuum-Saugstrahlen und VUV-Vorbehandlung hat sich an dieser Stelle bereits als sehr effizient herausgestellt.

Das Projekt wird im Rahmen einer Kooperation zwischen der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, dem Wehrwissenschaftlichen Institut (WIWeB) in Erding und dem Composite Technology Center / CTC GmbH von Airbus in Stade durchgeführt. Am WIWeB werden die Voraussetzungen einer erfolgreichen strukturellen Klebung aus material- und oberflächenanalytischer Sicht erforscht. AM CTC hingegen stehen die industriellen Prozessentwicklungen für das strukturelle Kleben von Luftfahrzeugstrukturen im Vordergrund. Das Projekt soll im Jahr 2023 mit der Validierung eines industrialisierten und automatisierten Prozesses an einem Demonstrator abgeschlossen werden.

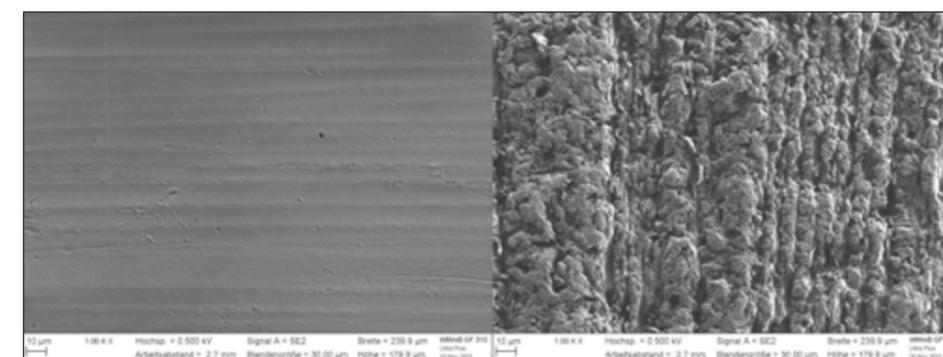


Abb. 2: Rasterelektronen Mikroskop Aufnahmen von PEEK-CFK-Oberflächen. Links unbehandelt und rechts Vakuum sauggestrahlt

Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der  
Bundeswehr Hamburg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

Major d.R. Marc Fette, M. Sc. & MBA  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der  
Bundeswehr Hamburg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

Eugen Musienko, M. Eng.  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der  
Bundeswehr Hamburg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Forschungsbuero@hsu-hh.de

## Entwicklung eines validierten und einheitlichen Prüfaufbaus für menschliche Hautsurrogate für die Untersuchung der Wirkung Nichtletaler Wirkmittel in Form von kinetischen Projektilen

Das Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg und die Wehrtechnische Dienststelle 52 (WTD 52) befassen sich mit der Herstellung von Surrogaten für die realitätsnahe Untersuchung der Wirkung von nicht letalen Wirkmitteln in Form von kinetischen Projektilen.

Die Untersuchung der Wirkung von Nichtletalen Wirkmitteln stellt eine Herausforderung dar, da zum jetzigen Zeitpunkt lediglich Surrogate verwendet werden, die nur bedingt die Realität abbilden können. So beruht der jetzige Drei-Schichtaufbau (gemäß STANREC 4744 AEP-94) für die Prüfung von kinetischen Projektilen auf Validierungsversuchen, bei dem Komponenten so lange variiert wurden, bis sich das Schadensbild des Surrogats an das aus menschlichen Beschussversuchen annäherte. Die in der Richtlinie STANREC 4744 AEP-94 vorgeschlagenen Materialien weisen dabei Nachteile auf. So ist das zu verwendete Hirschleder ein Naturprodukt, welches in seinen Eigenschaften stark variiert. Daher erzeugt der aktuelle Prüfaufbau keine hinreichenden Aussagen über mögliche Verletzungen oder ein mögliches Letalitätsrisiko. Im Zuge dessen besteht der Bedarf, neue Materialien, Materialkombinationen und entsprechende Fertigungsverfahren für menschliche Surrogate zu entwickeln. Die entwickelten Surrogate sollen dabei fundierte, reproduzierbare und vor allem validierte Aussagen über das Schadensbild durch den Einsatz von Nichtletalen Wirkmitteln möglich machen.

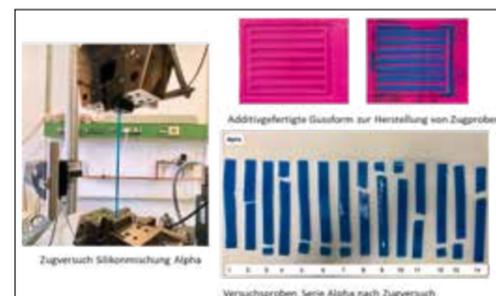
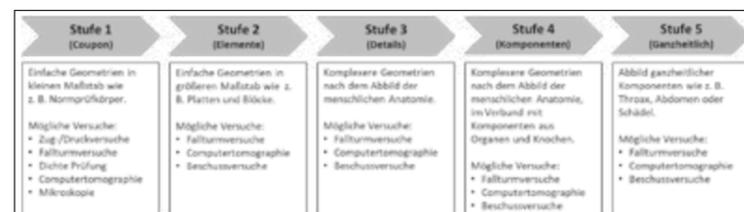


Abb. 2: Versuchsablauf für Zugversuche an Silikongemischen

Abb. 1: Konzept für die stufenweise Prüfung von möglichen Surrogaten

Frank Landmann  
Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und  
Sondertechnik (WTD 52)  
Oberjettenberg

Dipl.-Ing. (FH) André Knörschild, M. Sc.  
Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und  
Sondertechnik (WTD 52)  
Oberjettenberg

WTD52posteingang@bundeswehr.org

WTD52posteingang@bundeswehr.org

In der fortlaufenden Entwicklung von Surrogaten wurden dabei die Anforderungen an eine Fertigung gesammelt und zusammen mit Expertinnen sowie Experten ein Anforderungskatalog erarbeitet. Außerdem wurden mögliche Technologien sowie auch die notwendigen Tests, die für ein validiertes Surrogat anhand von objektiven Kennwerten notwendig sind, mittels einer Technologie-Matrix als morphologischer Ansatz sowie einer Test- und Validierungspyramide herausgestellt. Diese methodische Vorgehensweise dient dazu, Ergebnisse auf verschiedenen Stufen der Entwurfs- und Entwicklungsphase zu liefern (siehe Abb. 1) und die entsprechenden Anforderungen zu überprüfen.

In der jetzigen Phase des Vorhabens entwickelt das Laboratorium Fertigungstechnik zusammen mit der WTD 52 ein Hautsurrogat, welches möglichst realitätsnahe Eigenschaften zur menschlichen Haut aufweisen soll. Als Material wird dabei ein Gemisch aus zwei verschiedenen kaltvulkanisierenden RTV-2 (room temperature vulcanizing) Silikon verwendet und mittels eines Zugversuchs getestet wird (siehe Abb. 2). Der Vorteil dieser Materialien ist vor allem die Möglichkeit, die Eigenschaften je nach Mischungsverhältnis einstellen zu können und das mit vergleichsweise einfachen Mitteln und geringem Aufwand. So wäre es denkbar, dass dienststellenübergreifend die entwickelten Surrogate hergestellt werden

können, um den Testaufbau reproduzierbar umzusetzen. Als Vorgabe für Richtwerte für die Zugbelastungen sollen dabei Ergebnisse aus Zugversuchen von menschlicher Haut dienen, z. B. gemäß A.N. Annaidh et al 2012.

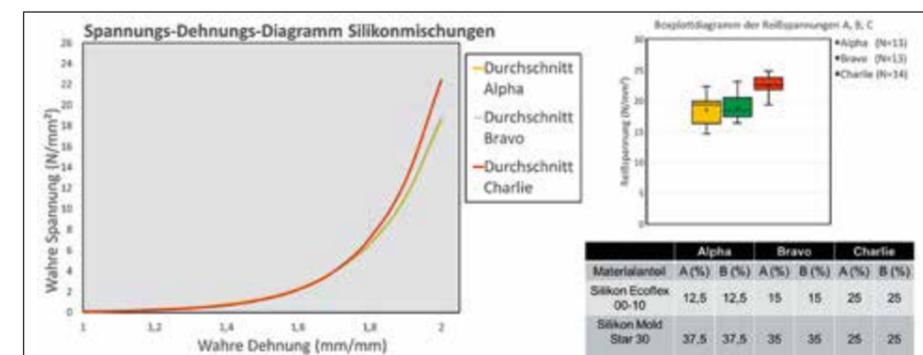


Abb. 3: Ergebnisse der Zugversuche an Silikongemischen

TRDir Dr. Stefan Potthast  
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien  
– ABC-Schutz (WIS)  
Munster

WISPosteingang@bundeswehr.org

## Neue technologische Entwicklungstrends in der Detektion und Identifikation ionisierender Strahlung

**Die Detektion und Identifikation ionisierender Strahlung und radioaktiver Materialien ist ein wesentliches Element im Bereich der erweiterten und qualifizierten Befähigung der ABC-Abwehr (ABCABw). Um den Anforderungen insbesondere bei hochmobilen Szenarien in der A-Einsatzaufklärung gerecht zu werden, wurde der Technologieträger eines neuen handgetragenen Messgerätes auf Basis des Strahlenspür- und Verstrahlungsmessgeräts SVG 2 realisiert.**

Seit seiner Einführung 2002 bildet das Strahlenspür- und Verstrahlungsmessgerät (SVG2) (Grundgerät) (siehe Abb. 1) die Basis für die Strahlenspür- und Verstrahlungsmessausrüstung 2. Einhergehend mit den derzeitigen Vorgaben durch die NATO und dem Wandel des Aufgabenspektrums der ABCABw, welche neben der Rückbesinnung auf LV/BV auch weiterhin Low-Level-Radiation Szenarien beinhaltet, führt dies dazu, dass das in der Bundeswehr eingeführte SVG2 nicht mehr vollumfänglich den heutigen Anforderungen genügt. Andererseits werden die bisher im SVG2 realisierten Fähigkeiten auch weiterhin benötigt.

Im Lauf der Zeit wurden eine Reihe externer Sonden (u. a. Fahrzeugaußensonden, Neutronensonde, NBR-Detektor) hinzugefügt, um eine Reihe von Mess- und Spüraufgaben durchführen zu können. Bedingt durch das damalige Aufgabenspektrum, verfügt das SVG2 derzeit nicht über eine ausreichende spezifische Empfindlichkeit im niedrigen Dosisleistungsbereich ( $< 1\text{mSv/h}$ ) bzw. eine Möglichkeit zur zweifelsfreien Identifizierung der radioaktiven Nuklide. Eine Differenzierung von natürlichen Isotopen, industriellen und medizinischen Quellen,



Abb. 1: Strahlenspür- und Verstrahlungsmessgerät (SVG2) Grundgerät und externen Sonden (Auswahl)



Abb. 2: Technologieträger „Handgetragenes Detektions- / Identifikations-System“

sowie Kernwaffenmaterial ist nicht möglich. Analyse und Bewertung der möglichen Bedrohung durch verdächtiges radioaktives Material (z. B. beim Schutz von Feldlagern, Trinkwasser, Proliferation) ist gemessen an den heutigen Anforderungen mit großer Unsicherheit behaftet.

Im Rahmen des WTA „Realisierung eines Technologieträgers eines Hand- getragenen Detektions- und Identifikations- Systems“ wurde auf Initiative des GF 210 in Zusammenarbeit mit der Firma Thermo Fisher Scientific auf der technischen Basis des SVG2 eine mögliche technische Lösung umgesetzt (siehe Abb. 2). Das Gerät wurde aufgrund seiner weiten Verbreitung sowohl für handgetragene wie auch für Kfz-basierte Anwendungen im Bereich der ABCABwKr ausgewählt.

Unter Verwendung neuer Elektronikkomponenten für den bereits bestehenden Detektionsmesszweig war es möglich, das hierfür benötigte Volumen soweit zu reduzieren, um einen zusätzlichen Detektor für den Identifikationsmesszweig in den Technologieträger zu integrieren, ohne die bisherigen mechanischen Abmessungen oder die vorhandenen Schnittstellen wie sie vom SVG2 bekannt sind, abändern zu müssen.

In das so gewonnene Volumen wurde ein Szintillationsdetektor additiv integriert, und die Firmware mit der Möglichkeit zur spektroskopischen Analyse von Gamma-strahlenden Nukliden versehen. Neben dieser Software-basierten zusätzlichen Fähigkeit verfügt dieser Detektor über eine um Größenordnungen höhere spezifische Empfindlichkeit ggü. der bisher im SVG2 verbauten Gamma-Sonde. Damit ist es möglich, den Einsatzbereich des SVG2 erheblich zu erweitern, da das Gerät nun auch für einige Messungen im LLR-Bereich ohne zusätzliche externe

Sonde genutzt werden kann. Durch die additive Integration des Szintillationsdetektors hat die Zulassung der PTB für den Detektionszweig weiterhin Bestand. Der zusätzliche Einbau eines GPS-Sensors, könnte eine zeit- und orts aufgelöste Zuordnung der Messwerte und ihre Verwertung in der ABC-Abwehrberatung ermöglichen.

Da nicht nur die Leistungsfähigkeit bei der Detektion und Identifikation eine Rolle für eine mögliche Nutzung innerhalb der Bundeswehr spielt, sondern auch Aspekte wie der Fähigkeitserhalt bei einer Einführung, der Aufwand für die Logistik, sowie Ausbildung und Schulung berücksichtigt werden müssen, wurde versucht dies ebenfalls in den Technologieträger einzubringen. So können die bisher in die Bw eingeführten externen Sonden des SVG2 (ABG-Sonde, ASG-Kfz-Außensonden, NBR-Detektor, Neutronensonde und die Kontaminationssonden auch mit dem neuen Technologieträger genutzt werden. Die Menüführung für den Detektionszweig bleibt ebenfalls unverändert, sodass lediglich für den neuen Identifikationszweig eine zusätzliche Ausbildung erforderlich wäre.

TORR Sven Fisahn  
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien  
– ABC-Schutz (WIS)  
Munster

Dr. Thorsten Pusch  
Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

WISPosteingang@bundeswehr.org

info@int.fraunhofer.de

## Ein kompakter Sensor zur Detektion und Klassifikation von Angriffen mit gepulster elektromagnetischer Strahlung hoher Leistung

In zunehmendem Maße wird komplexe Elektronik missionskritisch, umso wichtiger ist daher die Detektion ansonsten unbemerkter oder nicht rückführbarer elektromagnetischer Störversuche. Der eigens am Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT entwickelte Labordemonstrator eines breitbandigen, netzwerkfähigen Sensors vereint einen kompakten, robusten Aufbau aus kostentoptimierter Hardware mit einer zugänglichen Nutzeroberfläche.

Schon Mitte des 20. Jahrhunderts wurde die militärische Relevanz der Störung von Geräten durch eingestrahelte elektromagnetische Wellen angesichts der disruptiven Wirkung eines nuklearen elektromagnetischen Pulses (NEMP) ersichtlich. Während dieses Phänomen durch Zündung einer Kernwaffe in höheren Atmosphärenschichten entsteht, können auch durch lokal eingesetzte Sendeanlagen hoher Abstrahlungsleistung elektronische Gerätschaften ge- oder zerstört werden (High Power Electromagnetics, HPEM).

Mangels sinnlicher Wahrnehmung bleibt dem Anwender allerdings die Ursache auf diesem Wege verursachter Gerätefehlfunktionen verschlossen, wenn nicht mit technischen Mitteln auf ungewöhnliche, über den erwartbaren zivilisatorischen Hintergrund hinausgehende elektromagnetische Strahlungsereignisse hingewiesen wird. Störeffekte können schon mit Impulsdauern im Sub-Nanosekundenbereich erzielt werden, insbesondere bei wiederholter Anwendung.

Durch zeitliche Verdichtung in kurze Impulse kann auch ein überschaubares Energiebudget effizient genutzt werden,



Abb. 1: Angriffsszenario elektromagnetischer Störversuche auf eine ortsfeste Einrichtung



Abb. 2: Betriebsstörung eines Tablet-Computers durch elektromagnetische Einwirkung mit Mikrowellen



Abb. 3: Außengehäuse des HPEM-Sensors

Sven Ruge  
Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

wodurch hochmobile und kompakte Störquellen möglich werden, welche in etlichen Metern Entfernung für Ausfälle sorgen. Effiziente Störer sind im Gegensatz zu den üblichen Funkdiensten nicht auf feste Arbeitsfrequenzen festgelegt, sondern decken mindestens den gesamten einstelligen Gigahertz-Bereich ab. Das stellt den Versuch einer ausreichend breitbandigen Erfassung vor technologische Herausforderungen.

Am Fraunhofer INT wurde beim Bau eines Sensors zur Detektion und Klassifikation von elektromagnetischen Störversuchen der Ansatz verfolgt, die frequenzabhängigen Eigenschaften aller signalverarbeitenden Teilkomponenten auf Grundlage einer Frequenzmessung der erfassten Signale zu korrigieren. Im Gegensatz zu anderen Lösungsvorschlägen im Markt ist dadurch die korrekte Quantifizierung der Signalamplituden möglich. Über die Erfassung der Signalhüllkurven mit einer Zeitauflösung von wenigen Nanosekunden sind zudem forensische Analysen möglich, gestützt durch die Erfassung weiterer Metadaten wie Impulsdauern und -wiederholraten.

Für eine unmittelbare Reaktion auf Störversuche wird in der grafischen Nutzeroberfläche des Systems neben den genannten Parametern auch die Einfallsrichtung der Signale angezeigt. Diese lässt sich auf Grundlage der Amplitudenunterschiede in den vierfach ausgelegten Empfangskanälen rekonstruieren,

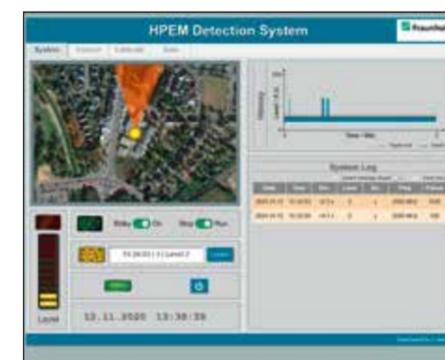


Abb. 4: Darstellung von Störereignissen in der grafischen Nutzeroberfläche im Webbrowser

Dr. rer. nat. habil. Michael Suhrke  
Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
Trendanalysen INT  
Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

die von je einer Antennenvorrichtung pro Himmelsrichtung gespeist werden.

Die verwendeten Schleifenantennen sind auf den vier seitlichen Wänden des würfelförmigen Detektorkorpus von knapp 20 cm Kantenlänge angeordnet. Während auf dessen Oberseite das Signal zur Frequenzmessung erfasst wird, befinden sich die Anschlüsse für eine faseroptische Netzwerkverbindung und für das Netzteil auf der Unterseite neben LED-Anzeigeelementen. Mit dem eingebauten Akku ist ein mobiler Betrieb über mehr als 10 Stunden möglich. Die Anzeige der Nutzeroberfläche erfolgt in einem Webbrowser auf einem Standard-PC, welcher im gleichen Netzwerk wie der Sensor eingebunden wird.

Für unerfahrene Nutzer ist eine vereinfachte Visualisierung vorgesehen, für forensische Analysen sind erweiterte Ereignisdaten und Experteneinstellungen zugänglich. Nach einer erfolgten Patentanmeldung wird aktuell die Einpassung des Sensors in die IT-Architektur eines militärischen Landfahrzeuges untersucht, unter Einbezug relevanter IT-Standards wie der NGVA (NATO Generic Vehicle Architecture) und des BMS (Battle Management System) Sitaware Frontline.

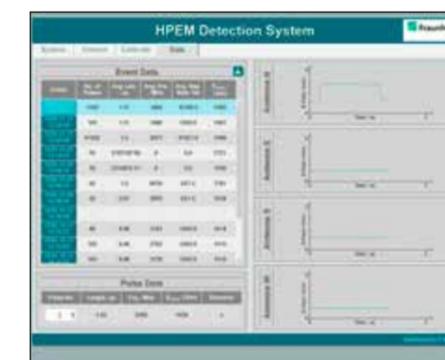


Abb. 5: Expertenansicht mit Detailinformationen zu erfassten Störereignissen

TRAmtn Dipl.-Ing. Tobias Hehn  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

LTDIir PD Dr.-Ing. habil. Jens Holtmannspötter  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

## Additive Fertigung von Elektronik

**Im Bereich der Additiven Fertigung werden immer weitere Anwendungsfelder erschlossen. Eines davon ist die Additive Fertigung von Elektrik bzw. Elektronik. Erste Demonstrationen der Technologie zeigen erhebliches Potential für Leistungssteigerungen und Verbesserungen in der Funktionsintegration.**

Übliche Leiterplatten bestehen aus mehreren Ebenen, deren Kontaktierungen zueinander einen erheblichen Widerstand in der Datenübertragung darstellen. Bauteile werden in der Regel nur auf Platinen in einer Ebene angeordnet. Durch additive Fertigungsverfahren sind nun freie Bahnführungen im Raum möglich. Zudem können Kondensatoren, Spulen, Wärmesenken und Schirmungen direkt eingedruckt und andere Bauelemente eingesetzt werden. Auch die Trennung von Gehäuse und Platine wird in Zukunft aufgehoben werden können.

Mit Multijet-Modeling Druckverfahren (MJM) können schon heute Platinen und einfache Bauteile mit Photopolymeren und Suspensionen mit leitfähigen Nanopartikeln gedruckt werden. Abb. 1 zeigt beispielsweise eine dreidimensionale, „gefaltene“ Platine mit einer Vielzahl von Ebenen und im Raum geführten Leitungen.

Der Druck elektrischer Bauteile erlaubt durch die Beseitigung von Störstellen und die Realisierung kürzerer Übertragungswege schon heute eine höhere Leistungsdichte. Fügt man aufgrund der Designfreiheit dem elektronischen, gedruckten Bauteil

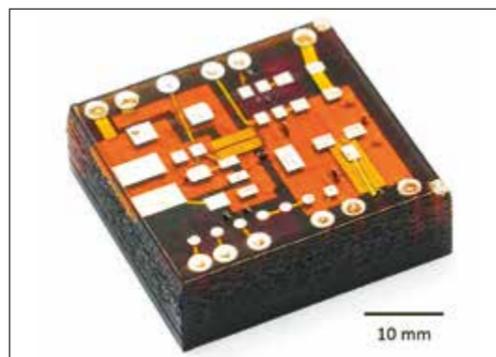


Abb. 1: 3D-gedruckter, im Raum gerouteter Würfel mit integrierten Schirmungen, Koaxialleitungen und Sicherheitsfunktionen

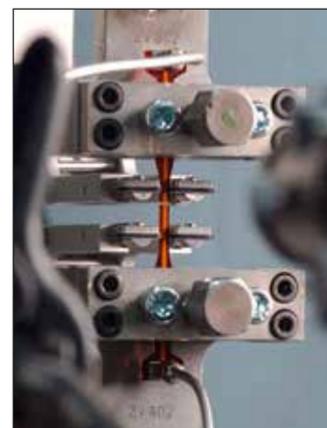


Abb. 2: Mechanische Prüfung des Verbunds aus leitfähigem und nicht-leitfähigem Material

TORR Dr.-Ing. Felix Zimmer  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

weitere mechanische Aufgaben hinzu, ergeben sich weitere Vorteile.

Neben grundlegenden Untersuchungen zur Druckqualität verschiedener Verfahren werden am WIWeB aktuell auch Untersuchungen zum Verhalten gedruckter Werkstoffverbunde hinsichtlich der mechanischen und elektrischen Eigenschaften durchgeführt (Abb. 2). Die Kenntnisse über das Verhalten der Werkstoffe im Verbund ist von hoher Bedeutung, um zuverlässig hochintegrierte Bauteile zu fertigen. Auch die gedruckten Werkstoffe werden detailliert untersucht. Abb. 3 zeigt einen Einblick in die Struktur des leitfähigen Materials vor und nach der im Druckprozess laufenden Versinterung. Es ist deutlich zu erkennen, wie aus den Nanopartikeln eine leitfähige Struktur zusammengewachsen ist.

Das Potential der Technologie ist erheblich. Neben den eingangs bereits erwähnten Performanceverbesserungen bestehen neue Möglichkeiten in der Miniaturisierung und Leistungssteigerung elektronischer Schaltungen. In Kombination mit sehr genauen Druckverfahren sind miniaturisierte elektromechanische Bauelemente möglich, die das Anwendungsspektrum weiter ausbauen. Zudem lassen sich durch Tintenstrahldruckverfahren gute Verbindungen von elektrischer Leiterbahn zu Textilien erzeugen, was Möglichkeiten zur Elektrifizierung der Bekleidung

erlaubt (Abb. 4). Textilintegrierte Funktionen wie Biomonitoring, Strom- und Datenleitung, aber auch Heizen und Kühlen sind denkbar und werden in diesem Zusammenhang erforscht.

Ein weiteres Anwendungsfeld sind neue Möglichkeiten für die IT-Sicherheit. Durch Schirmung, Verkapselung, Sollbruchstellen, sogenannte „physical unclonable functions“ und elektromechanische Schlüssel-Schloss Verfahren ergeben sich neue Möglichkeiten.

Nicht zuletzt kann durch diese Technologie die Umwelt entlastet werden, da das bisherige Verfahren zur Herstellung von Leiterplatten auf Ätzprozesse setzt, die nicht benötigtes Metall auf den Schichten der Platine entfernt. Bei additiver Fertigung kann auf die Verwendung vieler umweltschädlicher Stoffe inkl. deren Herstellung und Entsorgung verzichtet werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Additive Fertigung von Elektronik in Zukunft nicht nur die Systemperformance erhöhen kann, sondern auch gänzlich neue Anwendungsfelder erschließen lässt. Von elektromechanisch hochintegrierten Bauteilen über leitfähige Textilien bis hin zu neuen Sicherheitskonzepten sind die Anwendungen sehr vielfältig. Die Autoren sind der Überzeugung, dass hier viele Innovationen in naher Zukunft zu erwarten sind.

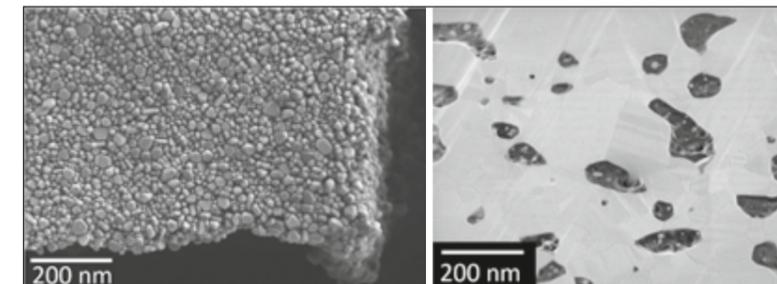


Abb. 3: Silber-Nanopartikel als Partikelagglomerat vor (links) und nach dem Sinterprozess (rechts). Die Umwandlung der einzelnen Nanopartikel in eine verbundene Struktur ist gut zu erkennen

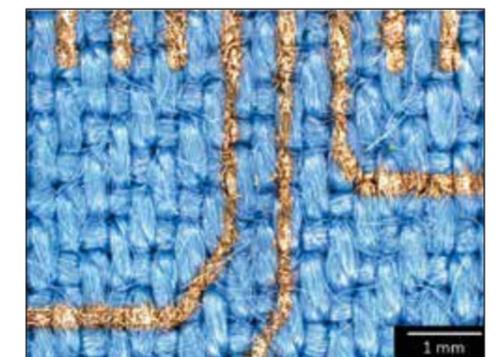


Abb. 4: Erste Versuche zum Bedrucken von Textilien mit leitfähiger Tinte

RDir Dr. Sebastian Scheuermann  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

ORR Dr. Christian Marquardt  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

## Kunststoffpyrolyse

**Bisher ungenutzte Ressourcen wie etwa Kunststoffreste könnten künftig einen Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs in Feldlagern leisten. Die pyrolytische Zersetzung von Kunststoffen vermag dabei kraftstoffähnliche flüssige Energieträger zu liefern, die wegen ihrer hohen Energiedichte militärisch von Nutzen sind. Es gilt, diese Technologie zu erforschen und ihr Anwendungspotenzial aufzuzeigen.**

Die Energiewende erfordert auch im Bereich der Streitkräfte eine grundlegende Umstellung der Energieversorgung. Dabei kann die Konversion bisher nicht verwendeter Reststoffe in nutzbare Energieträger einen Beitrag zur effizienten Ressourcennutzung – insbesondere in Einsätzen – leisten. Als chemischer Recyclingpfad birgt die pyrolytische Zersetzung von Kunststoffresten die Möglichkeit zur Erzeugung flüssiger und sicher lagerbarer Energieträger für Verbrennungsmotoren.

Bei der Pyrolyse (Abb. 1) von Kunststoffen werden die Polymere unter Sauerstoffausschluss thermolytisch in vornehmlich flüssige und gasförmige Produkte zerlegt. Besonders geeignet sind hierfür Polyethylen, Polypropylen sowie Polystyrol; andere Kunststoffe wie etwa PVC, Polyamide oder PET eignen sich weniger, da korrosive oder giftige Substanzen bzw. Feststoffe entstehen können. Da jedoch etwa die Hälfte der weltweit hergestellten Menge aller Kunststoffe zu den geeigneten Sorten zählen, steht eine breite Rohstoffbasis für den Prozess zur Verfügung. Im militärischen Kontext könnte die Technologie gerade in Feldlagern einen Beitrag zur künftig stärker diversifizierten Energieversorgung leisten.

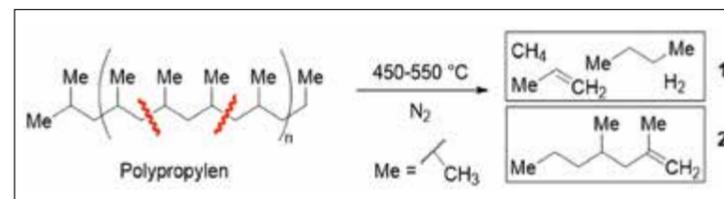


Abb. 1: Exemplarische thermische Zersetzung von Polypropylen unter Ausschluss von Sauerstoff  
1: Einige der gasförmigen Produkte  
2: Hauptprodukt 2,4-Dimethylhept-1-en



Abb. 2: Kunststoffpyrolyse im Röhrenofen. Kunststoff im Quarzglasrohr (oben links) wird geschmolzen (oben rechts). Der Crackvorgang startet (unten links) und Pyrolyseöle werden gebildet (unten rechts)

Dr. Albert Paparo  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

Als Ausgangspunkt der Arbeiten am WIWeB wurden zunächst im Labormaßstab (Abb. 2) die notwendigen Reaktionsbedingungen für die Pyrolyse eingegrenzt und erste Erfahrungen mit den entstehenden Pyrolyseprodukten gewonnen. Parallel dazu lieferten Hydrierungsversuche und die anschließende chemische Analytik der erhaltenen Flüssigkeiten (Abb. 3) Erkenntnisse zu den Möglichkeiten der Optimierung ihrer Eigenschaften. Eine hydrierende Aufarbeitung bietet sich an, um die überwiegend ungesättigten Pyrolyseprodukte zu sättigen und damit z. B. die Oxidationsstabilität oder die Energiedichte zu erhöhen. Nichtsdestotrotz handelt es sich um einen zusätzlichen Prozessschritt, sodass eine Abwägung von Aufwand und Nutzen erforderlich ist. Untersuchungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften der hydrierten und nicht-hydrierten Pyrolyseprodukte ergaben, dass die Flüssigkeiten bereits kraftstoffähnlich sind, eine Mischung mit fossilen Kraftstoffen jedoch notwendig ist, um die verbliebenen unzureichenden Eigenschaften zu kompensieren. Bei diesen handelt es sich im Wesentlichen um zu niedrige Dichten und Flammpunkte, sowie um abweichende Destillationsverläufe oder Kälteeigenschaften. Die Notwendigkeit zur Vermischung stellt keinen gravierenden Nachteil dar, da Kraftstoffe (perspektivisch: synthetische) für energieintensive militärische Anwendungen auch in Zukunft benötigt werden und die Pyrolyse lediglich einen Teil des Kraftstoffbedarfs zu ersetzen vermag.

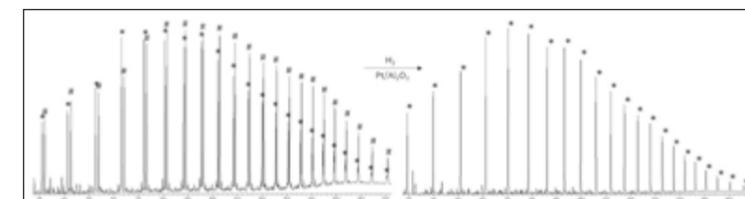


Abb. 3: GC-MS Untersuchungen an Polyethylen-Pyrolyseöl (links) und seinem Hydrierprodukt (rechts) #: n-Alkane. \*: 1-Alkene

Ausgehend von den Erkenntnissen aus den Laborexperimenten wurde der Prozess auf eine Prototypenanlage im Technikumsmaßstab (Abb. 4) übertragen, die unter den aktuell gewählten Betriebsbedingungen eine Pyrolysekapazität von 5 bis 10 kg Kunststoff pro Stunde hat. Ausgehend von reinem Polypropylen konnten bereits ausreichende Mengen an flüssigen Pyrolyseprodukten erzeugt werden, um in geeigneten Mischungen mit Dieselmotorische Prüfstandsversuche durchzuführen.

Die fortlaufenden Arbeiten auf dem Gebiet der Kunststoffpyrolyse zielen auf die weitere Optimierung der Reaktionsparameter ab, etwa um die Flüssigkeitsausbeute zu erhöhen und den Energieaufwand zu minimieren. Weiterhin muss der Einfluss der eingesetzten Kunststoffsorten und ihrer Mischungen auf die Eigenschaften der Pyrolyseprodukte erforscht werden, um sich schrittweise einem praktisch relevanten Szenario anzunähern.



Abb. 4: Technikumspyrolyseanlage am WIWeB

Dr. Fernando Israel Rial Villar  
 Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR  
 Wachtberg  
 info@fhr.fraunhofer.de

Dr. Christian Bräu  
 Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR  
 Wachtberg  
 info@fhr.fraunhofer.de

### 3D-bildgebende Sensorik für die Detektion von vergrabenen Kampfmitteln

Bodenpenetrationsradare sind für die abstandsfähige Detektion von vergrabenen Landminen und IEDs (Improvised Explosive Devices) geeignet. Die Vorzüge von multistatischen gegenüber bistatischen Sensorarrays wurden an der Wehrtechnischen Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52) mit Hilfe verschiedener Zielobjekte und Böden untersucht. Das Ergebnis zeigt das Potenzial für eine 3D-Bildgebung sowie einer verbesserten Detektion und Klassifikation von vergrabenen Bedrohungen auf.

In Szenarien für Route Clearance, Minenräumung und Military Search dient die abstandsfähige Detektion von Kampfmitteln (Landminen, Blindgänger oder behelfsmäßige Spreng- und Brandvorrichtungen, engl. improvised explosive devices IED) der Vermeidung von Gefahr für Leib und Leben unserer Soldatinnen und Soldaten. Mit dem deutschen Route Clearance System (RCSys) hat die Bundeswehr die Fähigkeit, diese im Boden verbrachten Bedrohungen zu detektieren.

Das Detektorfahrzeug mit einem integrierten Bodenpenetrationsradar (GPR) ist die Kernkomponente des RCSys mit der Fähigkeit zur abstandsfähigen Detektion. Dieser Sensor besteht aus einer Gruppe von GPR-Antennen, die gleichzeitig zum Beispiel eine Straße auf vergrabene Objekte mit großem Flächenumsatz absannen kann. Ein Ziel der Weiterentwicklung von GPR-Sensorik ist mehr Information über vergrabene Zielobjekte zu gewinnen. Der Auswerteprozess soll mit automatisierter Detektion und Klassifikation verbessert werden.

Die multistatische GPR-Messung ist hier eine Möglichkeit der Optimierung. Die GPR-Arrayantennen arbeiten hier nicht

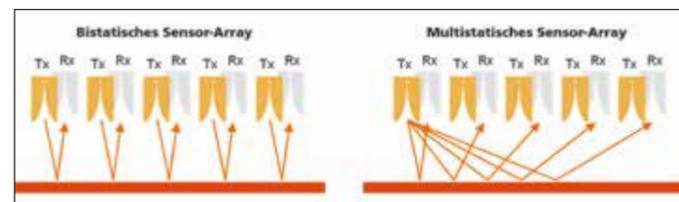


Abb. 1: Bistatische und multistatische Systeme



Abb. 2: GPR-Array-System und L-IED-Halle

Dr. Matthias Maier  
 Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52)  
 Oberjettenberg  
 WTD52GF330@bundeswehr.org

unabhängig voneinander, sondern die Signale werden während der Messung kombiniert (Abb.1). Die Datenmenge und Hardwarekomplexität nehmen hierbei stark zu. Jedoch könnte sich dieser Prozess durch die zusätzliche Abtastung als vorteilhaft erweisen, um eine bessere Bildqualität sowie Zielaufklärung zu erhalten.

Damit der Nutzen eines multistatischen GPR im militärischen Kontext abgeschätzt werden kann, wurde an der WTD 52 in Oberjettenberg eine Studie in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR durchgeführt. Teil dieser Studie waren Messungen in der Landminen- und IED-Detektionshalle (L-IED-Halle) an der WTD 52. Als einmalige Infrastruktur bietet die fast metallfreie, großteils aus Holz bestehende L-IED-Halle Testflächen mit verschiedenen Bodentypen. Unter reproduzierbaren Bedingungen ist es hier möglich, den Einfluss von verschiedenen Bodenparametern auf die Leistung von Detektionssystemen zu untersuchen. Die Testflächen beinhalten Böden aus Basalt, Humus, Lehm, Sand und Schotter (Abb. 2).

Bei der Auswertung der Messungen wurden bildgebende Algorithmen benutzt, um eine 3D-Rekonstruktion von Zielobjekten zu erhalten. Dies ergibt ein qualitatives Maß für die Unterschiede zwischen bi- und multistatischen Systemen. Abb. 3 zeigt auf der

linken Seite ein Radargramm einer einzelnen GPR-Antenne einer vergrabenen 60-mm-Mörsergranate. In der Mitte der Abb. sieht man eine 3D-Darstellung, in der alle GPR-Sensoren im bi- oder multistatischen Modus kombiniert wurden. Multistatische Bildgebung verbessert hier generell den Kontrast und damit das Signal-zu-Clutter-Verhältnis des Zielobjektes. Dies führt zu einer besseren Objektrekonstruktion. Über die Objekthelligkeit wurden tomographische Schnitte des Zielobjektes analysiert, um die Leistung der Systeme quantitativ zu vergleichen (Abb. 4).

Die vielversprechenden Ergebnisse unserer Untersuchungen könnten in zukünftigen militärischen Systemen für die IED- und Minenräumung verwendet werden. Hierbei wäre eine Integration in GPR-Systemen auf unterschiedlichen unbemannten Trägerplattformen (UxV) denkbar.

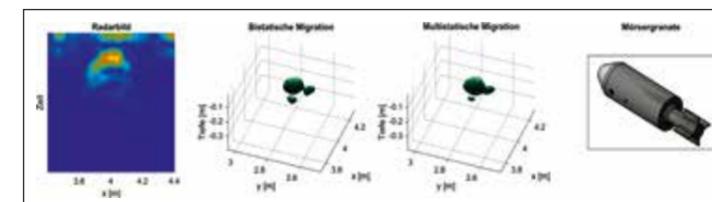


Abb. 3: Vergleich der Objektrekonstruktionen mit Hilfe von Bi- und Multistatik

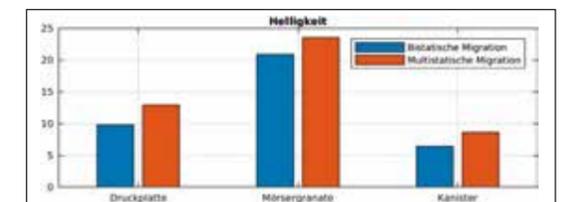


Abb. 4: Vergleich der Objekthelligkeit für verschiedene Zielobjekte

## Rapid Deployable Reconnaissance System (RDRS)

Das Projekt Rapid Deployable Reconnaissance System (RDRS) ist ein Innovationsprojekt des Drone Innovation Hub (DIH) der Bundeswehr mit der Firma Polaris Raumflugzeuge GmbH, in Kooperation mit dem Geschäftsfeld „UAS-Gesamtsysteme & Nationales Kompetenzzentrum UAS“ an der Wehrtechnischen Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät der Bundeswehr (WTD 61). Im Rahmen des Projektes wird die Nutzung von neuartigen, sogenannten Raumflugzeugen für weltraumbasierte und Hyperschall-Aufklärung untersucht.

Horizontal startende Raumflugzeuge stellen eine neuartige Kategorie von Raumtransportsystemen für den Zugang zum Weltraum dar, die wie ein Flugzeug von konventionellen Start- und Landebahnen operieren, und keine spezialisierte Bodeninfrastruktur in Form eines Weltraumbahnhofes mehr benötigen. Aufgrund des potentiell hohen Mehrwerts für militärische Anwendungen, führt das Projekt RDRS eine Untersuchung und Bewertung des Raumflugzeugs Aurora (Abb. 1) der Firma Polaris für die Verwendung als flexibles und weltweit einsetzbares Weltraumbasiertes- und Hyperschall-Aufklärungsmittel durch.

Die Technologie wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR konzipiert, basierend auf Erkenntnissen von mindestens 30 Jahren Raumflugzeug-Forschung.

Das System wird von einer Kombination aus Turbostrahl-Triebwerken und Raketentriebwerken angetrieben. Der für Wiedereintritt und Hyperschallflug erforderliche Hitzeschild basiert auf metallischen Thermalschutz-Paneele, welche die Nachteile klassischer keramischer Hitzeschilde, wie sie



Abb. 1: Raumflugzeug Aurora



Abb. 2: Absetzen einer wiederverwendbaren Oberstufe

etwa beim Space Shuttle verwendet wurden, im Hinblick auf Robustheit und Wartungsaufwand beseitigen.

Im Projekt RDRS werden zwei Einsatz-Konfigurationen betrachtet. In der ersten Ausführung wird das Raumflugzeug Aurora selbst als Hyperschall-Aufklärungsplattform verwendet. In der zweiten Ausführung dient Aurora als Träger- und Startplattform für eine wiederverwendbare, orbitale Oberstufe (Abb. 2). Neben der im Projekt untersuchten Aufklärungsaufgabe, ist die Nutzung des Raumflugzeugs als reaktionsschnelles, flexibles und kostengünstiges Satellitenstartsystem vorgesehen.

In ersten Arbeiten wurden über Bahnsimulationen und technische Analysen die Nutzbarkeit des Raumflugzeugs als weltweit einsetzbare und flexible Aufklärungsplattform nachgewiesen. Insbesondere wurde gezeigt, dass in Verbindung mit der Luftbetankungsfähigkeit jeder Punkt der Erde in kurzer Zeit erreicht und aufgeklärt werden kann (Abb. 3). Ebenso wurde eine globale Verlegefähigkeit mit anschließender Operation von anderen Operationsbasen aufgezeigt. Dies ermöglicht auch, für Starts von Satelliten oder wiederverwendbaren Oberstufen den jeweils optimalen Einschusspunkt für den gewünschten Orbit zu wählen.

Zusätzlich wurden Fragen der Luftraumintegration sowie luft- und weltraumrechtliche Fragestellungen in Zusammenarbeit mit dem DLR und der Fachkanzlei BHO Legal erörtert. Handlungsbedarf wurde insbesondere im Bereich der in Deutschland bzw. der EU noch ausstehenden Weltraumgesetzgebung identifiziert. Bereits erarbeitete Regularien aus den USA und Großbritannien können hierbei als Blaupause dienen.



Abb. 3: Luftbetankung des Raumflugzeugs

Flankiert wurden die Machbarkeitsuntersuchungen von der Auslegung eines wiederverwendbaren Flugdemonstrators, der die Geometrie des Raumflugzeugs im Maßstab 1 : 8 wieder gibt. Dieser soll als erstes Luft- und Raumfahrzeug überhaupt von einem sogenannten Linearen Aerospikes Raketentriebwerk angetrieben werden, das in Zusammenarbeit mit der TU-Dresden im Rahmen des Projekts vorkonzipiert wurde. Aerospikes Triebwerke versprechen signifikante Leistungssteigerungen gegenüber konventionellen Raketentriebwerken.

Die Machbarkeitsstudie hat keine grundlegenden technologischen Hürden identifiziert. Ganz im Gegenteil liegen die Herausforderungen eher im rechtlichen Bereich, und sollten zügig angegangen werden.

Die nächsten Entwicklungsschritte umfassen Flugversuche mit wiederverwendbaren Raketen-getriebenen Flugdemonstratoren im Maßstab 1 : 8 und 1 : 5. Bereits für das Jahr 2025 ist der Erstflug eines 1 : 1 Prototypen geplant, der auch operativ genutzt werden soll. Das Raumflugzeug soll dabei sowohl kommerzielle / zivile, als auch militärische Missionsszenarien bedienen können. Die Finanzierung des Projekts ist weitgehend über privatwirtschaftliche Investitionen vorgesehen. Die Bundeswehr kann in der Funktion des möglichen Ankerkunden maßgeblich zur Realisierung des Vorhabens beitragen.

Dipl.-Ing. Ulrich Siller  
AeroDesignWorks GmbH  
Köln

post@aerodesignworks.com

Dr.-Ing. Georg Kröger  
AeroDesignWorks GmbH  
Köln

post@aerodesignworks.com

## Entwicklung, Inbetriebnahme und Test eines modernen 900N Turbostrahltriebwerks

Der erste Prototyp eines modernen Turbostrahltriebwerks für kleine unbemannte Luftfahrzeuge konnte innerhalb von bodengebundenen Tests erfolgreich untersucht und in den Vorserienstatus überführt werden. Durch die kompakten Abmessungen (Durchmesser 240 mm, Länge 622 mm, Gewicht < 20 kg) und einen spezifischen Verbrauch von 29.6 g / kN/s beim Nennschub von 850N kann das Triebwerk sehr überzeu-

gen. Der Bedarf an kleinen unbemannten Luftfahrzeugen steigt beständig. Damit einher geht die steigende Notwendigkeit von weitaus effizienteren Turbostrahltriebwerken, als der Markt in der relativ kleinen Schubklasse derzeit zur Verfügung stellt. Im Zuge eines sehr ambitionierten Entwicklungsprojekt konnte in weniger als zwei Jahren ein erster Prototyp eines Turbostrahltriebwerks entwickelt und getestet werden, dessen spezifischer Verbrauch circa 20 % unter dem marktüblichen Stand liegt. Dies wurde durch den konsequenten Fokus auf Effizienz und Kompaktheit in jedem einzelnen Entwicklungsschritt ermöglicht. Nicht weniger wichtig waren weitere Randbedingungen wie niedrige Kosten, gute Einlagerungsmöglichkeiten und eine hohe Widerstandsfähigkeit bei großen Trägheitslasten.

Das Triebwerk besteht aus einem einstufigen Diagonalverdichter, der ein hohes Druckverhältnis bei hohem Wirkungsgrad bietet, einer drallstabilisierten Umkehrbrennkammer, der durch eine digital angesteuerte Hochdruckpumpe Treibstoff in zerstäubter Form zugeführt wird, und einer ebenfalls einstufig ausgeführten Radialturbine, die ebenfalls einen äußerst guten Wirkungsgrad bei einem hohen Druckverhältnis realisiert.



Abb. 1: Vollständiger Rotor (Verdichter- und Turbinenrad) beim Wuchten



Abb. 2: Rückansicht der A800 mit additiv gefertigtem Kraftstoffverteiler

Michael Woopen, M. Sc.  
AeroDesignWorks GmbH  
Köln

post@aerodesignworks.com

Um dem immer größer werdenden Bedarf an elektrischer Leistung gerecht zu werden, kann der für den Triebwerksstart eingesetzte, direkt gekoppelte Motor im Betrieb als effizienter Generator betrieben werden. Die vollständig digitale Triebwerkssteuerung kommuniziert mit allen Nebenaggregaten und Sensoren über gängige Bussysteme.

Nach der Festlegung des fundamentalen Konzepts des Triebwerks konnten die einzelnen Komponenten interdisziplinär ausgelegt werden. Hier flossen neben der Erfahrung aus serien-erprobter Technologie auch moderne Technologie im Bereich Auslegung und Optimierung von Turbokomponenten ein. Der Blick auf das Zusammenspiel der Einzelkomponenten in einem gesamtheitlichen konstruktiven Konzept war auch hier ein ständiger Begleiter. Durch ein äußerst zuverlässiges Netzwerk an sehr fähigen und hoch motivierten Zulieferern konnten alle Bauteile in der nötigen Qualität gefertigt werden. Vorzeitige Tests von Komponenten oder Subsystemen haben es ermöglicht, frühzeitig nötige Anpassungen oder erste Optimierungen zu implementieren.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme konnten die prognostizierten Leistungsdaten des Triebwerks innerhalb einer Reihe von bodengebundenen Tests bestätigt werden. Neben den naheliegenden Werten wie Schub und Treibstoffverbrauch

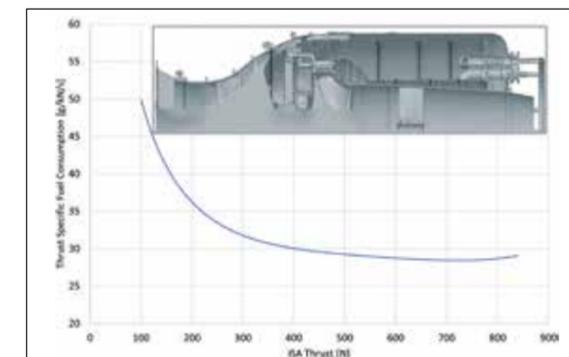


Abb. 3: Spezifischer Verbrauch über Schub & Triebwerksüberblick

TORR Niklas Mesterheide  
Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät  
der Bundeswehr (WTD 61)  
Manching

Wtd61AntriebFuT@bundeswehr.org

wurde ein besonderer Fokus auch auf den robusten Betrieb gelegt. Dazu zählen neben einer ständigen Überwachung der Turbineneintritts- und Lagertemperaturen auch die Aufnahme von Schwingungen in beiden Lagerebenen. Weiterhin wurde die Situation im Luftfahrzeug durch einen entsprechenden Einlauf nachgestellt und vermessen. Mitsamt den Erfahrungen dieser ersten Entwicklungsrunde wurde der Triebwerksentwurf anschließend weiter hinsichtlich Effizienz, Robustheit und Fertigbarkeit optimiert und so für den Schritt in die Vorserie vorbereitet. Durch eine gründliche Vorarbeit konnten unnötige Verzögerungen durch große Änderungen vermieden werden.

Die Ziele des Entwicklungsprojekts konnten somit sowohl auf der Technologieebene als auch auf der Projektebene erreicht werden. Die gefertigten Exemplare der Vorserie des Triebwerks werden in den nächsten Schritten weiteren Tests unterzogen. Die abschließenden Vorbereitungen der Serienfertigung stellen die nächste Herausforderung im Zuge der Entwicklung des Triebwerks dar und markieren dennoch nur den Anfang.

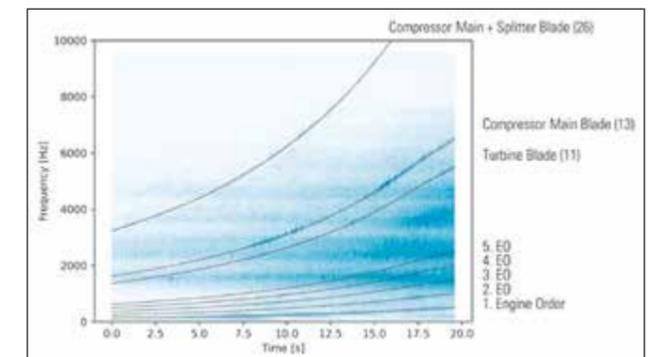


Abb. 4: Spektralansicht der Triebwerksvibrationen während des Starts

Dr. Lars Planert  
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,  
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)  
Kiel

WTD71posteingang@bundeswehr.org

Ralf Lühder  
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,  
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)  
Kiel

WTD71posteingang@bundeswehr.org

## Sedimenttransport und Minenversandung

**Die Detektion von versandeten und teilversandeten Grundminen stellt eine Herausforderung für die Minenabwehrheiten der Marine dar. Für eine Versandungsvorhersage ist die Kenntnis der strömungsmechanischen Prozesse notwendig, die den Sedimenttransport im Umfeld einer Mine am Meeresboden bestimmen. Die entsprechenden Sedimenttransportprozesse werden bei der Wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) in Seeversuchen untersucht.**

Der Versandungsgrad einer Grundmine bestimmt maßgeblich die zu erwartende Detektionswahrscheinlichkeit und beeinflusst damit das taktische Vorgehen der Marine im Rahmen von Mine Countermeasures (MCM) Operationen. Die Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) untersucht die strömungsmechanischen Prozesse in der Bodengrenzschicht flacher Küstengewässer mit dem Ziel, qualitativ hochwertige Messdaten zur Minenversandung zur Verfügung zu stellen, um das Potential zukünftiger Simulations- und Prognosetools zu bewerten.

Aufbauend auf externen F&T-Studien zu Modelltankversuchen und numerischen Simulationen werden hydrodynamische Antriebsprozesse wie Wellen, Gezeiten und Turbulenz sowie die dadurch verursachten Veränderungen der Bodenstruktur (Morphodynamik) im Naturmaßstab untersucht. Ein zentrales Augenmerk liegt auf den Kolk- und Versandungsprozessen im Nahfeld der umströmten Mine. Hier wird das Sediment verstärkt aufgewirbelt, abtransportiert sowie im Strömungsschatten wieder abgelagert. Ursächlich für diese Prozesse

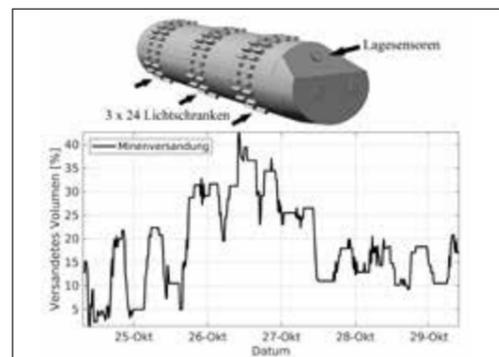


Abb. 1: Schemaskizze der Versandungsmessmine mit Lichtleitern (oben). Versandungszeitreihe einer Messmine in der Jade (unten)



Abb. 2: Bodengestell zur Analyse der Hydro- und Morphodynamik im Einflussbereich der Messmine am Meeresboden

sind Wirbelstrukturen, zu denen im Fall einer zylindrischen Grundmine die Entstehung eines Hufeisenwirbels entlang der angeströmten Objektränder und die Ausbildung eines Rückstromgebietes im Nachlauf der Mine gehört. Kolkbildung kann dazu führen, dass ein Objekt ins Sediment einsinkt, was je nach Form und Ausrichtung des Objekts relativ zur Anströmung mit Roll- bzw. Rutschbewegungen einhergeht. Überlagert werden diese Nahfeldprozesse durch längerperiodische Versandungsschwankungen, die in gezeitendominierten Gebieten wie der Deutschen Bucht und ihren Ästuaren durch die Wanderung von großen Rippeln verursacht werden. Diese regionalen Änderungen der Bodenstruktur können dazu führen, dass die Minen vollständig mit Sediment bedeckt und im Rippeltal auch wieder freigelegt werden.

Mit an der WTD 71 entwickelten Versandungsmessminen, die ihre Versandung entlang umlaufender Ringe mit Lichtleitern messen (Abb. 1), und Strömungsmessminen, die mit hochauflösenden dopplerakustischen Strömungsmessern bestückt werden, können die Versandungs- und Antriebsprozesse des Sedimenttransports im Naturmaßstab gemessen werden. Gegenwärtig steht die Untersuchung der wirbelhaften Umströmung der Mine im Fokus der Analysen. Mit Hilfe eines großen Bodengestells (Lander, Abb. 2) können hochauflösende dopplerakustische Strömungsmesser im Wirkungsbereich dieser Wirbel platziert und so der Einfluss auf den Sedimenttransport am Boden und in der Wassersäule gemessen werden (Abb. 3). Aus den Dopplergeschwindigkeitsmessungen werden die Turbulenz und die Sohlschubspannung bestimmt. Letztere ist die auf die Flächeneinheit des Bodens bezogene, durch die Strömung auf die Sedimentpartikel am Boden ausgeübte Kraft und ein entscheidender Parameter für die Mobilität der Sohle.

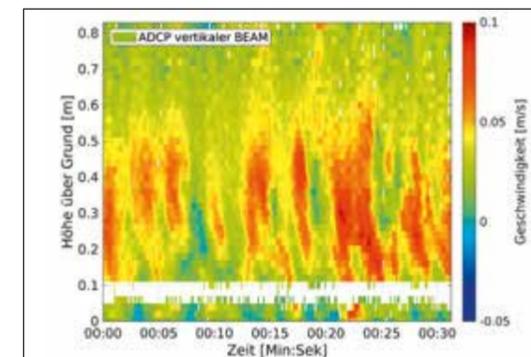


Abb. 3: 30-Sekunden Zeitausschnitt der vertikalen Strömung mit Wirbelstrukturen im Nachlauf der Mine

Die Sedimentkonzentration in der Wassersäule wird durch laseroptische Streuung und dopplerakustische Rückstreuung gemessen. Durch ein am Bodengestell verbauten rotierendes Sonar wird die Morphodynamik im Umfeld der Mine erfasst. Dadurch ist es möglich, die Entstehung und Bewegung von Rippeln sowie die Größe und Lage von Kolklöchern und Versandungsstrukturen zu analysieren und mit den Lichtleiter-Versandungsmessungen an der Mine zu korrelieren (Abb. 4).

Die Ergebnisse der Seeexperimente unterstreichen die Komplexität der für die Minenversandung relevanten Sedimenttransportprozesse. Mit den vorhandenen qualitativ hochwertigen Messdaten aus den Seeversuchen kann das Potential zukünftiger Simulations- und Prognosetools bewertet werden. Für das Fernziel, die Entwicklung eines Minenversandungsprognosetools besteht weiterhin noch erheblicher Forschungsbedarf im Bereich der gekoppelten hydro- und morphodynamischen Simulation.

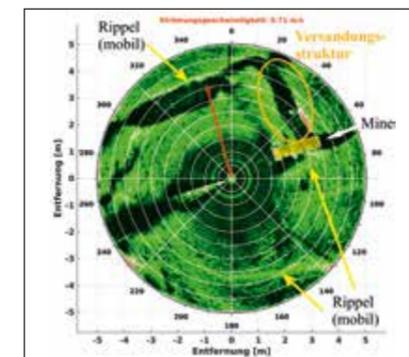


Abb. 4: Das 360°-Sonar Bild zeigt mobile Rippel und eine Versandungsstruktur im Nachlauf der Mine

TORR Markus Wenner  
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,  
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)  
Bünsdorf

WTD71posteingang@bundeswehr.org

TORR Frank Ludwar  
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,  
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)  
Eckernförde

WTD71posteingang@bundeswehr.org

## Messung elektrischer und magnetischer Signaturen mit unbemannten Unterwasserfahrzeugen

Um eine Verbesserung des Eigenschutzes von Einheiten der deutschen Marine sicherzustellen, wird eine Vermessung der Unterwassersignatur im Einsatzgebiet angestrebt. Ziel ist es, unerwartete Änderungen der Schiffssignaturen z. B. durch Beladungsänderungen oder Defekten an der Magnetischen Eigenschutzanlage zu entdecken, um dann darauf reagieren zu können und die Gefährdung durch Seeminen so gering wie möglich zu halten. Eine Lösungsmöglichkeit ist die Signaturvermessung mittels eines unbemannten Unterwasserfahrzeuges (Unmanned Underwater Vehicle, UUV).

Seeminen stellen eine große Bedrohung für Schiffe dar. Viele Minen nutzen zur Detektion eines überlaufenden Schiffes neben akustischen Sensoren einen Magnetfeldsensor oder elektrische Feldsensoren. Ein Schiff verändert durch seine Anwesenheit die natürlichen elektrischen und magnetischen Umgebungsfelder und kann dadurch entdeckt werden.

Um die Verratsreichweite von hochgeschützten Einheiten der Marine so gering wie möglich zu halten, werden sie zum einen in amagnetischer Bauweise hergestellt. Sie besitzen zum zweiten eine Magnetische Eigenschutzanlage (MES), die die durch das Schiff hervorgerufene Veränderung des Erdmagnetfeldes an jedem Punkt der Erde aktiv durch den Einsatz von stromdurchflossenen Kompensationswicklungen so gering wie möglich hält.

Die Einstellungen einer MES-Anlage werden bei der Wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) in Bünsdorf im Erdmagnetfeldsimulator optimiert. Die einwandfreie Funktionsfähigkeit kann unter anderen Erdmagnetfeldbedingungen im

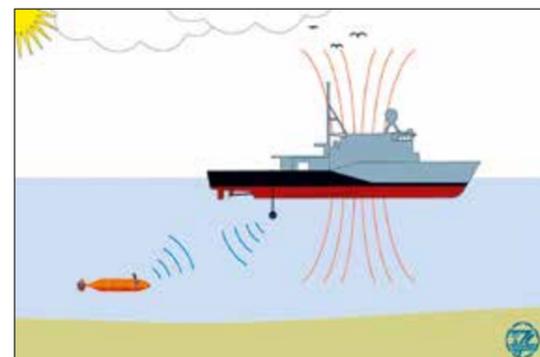


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Signaturvermessung mit einem UUV



Abb. 2: Trägerfahrzeug MZB Helmsand mit Launch and Recovery System für AUV Hugin mit Akustik-Link Boje

Einsatzgebiet nur durch eine Vermessung vor Ort nachgewiesen und ggf. optimiert werden. Auch die jeweilige Beladung des Schiffes kann registrierbare Verschlechterungen der Unterwassersignatur zur Folge haben.

Um die Unterwassersignatur von einem UUV aus vermessen zu können wurde eine entsprechende Sensorik mit Datenerfassungshardware in die Nutzlastsektion des AUV Hugin integriert. Das UUV wird im Einsatzgebiet ausgesetzt und navigiert in versetzten Kreisbahnen unter dem Schiff mit einer gleichzeitigen präzisen Bestimmung der Position im Koordinatensystem des Schiffes / Bootes, während der jeweilige Feldvektor gemessen und aufgezeichnet wird. Das UUV muss dabei die Positionsveränderung des Fahrzeuges berücksichtigen. Eine Steuerung während der Messfahrt wird über einen akustischen Link sichergestellt.

Eine besondere Herausforderung besteht beim Postprocessing in der Korrektur der aufgenommenen Messwerte. Zuerst sind Fehler der Sensorik inklusive der Analog-Digital Wandlung wie Offset- und Orthogonalitätsfehler zu eliminieren. Zudem erzeugen die elektrischen Verbraucher und Leitungen des Trägerfahrzeuges in unmittelbarer Nähe der Sensorik starke magnetische Streufelder. Zu deren Elimination ist die Kenntnis der einzelnen Ströme im UUV erforderlich, was in einem Standardfahrzeug nicht gegeben ist.

Der stärkste Störeinfluss wird durch die Bewegung des Magnetfeldsensors im Erdmagnetfeld selbst verursacht. Um dies zu korrigieren ist eine genaue Bestimmung der Sensorausrichtung und Lage während der Fahrt als auch die Ermittlung der relativen Position des Sensors zum Messobjekt notwendig.



Abb. 3: Vermessung der magnetischen Eigenschaften des Nutzlastbehälters

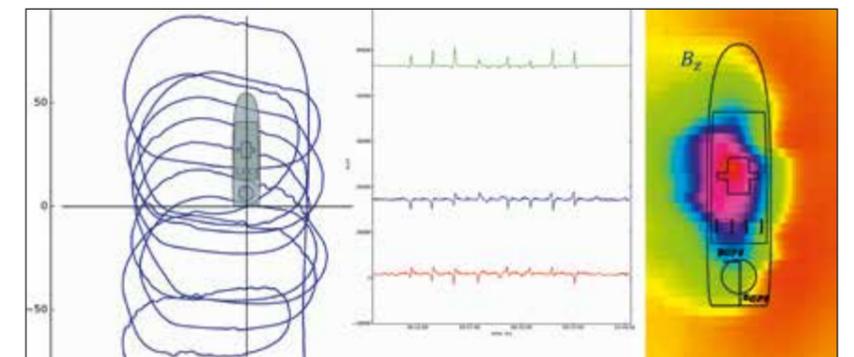


Abb. 4: Aufgezeichneter Track unterhalb des zu vermessenden Fahrzeuges

Bislang konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass eine Vermessung der magnetischen Signatur mittels unbemanntem Fahrzeug im Einsatzgebiet möglich ist. Zukünftige Untersuchungen sollen mit einem auf die Signaturvermessung optimierten dedizierten Mess-AUV stattfinden und den Nachweis erbringen, dass auch die elektrische Signatur von einem UUV im Einsatzgebiet vermessen werden kann.

Neben der Möglichkeit die Funktionsfähigkeit einer MES-Anlage überprüfen und optimieren zu können liefert die Vermessung der elektrischen Signatur vor Ort auch Information über den Beschichtungszustand des Schiffes sowie einen Status der eingesetzten Korrosions- und Bewuchsschutzmaßnahmen, welche maßgeblichen Einfluss auf die eigene elektrische Unterwassersignatur haben.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit neben der Vermessung der Unterwassersignatur im Einsatzgebiet ist die Ermittlung von Parametern für ein Minenräumsystem welches einen Kanal für das vermessene Schiff im Target Simulation Mode (TSM) räumen soll. Die gilt besonders für die elektrische Unterwassersignatur.

Mit der Fähigkeit die magnetische Signatur oberhalb von Ubooten vermessen zu können, wird es ermöglicht eine sicherere Abschätzung der Entdeckungswahrscheinlichkeit durch Seezielaufklärer geben zu können.

Frank Jaspers  
Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91)  
Meppen

WTD91450@Bundeswehr.org

Stefan Vrieler  
Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91)  
Meppen

WTD91510@Bundeswehr.org

## Der virtuelle Handlungstrainer – Neue Möglichkeiten in der Teamausbildung

**Welche Chancen und Möglichkeiten bietet die Virtuelle Realität bei der Ausbildung im gemeinsamen Team-Training? Mit dieser Fragestellung befasst sich die F&T Studie „VirTuOS – Virtuelles Training urbaner Operationen als Multi-User-Szenario“ und findet dabei Antworten.**

Die Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91) führt zusammen mit dem Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) die F&T Studie „VirTuOS – Virtuelles Training urbaner Operationen als Multi-User-Szenario“ durch. In dieser Studie wurde exemplarisch der virtuelle Handlungstrainer (VirtHT) als Demonstrator zur Untersuchung einer Ausbildung am Beispiel Orts- und Häuserkampf vorgenommen. Zu Beginn der Studie stand die technische Realisierung und Lauffähigkeit des Demonstrators im Fokus. Weiterhin wurden wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zur Umsetzbarkeit von Bewegungen in der VR mit bis zu vier Nutzern, die Interaktion mit der VR und anderen Nutzern sowie ergonomische Betrachtungen vorgenommen. Einen besonders hohen Stellenwert bei den Untersuchungen besitzt gleich zu Beginn die Feststellung des Mehrwerts von Ausbildung und Training in einer VR-Umgebung gegenüber konventionellen Ausbildungsmethoden.

Beim VirtHT handelt es sich um einen Bereich, der das Tracking des menschlichen Körpers in einem frei begehbaren Bereich von 100 m<sup>2</sup> ermöglicht. Dabei können sich zeitgleich vier Soldatinnen



Abb. 1: Trackingbereich des virtuellen Handlungstrainers

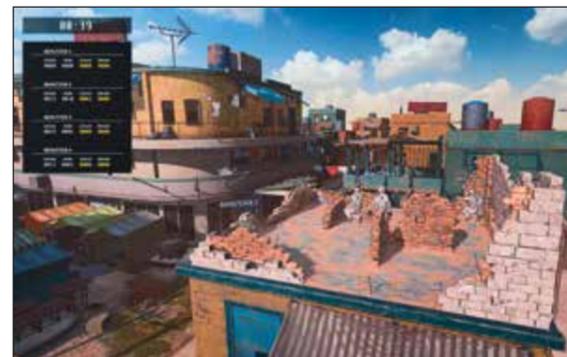


Abb. 2: Darstellung der Soldaten bzw. Soldatinnen in der VR

nen und Soldaten in der Area bewegen. Damit die einzelnen Soldaten erfasst werden, wird ein Trackingsystem eingesetzt. Auf dem Rücken wird ein sogenannter Back-Pack-PC getragen, an dem unter anderen die VR-Brille angeschlossen ist. Zur Steigerung des Präsenzepfindens trägt der Soldat bzw. die Soldatin eine haptische Weste, die einen gegnerischen Treffer durch das Auslösen einer Vibration signalisiert. Weiterhin kommt ein Nachbau des Sturmgewehrs G36 mit integriertem Gas-Rückstoßsystem zum Einsatz.

Nach dem Anlegen des VR-Equipment und durchgeführter Kalibrierung, befindet sich der Soldatentrupp auf einem virtuellen Häuserdach. In unterschiedlichen Entfernungen erscheinen nun Personen, die entweder als neutrale Person oder als potentielle Angreifer dargestellt werden. Gemäß Ausbildungsgrundlagen teilt sich der Trupp auf, so dass jeder einen festen Beobachtungssektor übernimmt. Der nicht an der Mission beteiligte Ausbilder bzw. die Ausbilderin kann die agierenden Soldaten und Soldatinnen sowohl real als auch in der virtuellen Umgebung beobachten. Dem Ausbilder werden Informationen zu jedem einzelnen Soldaten, wie z. B. Anzahl abgegebener Schüsse, Anzahl getroffener Gegner und neutrale Personen angezeigt. Durch die Verwendung der auch im kommerziellen Bereich häufig eingesetzten Spiele-Engine Unreal ist die grafische Darstellung in Verbindung mit hochwertigem Inhalt sehr realistisch.

Um unter anderem die Nutzbarkeit sowie Schwächen des Systems festzustellen, wurden innerhalb dieser Studie an der WTD 91 Probandenuntersuchungen mit insgesamt 32 Soldaten aus dem Bereich der spezialisierten und Spezialkräfte durchgeführt. Der VirtHT war zum Zeitpunkt der Probandenunter-



Abb. 3: Übersicht Real und VR

suchung eher ein generischer Demonstrator zur Abbildung der technischen Möglichkeiten, und daher noch kein vollständiger Ausbildungssimulator für einen konkreten Ausbildungszweck. Durch diese Vorgehensweise ist eine zielgerichtete und risikominimierte Forschung möglich, denn erst nach Feststellung der grundsätzlichen Eignung des Systems auf Nutzbarkeit ist es sinnvoll, die Studie weiter fortzuführen.

Durch die Probandenuntersuchungen konnte eine Fülle an belastbaren Ergebnissen erzielt werden. Die Auswertung der Untersuchungen ergibt folgende Aussagen:

- die VR-gestützte Ausbildung erfährt eine durchweg hohe Nutzerakzeptanz
- es wurde nahezu kein Auftreten der Simulatorkrankheit festgestellt
- das Präsenzepfinden der Soldatinnen und Soldaten ist sehr hoch
- die Auswertemöglichkeiten mittels VR-Technologie bieten einen erheblichen Mehrwert
- das derzeitige System muss für den Ausbildungseinsatz gehärtet werden
- je nach militärischer Organisationseinheit sind spezifische Anpassungen des Systems notwendig

Abschließend lässt sich feststellen, dass die grundsätzliche Nutzbarkeit von VR-Technologie mit einem erheblichen Mehrwert für die Teamausbildung einhergeht. Auf Basis der Erkenntnisse wird der VirtHT zielgerichtet weiterentwickelt.



Abb. 4: Soldat während der Probandenuntersuchung

## 2

## Wehrmedizinische und Militärpsychologische Forschung

Auch das Jahr 2021 wurde erneut geprägt von den Maßnahmen zur Kontrolle und Überwindung der COVID-19 Pandemie. Die wehrmedizinische Forschung leistet hierbei wichtige Beiträge, u. a. durch die Evaluierung der Leistungsfähigkeit von SARS-CoV-2 Antigenschnelltests am Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, die Identifikation von prädiktiven Biomarkern für den schweren Verlauf einer COVID-19 Erkrankung am Bundeswehrkrankenhaus (BwKrh) Berlin, die Tauchmedizinische Untersuchung auf mögliche Residuen nach SARS-CoV-2 Infektion vor Wiederaufnahme des Taucherdienstes am Schifffahrtsmedizinischen Institut der Marine und durch die in Zusammenarbeit mit der militärpsychologischen Forschung durchgeführten Erhebungen zu den psychischen Auswirkungen der isolierten Unterbringung und Quarantäne vor dem Einsatz am Psychotraumazentrum der Bundeswehr am BwKrh Berlin.

Im Bereich des Medizinischen A- und C-Schutzes stellen das Institut für Radiobiologie der Bundeswehr die deutsch-japanische Entwicklung eines neuen Softwaretools zur Optimierung medizinischer Gegenmaßnahmen bei Radioiodexposition und das Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr ein rationales Wirkstoff-Design von Antidoten für die Behandlung von Nervenkampfstoffvergiftungen vor.

Das Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr stellt das Fitnessregister „Grundausbildung Heer“ als Element zur Leistungsüberprüfung, Trainingssteuerung und für ein evidenzbasiertes Lagebild vor.

Das Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe berichtet über luft- und raumfahrtmedizinisch relevante Befunde des Zentralen Nervensystems als internationale Lösungsansätze für mehr Flugsicherheit.

Über die klinischen und wissenschaftlichen Anstrengungen zur Überwindung der Pandemie hinaus haben auch die BwKrh erneut vielfältige Ansätze zum Schutz und zur Wiederherstellung der Gesundheit von Soldatinnen und Soldaten der Bundeswehr eingebracht, im Bereich der Tropenmedizin mit der Evaluation molekularer Diagnostikverfahren für tropische Parasitenerkrankungen am BwKrh Hamburg, der Digitalisierung mit dem Digitalen Weg des Verwundeten als Beispiel Künstlicher Intelligenz im Dienst der Patientenversorgung am Bundeswehrzentralen Krankenhaus Koblenz sowie in der Bildungsforschung zum Terror and Disaster Surgical Care (TDSC) – Kurs am BwKrh Ulm und für die Entwicklung und Anwendung eines 3D-Druck gestützten Ausbildungsmoduls zur Trepanationsplanung am BwKrh Westerstede.

Im Beitrag der militärpsychologischen Forschung wird die vom Psychologischen Dienst der Bundeswehr entwickelte Testpsychologie Psychische Fitness beschrieben, mit deren Hilfe computerbasiert verschiedene Komponenten der Psychischen Fitness erfasst werden können.



## Evaluierung der Leistungsfähigkeit von SARS-CoV-2 Antigenschnelltests

Die als Point-of-care Tests konzipierten SARS-CoV-2 Antigenschnelltests bieten die Möglichkeit, eine akute COVID-19 Infektion einfach und schnell nachzuweisen. Auf dem Markt erhältliche Tests weisen jedoch große Leistungsunterschiede auf, wobei ein falsches Testergebnis gravierende Folgen haben kann. Das Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr (Inst-MikroBioBw) hat die Leistungsfähigkeit von in Deutschland angebotenen Schnelltests evaluiert.

Seit Herbst 2020 wurden vermehrt Antigen-Schnelltests zum Nachweis von SARS-CoV 2 in Deutschland auf den Markt gebracht. Diese sollen laut den Herstellern direkt am Ort der Anwendung, ohne Verwendung spezialisierter Geräte innerhalb von etwa 20 Minuten ein verlässliches Ergebnis liefern und zumeist auch noch durch Laien anwendbar sein. Inzwischen gibt es allein auf dem europäischen Markt weit über 1000 verschiedene Schnelltestanbieter.

Das Funktionsprinzip eines SARS-CoV-2 Antigen-Schnelltests basiert auf einem Lateral Flow Assay (Abb. 1). Mit Goldpartikeln markierte Antikörper binden an SARS-CoV-2 Viruspartikel. Dieser Komplex wird durch Kapillarfluss über die Detektionsmembran getrieben, wo er an Fangantikörper bindet, was zur Bildung einer sichtbaren Bande führt (Abb.2).

Obwohl alle Schnelltests nach diesem gleichen Funktionsprinzip arbeiten, sind in der Praxis starke Leistungsunterschiede bei den Testanbietern zu beobachten, die durch unterschiedliche Bindungsaffinitäten der Antikörper, Membraneigenschaften, oder Komponenten des Laufpuffers bedingt sein können.

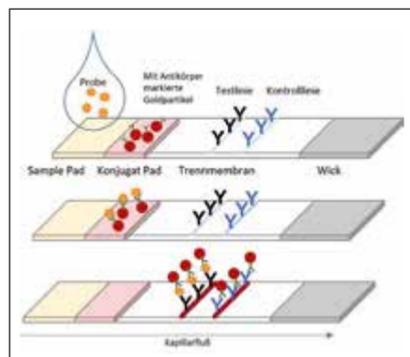


Abb. 1: Funktionsprinzip eines Antigen-Schnelltests

Abb. 2: Beispiele SARS-CoV-2-positiver Schnelltests. Statt einer auf Goldpartikeln basierten Detektion (dunkelrote Banden) können auch farbige Latexpartikel (6., 7. und 13. Test in der Abbildung) oder Fluoreszenz (4. Test) zum Einsatz kommen

Nicht zuletzt spielt auch die Qualität der zu untersuchenden Probe eine Rolle. Bei einem sogenannten Laientest oder Selbsttest (Probenahme im vorderen Nasenbereich) sind im Vergleich zu einem durch medizinisches Personal durchgeführten Nasen-/Rachenabstrich wesentlich geringere Virusmengen zu erwarten. Im Gegensatz zu einer PCR findet bei einem Schnelltest keine Vervielfältigung des Zielmoleküls statt, wodurch Schnelltests intrinsisch bedingt um Faktor 1 000 bis 10 000 weniger sensitiv sind als PCR Tests.

Für die vergleichende Evaluierung der diagnostischen Sensitivität (= prozentualer Anteil der als richtig positiv erkannten Proben) der Tests verschiedener Hersteller wurde ein Panel von 50 PCR-bestätigten SARS-CoV-2 positiven Nasen-/Rachenabstrichen verwendet, die unterschiedlich hohe Virusmengen enthielten. Die Spezifität wurde anhand von 30 negativen Proben sowie durch Kreuzreaktivitätstests mit anderen respiratorischen Krankheitserregern bewertet.

Es zeigten sich markante Unterschiede zwischen den Tests, die insbesondere im Bereich mittlerer Viruslasten in den Proben erkennbar waren (Abb. 3). Hier konnte kein Test mehr als 78 % der positiven Proben richtig nachweisen. Die Herstellerangaben, die ausnahmslos Sensitivitätswerte von mehr als 95 % aufführen, konnten bei keinem Test bestätigt werden. Diese Diskrepanz ist mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Auswahl der Proben für die Leistungstests durch die Hersteller zu erklären, da nur bei einer Verwendung von ausschließlich hochpositiven Proben die angegebene Sensitivität von mehr als 95 % zu erreichen ist.

Bezogen auf die Spezifität schnitten die untersuchten Tests ausreichend gut ab. Nur sehr vereinzelt zeigten sich bei den 30 negativen Proben einzelne falsch positive Ergebnisse. Die Angaben der Hersteller konnten daher im Wesentlichen reproduziert werden.

Insgesamt ist aufgrund der bei Schnelltests typischerweise geringeren Sensitivität die Verwendung von Schnelltests als Screening für gesunde, asymptomatische Personen kritisch zu sehen, da ein (u. U. falsch) negatives Ergebnis ein falsches Gefühl von Sicherheit erzeugen kann. Bei symptomatischen Personen (bei denen entsprechend hohe Viruslasten zu erwarten sind) sind Schnelltests jedoch zur Abgrenzung von COVID-19 zu anderen respiratorischen Infektionen gut geeignet.

Diese Untersuchungen wurden im Verbund mit anderen Forschungseinrichtungen wie dem Paul-Ehrlich-Institut, dem Robert-Koch-Institut, der Berliner Charité und dem Bernhard-Nocht-Institut durchgeführt.

Hersteller	% der Proben, die als richtig positiv detektiert wurden				
	ct < 15	ct < 18	ct < 20	ct Bereich 20-28	ct Bereich 29-38
1	100,00	92,00	78,00	65,71	51,11
2	100,00	95,20	79,00	60,91	51,11
3	100,00	87,20	74,00	74,19	51,11
4	100,00	87,20	74,00	75,19	51,11
5	100,00	87,20	74,00	75,19	51,11
6	100,00	85,57	72,00	71,43	51,11
7	100,00	89,57	73,00	71,43	51,11
8	100,00	78,00	66,00	57,14	51,11
9	100,00	78,00	66,00	57,14	51,11
10	100,00	79,57	67,00	47,62	51,11
11	100,00	79,57	69,00	49,81	51,11
12	100,00	68,79	58,00	58,19	51,11
13	100,00	63,41	53,00	28,57	0,00
14	100,00	60,98	52,00	23,81	0,00
15	100,00	58,54	50,00	18,00	0,00
16	100,00	49,41	52,00	28,57	0,00
17	100,00	75,98	44,50	20,81	0,00
18	100,00	62,00	36,73	54,17	0,00
19	100,00	17,99	16,58	12,50	0,00
20	95,00	78,57	62,00	57,38	51,11
21	95,00	58,54	30,00	23,81	51,11
22	95,00	57,20	44,00	8,93	51,11
23	90,00	40,98	30,00	13,19	0,00
24	80,00	43,41	36,00	8,93	0,00
25	80,00	58,54	48,00	33,33	0,00
26	80,00	41,73	39,63	43,83	0,00
27	75,00	39,00	33,00	8,78	0,00

Abb. 3: Auszug aus den Ergebnissen verschiedener Schnelltests bei der Prüfung mit 50 positiven Proben. Die nachweisbare Virusmenge wird hier durch den sogenannten ct-Wert ausgedrückt. Dabei entspricht ein niedriger ct-Wert einer hohen Viruslast in der Patientenprobe

Oberfeldapotheker Dr. Karin Veronika Niessen  
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr  
München

Institut fuer Pharmakologie und Toxikologie@bundeswehr.org

ORR Dr. Thomas Seeger  
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr  
München

Institut fuer Pharmakologie und Toxikologie@bundeswehr.org

## Rationales Wirkstoff-Design von Antidoten für die Behandlung von Nervenkampfstoffvergiftungen

Bei der Behandlung von Nervenkampfstoffvergiftungen gibt es immer noch therapeutische Lücken, die dringend neue Optionen für die Pharmakotherapie erfordern. Eine Möglichkeit wären Wirkstoffe, die direkt mit dem nikotinischen Acetylcholinrezeptor interagieren. Die Suche nach potenziellen Antidoten wird als iterativer Prozess aus Synthese, pharmakologischer Testungen und „Computer Aided Drug Design“ vollzogen. Im Hinblick auf regulatorische und technische Besonderheiten nimmt die Entwicklung von Antidoten zur Therapie von Nervenkampfstoffvergiftungen dabei eine Sonderstellung ein.

Die jüngsten Ereignisse haben gezeigt, dass eine Bedrohung durch Nervenkampfstoffe trotz Ächtung durch die internationale Gemeinschaft andauert. Vergiftungen mit phosphororganischen Verbindungen wie Nervenkampfstoffen oder strukturähnlichen Pestiziden führen unter anderem zu einer lebensbedrohlichen Lähmung der Atemmuskulatur, die oft nicht ausreichend behandelt werden kann. In diesen Fällen bleibt die Muskelfunktion, trotz Einsatz der derzeit zur Verfügung stehenden Antidote, beeinträchtigt, da der nikotinische Acetylcholinrezeptor (nAChR) in einem dysfunktionalen Zustand bleibt und die Reizübertragung in der neuromuskulären Endplatte ausbleibt. Ein innovativer Therapieansatz wären Wirkstoffe, die direkt mit dem nAChR interagieren und dessen Funktion trotz bestehender Giftwirkung wiederherstellen.

Die Suche nach derartigen Antidoten stützt sich auf die Leitstruktur MB327 (Abb. 1), die nach einer Somanvergiftung unter anderem in *In vitro*-Versuchen positive Wirkungen gezeigt hat, jedoch hinsichtlich Dosis und Selektivität bei Weitem noch nicht optimal ist. MB327 ist jedoch ein guter Ausgangspunkt für ein Struktur- und Ligand-basiertes Wirk-

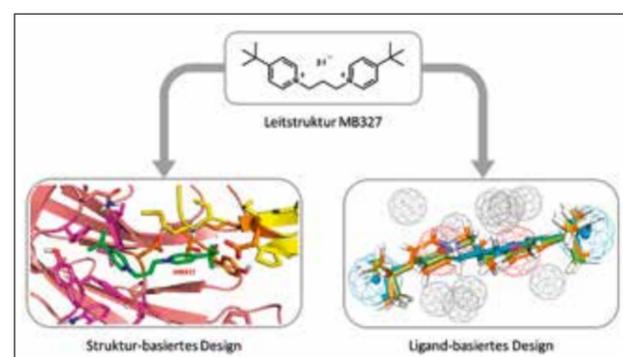


Abb. 1: Rationales Wirkstoff-Design ausgehend von der Leitstruktur MB327. Der optimale Pharmakophor wird einerseits mittels Struktur-basiertem Design und andererseits mittels Ligand-basiertem Design ermittelt

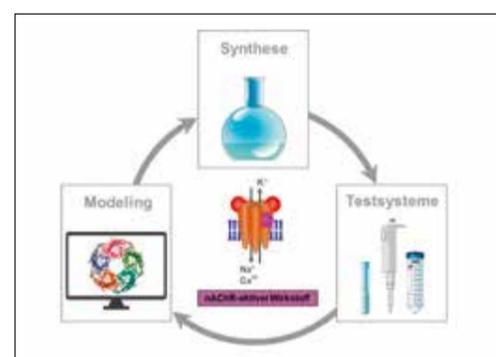


Abb. 2: Wirkstoffentwicklung als iterativer Prozess aus Molecular Modeling, Synthese und umfangreicher pharmakologischer Testung

stoff-Design, das mit virtuellen Methoden (Molecular Modeling) durchgeführt wird. Dies kann einerseits auf der Beschaffenheit der Bindungsstelle basieren, wofür die optimale Passgenauigkeit kalkuliert wird (Struktur-basiertes Design). Andererseits kann die Leitstruktur selber als Grundlage für das Design eines besseren Pharmakophors dienen, indem ungünstige funktionelle Gruppen mit günstigeren ausgetauscht werden (Ligand-basiertes Design). Die Datenbasis hierfür bilden anfangs Ergebnisse aus Experimenten mit MB327 sowie aktiven und inaktiven Strukturana-

loga. Das vorhin beschriebene Computer Aided Drug Design (CADD) ist neben Synthese und pharmakologischen Testungen einer der Teilprojekte im iterativen Prozess der Wirkstoffentwicklung (Abb. 2). Im nächsten Schritt werden die virtuell erzeugten Strukturvorschläge synthetisiert. In den meisten Fällen müssen dazu völlig neue Synthesewege entwickelt werden. Nach Aufreinigung und Prüfung auf Identität und Qualität werden die Substanzen einer umfangreichen pharmakologischen Testung unterzogen. Das pharmakologische Screening umfasst hauptsächlich die Untersuchung auf Affinität und Funktionalität am nAChR, die Wirkung im Soman vergifteten Muskelgewebe sowie die mögliche Hemmung des Schlüsselenzyms in der cholinergen Synapse, der Acetylcholinesterase (AChE). Die Ergebnisse fließen dann wieder in die CADD-Datenbank und der iterative Prozess beginnt von neuem.

Herausforderungen für eine zielgerichtete Wirkstoffsynthese können der komplexe Aufbau des Rezeptors, Subtypen- und Spezies-Unterschiede sowie äußere Einflüsse sein (Abb. 3). Die größten Herausforderungen bestehen darin, ob die richtige Bindungsstelle adressiert wird und welcher Rezeptorzustand

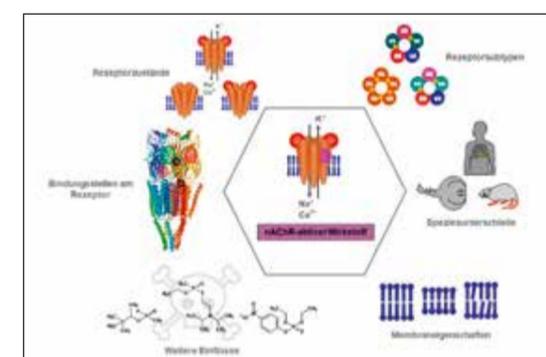


Abb. 3: Die Wirkstoffentwicklung im Spannungsfeld zwischen den nAChR-Bindungsstellen, Rezeptorzuständen, Rezeptorsubtypen, Speziesunterschieden, Membranbeschaffenheit und Einfluss durch Nervenkampfstoffe

aufgehoben bzw. herbeigeführt werden soll. Weiterhin sind bei der Ligand-Rezeptor-Interaktion Subtypen- und Speziesunterschiede zu beachten, insbesondere wenn unterschiedliche pharmakologische Testsysteme eingesetzt werden. Eine wichtige Rolle spielen auch äußere Einflüsse wie beispielsweise eine mögliche Interaktion von Kampfstoffen mit dem nAChR. Ligand-Rezeptor-Bindungsassays mit radioaktiven und hochtoxischen Liganden werden beispielsweise mit einer eigens hierfür konzipierten, modular aufgebauten Pipettier- und Inkubierplattform durchgeführt (Abb. 4).

Der so konzipierte iterative Prozess erlaubt die Entwicklung nAChR-aktiver Wirkstoffe, die für die Therapie von Nerven-



Abb. 4: Modulare Pipettier- und Inkubierplattform für die Durchführung von Radioliganden-Rezeptor-Bindungsassays. Die unterschiedliche Bestückung mit verschiedenen Liquid-Handling-Modulen erlaubt das Pipettieren von einerseits radioaktiven und andererseits von hochtoxischen Substanzen

Oberstarzt Dr. Ulrich Rohde  
 Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr  
 Koblenz

Oberstarzt Prof. Dr. Dr. Dieter Leyk  
 Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr  
 Koblenz

InstPraevMedBw@bundeswehr.org

InstPraevMedBw@bundeswehr.org

## Fitnessregister „Grundausbildung Heer“ als Element zur Leistungsüberprüfung und Trainingssteuerung sowie für ein evidenzbasiertes Lagebild

Das strukturierte Zusammenführen und Verknüpfen von leistungsphysiologischen Ergebnissen standardisierter Testverfahren eröffnet unterschiedlichen Nutzerebenen neue Möglichkeiten für die Trainingssteuerung, Lagebilderstellung und für die evidenzbasierte Weiterentwicklung. Das Fitnessregister „Grundausbildung Heer“ bietet diese Funktionalitäten erstmalig in einer Anwendung.

Die nachlassende Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit junger Erwachsener haben sich zu einem elementaren Ausbildungsproblem entwickelt, da die körperlichen Belastungen in der Grundausbildung (GA) viele Rekrutinnen und Rekruten überfordern. Vorgegebene und seit langem geltende Ausbildungsziele werden aufgrund mangelnder Leistungsfähigkeit oder Verletzungen oft nicht mehr oder nur teilweise erreicht. Diese Ausbildungsziele sind kein Selbstzweck. Nur über das Herstellen der personellen, aber auch persönlichen Einsatzbereitschaft kann die Einsatzbereitschaft der Streitkräfte sichergestellt werden.

Angesichts der hohen Belastung durch militärtypische Tätigkeiten (z. B. Marschieren oder Bewegen im Gelände mit Ausrüstung) sollte schon in der GA eine ausreichende körperliche Leistungsfähigkeit (KLF) vorliegen, die für den Erhalt der Gesundheit und der individuellen Einsatzfähigkeit notwendig ist. Leistungsmängel müssen daher durch ein adressatengerechtes Training abgestellt werden.

Die bislang angewendeten Konzepte zur Ausbildung und zum Erhalt der KLF stellten sich als nicht mehr ausreichend heraus.

BFT-Mitte					
Zeiten			Bestanden	Punkte	Note
Sprint	Klimmhang	1000-m-Lauf			
61,0	25,0	391,0		128	
54,0	4,5	300,0		184	
40,0	30,0	200,0	Vortest: 300 sek	277	1,89
40,1	30,1	200,1		356	1,92
38,5	59,9	205,0		411	1,38
54,9	59,9	299,9		272	2,77
42,9	60,0	239,9		368	1,72
43,0	65,0	240,0		376	1,64

SGT-Ende				
Zeiten				Gesamt
Alpha	Bravo	Charlie	Delta	
51,2	27,5	57,4	19,8	155,9
48,9	25,4	51,2	15,6	141,1
54,1	32,2	72,9	29,6	186,7
61,3	32,4	55,4	120,0	379,1

Abb. 2: Darstellung der Ergebnisse SGT-Ende mit Anzeige der Leistungsentwicklung im Vergleich zum vorherigen Testtermin SGT-Mitte. Die Ziffern der SGT Einzelleistungen (SGT Alpha: „Bewegen im Gelände“; SGT Bravo: „Ziehen von Lasten“; SGT Charlie: „Tragen von Lasten“; SGT Delta: „Heben und Absetzen von Lasten“) sowie die Felder des Gesamtergebnisses werden entsprechend des Bewertungssystems SGT farbig in „Grün – Gelb – Rot“ dargestellt. Auch Sonderfälle werden beachtet: Beim dritten Beispiel ist keine Leistungsentwicklung für SGT-Charlie und SGT-Delta abgebildet, da der SGT-Mitte nach SGT-Charlie abgebrochen wurde und somit kein Vorergebnis vorliegt

Abb. 1: Darstellung der Ergebnisse BFT-Mitte mit Anzeige der Leistungsentwicklung im Vergleich zum vorherigen Testtermin (in diesem Beispiel BFT-Beginn). Leistungen, die zum Nichtbestehen des BFT führen, werden in „Rot“ angezeigt

OTL Dipl.-SportWiss. (univ.) Nils-Alexander Simon  
 Kommando Heer  
 Strausberg

BrigGen Uwe Nerger  
 Kommando Heer  
 Strausberg

KdoHPAOAusbIndivAusb@bundeswehr.org

KdoHPIZHPresse@bundeswehr.org

Um eine adäquate KLF zu erreichen, wurden neue Ausbildungs- und Trainingskonzepte entwickelt, die sowohl hinsichtlich des Leistungsstandes wie auch der Trainingsinhalte eine individuelle Differenzierung ermöglichen.

Das Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr (InstPrävMedBw) und das Deutsche Heer untersuchten und evaluierten 2018 im Rahmen einer Pilotstudie ein neues Grundausbildungskonzept zur Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit, in der die Ergebnisse mit denen der alten GA verglichen wurden. Die Studienergebnisse wurden der Heeresführung vorgetragen und führten dazu, dass seit Juni 2019 die neue GA im Deutschen Heer durchgeführt wird.

Zu den Maßnahmen gehörten u. a. das Training in drei Leistungsgruppen (Stark-Mittel-Schwach) und die wiederholte Leistungsüberprüfung durch Basis-Fitness-Test BFT (Beginn-Mitte-Ende) und Soldaten-Grundfitness-Tool SGT (Mitte-Ende). Die Standardleistungstests BFT und SGT liefern wertvolle Informationen für verschiedene Anwendungszwecke, wie z. B. Trainingssteuerung und Lagebild.

Zur anwendungsnahen und zielgruppenorientierten Ergebnisaufbereitung der erhobenen Leistungsdaten hat das InstPrävMedBw mit dem Kommando Heer ein Fitness-Register

GA aufgebaut, dass derzeit in der Truppe mit Erfolg erprobt wird.

Kernelement ist das vom Institut, im intensiven Austausch mit den Nutzern entwickelte Eingabe-Auswerte-Tool (EAT) zur strukturierten Erfassung der BFT- und SGT-Ergebnisse. Das IT-gestützte EAT ist dabei nicht nur eine reine Dokumentationsapplikation, sondern beinhaltet auch eine Reihe unmittelbar vor Ort anwendbarer, qualitätsgesicherter Funktionalitäten zur Trainingsunterstützung und zur Informationszusammenfassung: Die erfassten Leistungsdaten werden unmittelbar zur Trainingssteuerung aufbereitet, z. B. hinsichtlich Leistungsentwicklung (Abb. 1 und 2), und für die Führung zur Lagefeststellung aggregiert (Abb. 3). Das Zusammenführen der verhashten Daten im InstPrävMedBw ermöglicht künftig Längs- und Querschnittsanalysen und eine evidenzbasierte Weiterentwicklung. Das Verfahren ist ein Pilotprojekt im Rahmen der AGENDA Ausbildung und wurde konzeptionell für eine über die GA hinausgehende Anwendung angelegt.

Die Verknüpfung von Leistungsdaten und Gesundheitsdaten in einer künftigen, zentralen IT-Architektur eröffnet vielfältige Optionen hinsichtlich Prävention, Ausbildung und Einsatzfähigkeit. Mit dieser Informationsbasis wäre ein wichtiger, derzeit nicht verfügbarer Lagebildbeitrag für die Führung der Bundeswehr möglich.

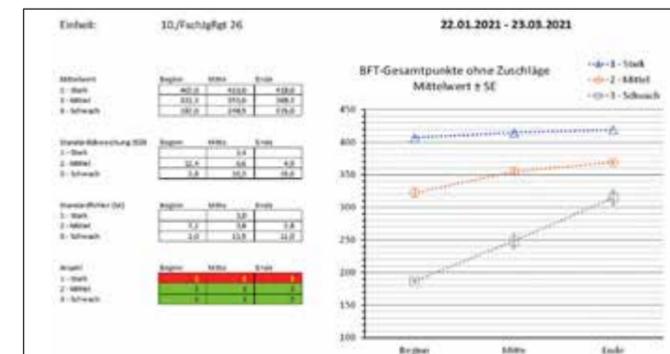


Abb. 3: Beispielhafte, automatisierte Ergebnisdarstellung der BFT-Gesamtpunkte auf einem Tabellenblatt, aufgeschlüsselt nach Leistungsgruppen. Die Ergebnisse des SGT werden in gleicher Form aggregiert

Flotillenarzt PD Dr. med. Alexis Rump  
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr  
München

Oberstabsapotheker Cornelius Hermann  
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr  
München

Oberstarzt Prof Dr. med. Matthias Port  
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr  
München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

## Deutsch-japanische Entwicklung eines neuen Softwaretools zur Optimierung medizinischer Gegenmaßnahmen bei Radioiodexposition

Bei Exposition von Radioiod kann die Anreicherung in der Schilddrüse und damit das Risiko einer Tumorentwicklung durch Gabe von stabilem Iod oder anderer Wirkstoffe stark reduziert werden. In Zusammenarbeit mit den japanischen Selbstverteidigungskräften wurde ein Softwaretool entwickelt, mit dem auch komplexe Expositionsszenarien simuliert und die besten pharmakologischen Schutzmaßnahmen identifiziert werden können.

Bei Kernspaltungsreaktionen entstehen u. a. auch radioaktive Iod-Isotope, die sich auf Grund ihrer sehr hohen Flüchtigkeit weit ab von der Quelle über große Gebiete ausbreiten können. Radioiod stellt ein bedeutendes Gesundheitsrisiko dar, da es durch Inhalation oder Ingestion rasch und vollständig absorbiert wird und sich in der Schilddrüse stark anreichert. Dies führt zu einer inneren Bestrahlung der Drüse und erhöht das Risiko von Funktionsstörungen und Tumoren. Durch frühzeitige Gabe von hohen Dosen von stabilem Iod („Schilddrüsenblockade“) kann diese Anreicherung stark reduziert werden. Auch weitere Wirkstoffe (z. B. Perchlorat), die aber in offiziellen Empfehlungen meist als Mittel zweiter Wahl angesehen werden und auch nicht in allen Staaten als Arzneimittel zugelassen sind, besitzen eine protektive Wirkung. Auch wenn i. d. R. nur eine einmalige Schilddrüsenblockade empfohlen wird, haben die Erfahrungen aus Chernobyl und Fukushima gezeigt, dass mit prolongierter Radioiodexposition gerechnet werden muss. Offizielle Empfehlungen zur pharmakologischen Schilddrüsenprotektion in diesen Lagen sind bis heute spärlich und wenig konkret.

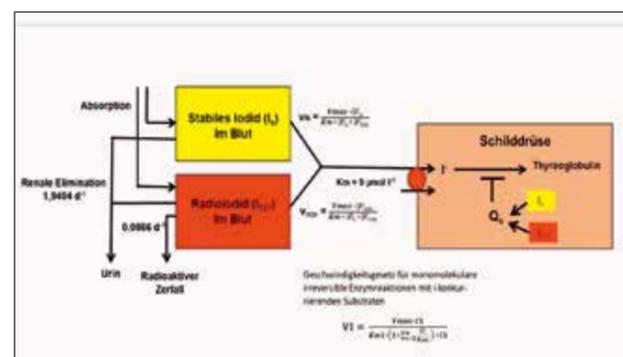


Abb. 1: Prinzip des Schilddrüsenblockade-Modells durch hohe Dosen an stabilem Iod mit integriertem Iodidträgermolekül in der Membran der Schilddrüsenzellen (Kompetition von stabilem Iod und Radioiod beim Transport in die Zelle) und zusätzlicher Drüsensättigung

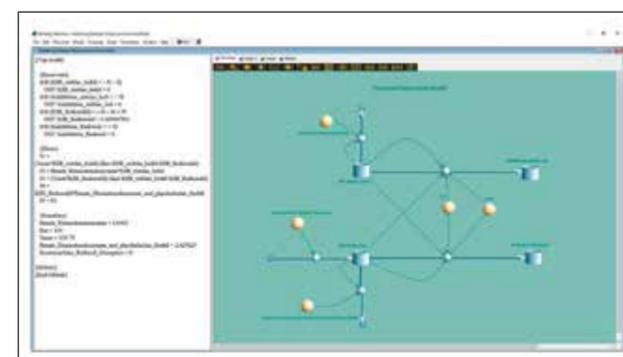


Abb. 2: Modell von Abb. 1 implementiert mit Berkeley Madonna-Software. Ausgehend von manuellem Flowcharts (links) Berechnung der entsprechenden Differentialgleichungen (rechts) und der Flüsse zwischen den Kompartimenten und deren Iod bzw. Radioiodgehalt

Prof. Dr. med. Manabu Kinoshita  
National Defense Medical College  
of the Japan Self Defense Forces  
Saitama, Japan

adm018@inet.ndmc.mod.go.jp

Oberstarzt Dr. med. Tetsuo Yamamoto  
NBC Countermeasure Medical Unit  
Ground Component Command of the  
Japan Ground Self Defense Force  
Tokyo, Japan

adm018@inet.ndmc.mod.go.jp

Prof. Dr.med. Nariyoshi Shinomiya  
National Defense Medical College  
of the Japan Self Defense Forces  
Saitama, Japan

adm018@inet.ndmc.mod.go.jp

In Zusammenarbeit des InstRadBioBw mit dem National Defense Medical College der Japanischen Selbstverteidigungskräfte wurde ein neues Schilddrüsenblockade-Modell entwickelt, das die komplexen physiologischen Aufnahmemechanismen für Iod in die Schilddrüse differenziert abbildet (Kompetition am Iod-Trägermolekül in der Zellmembran + Aufnahmeblock bei Sättigung der Drüse) (Abb. 1). Das Modell wurde mittels Berkeley-Madonna Software in einem Programm implementiert, das die Simulation unterschiedlicher, auch komplexer Radioiodexpositionsszenarien sowie den protektiven Einfluss pharmakologischer Interventionen erlaubt (Abb. 2).

Unsere Simulationen zeigen, dass bei akuter Radioiod-Exposition sowohl stabiles Iod als auch Perchlorat die Radioiod-Akkumulation in der Schilddrüse um über 98 % reduzieren. Die Schutzwirkung einer Einzeldosis Iod oder Perchlorat bei längerer Radioiod-Exposition ist aber eindeutig unzureichend und wiederholte tägliche Gaben sind zum Schilddrüsenchutz erforderlich. Perchlorat hat bei prolongierter Radioiod-Exposition und wiederholter Gabe eine höhere protektive Wirksamkeit als stabiles Iod (Abb. 3).

Aufgrund einer hohen täglichen Iodaufnahme mit der Nahrung und einer herunterregulierten Iod-Aufnahmekapazität der Schilddrüse akkumulieren Japaner bei vergleichbarer Expositi-

tion weniger Radioiod als Europäer oder Amerikaner (Abb. 4). Trotz dieses begrenzten „natürlichen Schutzes“ ist dennoch eine Schilddrüsenblockade bei einem nuklearen Störfall angezeigt. Da die Schilddrüsen der Japaner weniger empfindlich auf den Iodsättigungsmechanismus reagieren, ist Perchlorat sowohl bei akuten als auch bei länger andauernden Radioiod-Expositionsszenarien besonders vorteilhaft.

Das neue Schilddrüsenblockade-Modell und seine Software-Implementierung ermöglichen auch sehr komplexe Radioiod-Expositionsszenarien sowie die protektive Wirkung verschiedener Wirkstoffe und Dosierungsschemata zu simulieren. Auch physiologische Unterschiede in der Schilddrüsenfunktion aufgrund intrinsischer oder extrinsischer Faktoren, wie der unterschiedlichen Iodversorgung mit der Ernährung, können dabei berücksichtigt werden. Somit können durch das neue Softwaretool für den Fall von nuklearen und radiologischen Großschadenslagen Planungen zu medizinischen Gegenmaßnahmen effektiv und effizient unterstützt werden.

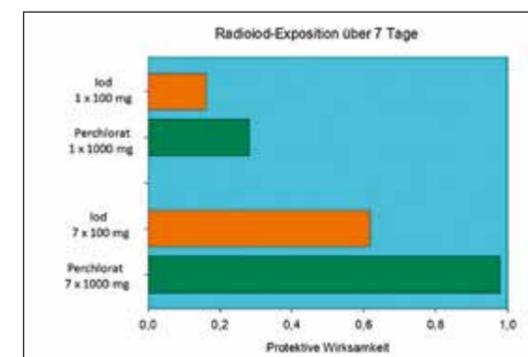


Abb. 3: Protektive Wirkung von stabilem Iod oder Perchlorat bei prolongierter (7 Tage) Radioiod-Exposition. Die erste Iod- oder Perchlorat-Dosis wird zu Beginn der Exposition verabreicht und im Fall repetitiver Gaben täglich alle 24 h wiederholt

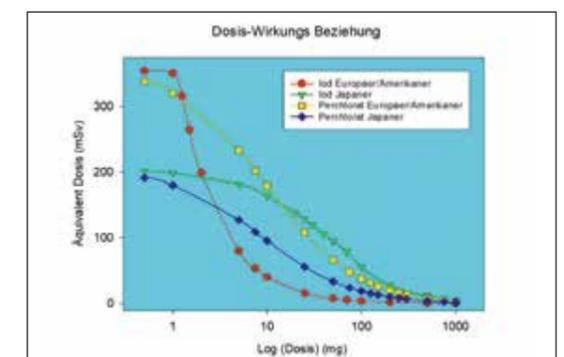


Abb. 4: Dosis-Wirkungs-Kurven für stabiles Iod und Perchlorat, zeitgleich verabreicht zu einer akuten Radioiod-Exposition (mit Iod-131, 700.000 Bq). Ausgangspunkt der Kurven für japanische Patienten niedriger, aufgrund hoher tägliche Iodzufuhr mit der Nahrung

RDir'in Dr. phil. Antje Bühler  
Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
Berlin

bwkrhsberlinpsychotraumazentrum@bundeswehr.org

Oberstarzt Dr. med. Gerd Willmund  
Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
Berlin

bwkrhsberlinpsychotraumazentrum@bundeswehr.org

## Isolierte Unterbringung und Quarantäne vor dem Einsatz: Einfluss auf Adhärenz und psychosoziales Wohlbefinden

Im Rahmen der COVID-19 Pandemie wurde durch das Psychotraumazentrum der Bundeswehr eine Reihe an Forschungsprojekten initiiert, die die SARS-CoV-2 spezifischen Effekte auf die mentale Gesundheit aus unterschiedlichen Perspektiven untersuchten. Psychosoziale Auswirkungen von Quarantäne auf das für den Auslandseinsatz vorgesehene Personal waren dabei von hohem Interesse. Die isolierte Unterbringung (i. U.) bezeichnet den Spezialfall der individuellen Quarantäne vor dem Auslandseinsatz.

Die verpflichtende Quarantäne vor, während und nach Auslandseinsätzen dient dem Infektionsschutz des eingesetzten Personals der Bundeswehr (Abb. 1). In dieser Studie wurde untersucht, welche Faktoren genutzt werden könnten, um die Quarantäneadhärenz und die psychische Gesundheit während der isolierten Unterbringung (i. U.) zu fördern.

603 Soldatinnen und Soldaten wurden zu Beginn und am Ende der i. U. anhand validierter Instrumente zu den folgenden Faktoren befragt: der psychischen Symptomlast, wahrgenommener sozialer Unterstützung, Einheitskohäsion, gesundheitsförderliche Führung und Quarantäneadhärenz. Die erfassten Quarantäne-assoziierten Faktoren waren wahrgenommenes Infektionsrisiko, Nutzen der Quarantäne, Klarheit des Quarantäneprotokolls, Bedürfnis nach Intimität, soziale Normen, Stigma, Praktikabilität der Quarantäne, finanzielle Nachteile, Langeweile sowie gesundheitsförderliche Führung (Abb. 2).

Die schrittweise Regressionsanalyse ergab, dass 57 % der Varianz der Quarantäneadhärenz mit bis zu 57 % durch soziale Normen, Langeweile, wahrgenommenen Nutzen/Wirksamkeit der Qua-



Abb. 1: Die künftigen Kontingentangehörigen ziehen direkt nach der Landung in den Isolationsbereich des Containerdorfs ein (Mission Counter Daesh in Al-Asrak / Jordanien)



Abb. 2: Sinnvolle Beschäftigung beugt Langeweile vor und beeinflusst die Quarantäneadhärenz. Im Gegensatz zur (individuellen) isolierten Unterbringung vor dem Einsatz steht während der kollektiven Quarantäne im Einsatzland für den Kontingentwechsel ein Fitnessbereich zur Verfügung. (hier: Counter Daesh in Al-Asrak / Jordanien)

rantäne, die klare Kommunikation des Quarantäneprotokolls und das wahrgenommene Infektionsrisiko aufgeklärt wurde. Der größte Anteil der Varianz entfiel mit 43 % auf die sozialen Normen relevanter Bezugspersonen. Der Status der psychischen Gesundheit zu Beginn der Quarantäne wurde zu 15 % durch das Bestehen einer Partnerschaft, dem Bedürfnis nach Bindung / Intimität, die Einheitskohäsion und wahrgenommene soziale Unterstützung erklärt. Zum Quarantäneende konnten bis zu 20 % der Varianz in der psychischen Gesundheit erklärt werden, teilweise durch quarantäne-spezifische Faktoren: Quarantänedage vor der i. U., Alter, Kommunikation des Quarantäneprotokolls, wahrgenommene soziale Unterstützung, Bedürfnis nach Bindung / Intimität und wahrgenommene Stigmatisierung erklärt. Psychische Gesundheit und die Adhärenz der Quarantäne korrelierten signifikant.

Für das Gesamtkollektiv wurden keine Unterschiede zwischen dem Beginn und dem Ende der i. U. gefunden, weder in Bezug auf die psychische Gesundheit, noch die Quarantäneadhärenz, die wahrgenommene soziale Unterstützung oder die wahrgenommene Einheitskohäsion. Hingegen unterschieden sich die Verläufe in Bezug auf die Zielvariablen für verschiedene Untergruppen signifikant, einschließlich Alter, Geschlecht, Rang und kumulierte Tage in Quarantäne vor der i. U. (Abb. 3). So nahm mit zunehmender Anzahl von Quarantänedagen vor der i. U. die psychische Gesundheit im Verlauf der Quarantäne ab, wenn auch in geringem Maße.

Bei geschlechtsspezifischer Betrachtung zeigte sich, dass zu Beginn der i. U. die Quarantäneadhärenz bei Soldatinnen höher ausgeprägt war, sich aber zum Ende der i. U. auf das Maß der nahezu kontinuierlich niedrigeren Adhärenz der

Soldaten verringerte. Personal, das jünger als 34 Jahre war, zeigte zu Quarantänebeginn eine höhere subjektive soziale Unterstützung als zum Ende der i. U.. Auch hier verringerte sich diese auf das niedrigere, kontinuierliche Niveau des älteren Personals. Interessanterweise steigerte sich im Quarantäneverlauf die Einheitskohäsion bei niedrigen Dienstgradgruppen, während sich diese bei Offizieren nahezu unverändert darstellte und bei Feldwebeldienstgraden über die Zeit abnahm.

Die Ergebnisse legen nahe, dass die Auseinandersetzung mit sozialen Normen wichtiger Bezugspersonen die Quarantäneadhärenz fördern könnte. Forschungsarbeiten sollten die langfristigen Auswirkungen auf die psychische Gesundheit untersuchen, einschließlich der Auswirkungen kumulierter Quarantänedage, auch unter Berücksichtigung der Quarantäne nach dem Einsatz. Während auf das gesamte Kollektiv bezogen keine wesentlichen Änderungen im Verlauf festzustellen war, zeigten Unterschiede in den Subgruppenanalysen, dass es einem Monitoring der Belastungen, aber auch subgruppenspezifischen Unterstützungsangeboten in der Quarantäne bzw. i. U. bedarf.

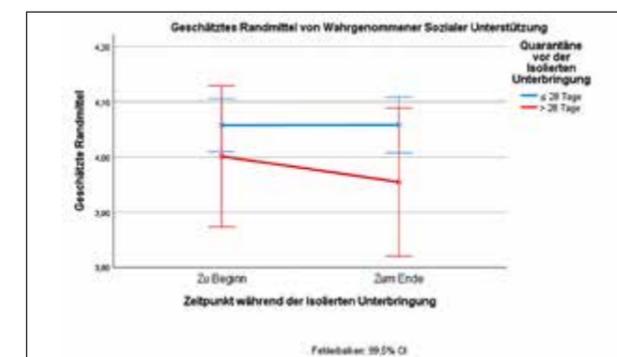


Abb. 3: Unterschiedlicher Verlauf der psychischen Symptombelastung (Mini-SCL) in Abhängigkeit von früheren Quarantänezeiten

Oberstabsarzt Dr. med. Sven-Erik Sönksen  
Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe  
Köln

ZentrLuRMedLwPresse@bundeswehr.org

Dr. med. Ulrich Limper  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin  
Köln

contact-dlr@dlr.de

## Luft- und raumfahrtmedizinisch relevante Befunde des Zentralen Nervensystems – Internationale Lösungsansätze für mehr Flugsicherheit

Das Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe (ZentrLuRMedLw) hat im Rahmen von Kooperationsprojekten Studien mit dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR) und weiteren internationalen NATO-Partnern durchgeführt. Veränderungen des Zentralen Nervensystems wie „White Matter Hyperintensities“ sind im multizentrischen Ansatz statistisch aussagekräftig untersucht worden.

Die Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) hat einen festen Stellenwert in der medizinischen Diagnostik und flugmedizinischen Begutachtung. Technische Entwicklungen haben zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Auflösung dieses bildgebenden Verfahrens geführt. 2013 wurde in Auswertung regelmäßiger MRT-Untersuchungen bestimmter Berufsgruppen der Luft- und Raumfahrt auf ebensolche Veränderungen auch bei Gesunden hingewiesen, ohne dass ein Pathomechanismus erkennbar oder die individuellen Folgen abschätzbar gewesen wären (Abb. 1). Bisher wurden solche Veränderungen unter anderem bei Schädelhirntraumen, Stoffwechselstörungen (Diabetes, Amyloidose) oder degenerativen Veränderungen (Demenz) beobachtet.

Bekanntestes Beispiel sind die narbig-gliotische Veränderungen der weißen Substanz, aufgrund der Lokalisation und Darstellung „White Matter Hyperintensities“ (WMH) genannt. McGuire et al. beschrieb 2013 und 2019 in den US-amerikanischen Studien diese WMH bei klinisch unauffälligen Personen bestimmter Berufsgruppen der Luft- und Raumfahrt. Das in Frage stehende Personal (U2-Piloten und Innenbegleiter von Höhenklimasimulationskammern (HKS); Abb. 2) war berufs-

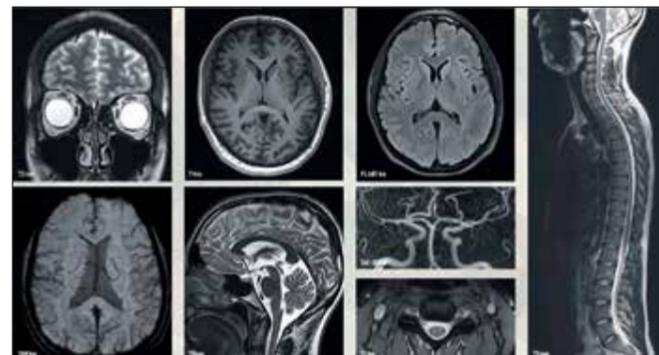


Abb. 1: MR-Übersichtssequenzen des Zentralen Nervensystems



Abb. 2: Personal in Höhenklimasimulationskammern in Königsbrück

Oberstabsarzt Dr. med. Oliver Erley, M.A.  
Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe  
Köln

ZentrLuRMedLwPresse@bundeswehr.org

bedingt über einen längeren Zeitraum einem veränderten, meist reduzierten Umgebungsdruck ausgesetzt. Daraus leiteten sich weitere mögliche Risikogruppen ab, beispielsweise Bergsteiger und Weltraumfahrer.

Die Herausforderung für die internationale Luft- und Raumfahrtmedizin besteht in der Bewertung dieser Befunde dahingehend, ob die Zufallsbefunde mit funktionellen Defiziten korrelieren und wenn ja, welche Bedeutung sie für die Flugsicherheit haben. Erschwerend kommen die kleinen Stichprobenumfänge der Berufsgruppe hinzu, wohingegen für eine wissenschaftlich haltbare Einordnung statistisch aussagekräftige Stichprobengrößen benötigt werden. Hier bewährt sich die national wie international enge Gemeinschaft der Luft- und Raumfahrtmedizin.

Innerhalb des ZentrLuRMedLw wurde eine klinische Studie mit eigenem beruflich in der HKS exponiertem Personal und den europäischen Partnern durchgeführt. Es wurde die Prävalenz der WMH untersucht, funktionelle neurologische Testungen inklusive der Seh- und Hörbahnen mit Auswertung von visuell und akustisch evozierten Potentialen sowie der Gleichgewichtsregulation durchgeführt. Zusätzlich wurde eine multiparametrische 3-Tesla MRT-Untersuchung von Hirn und Rückenmark und eine optische Kohärenztomographie ange-



Abb. 3: Untersuchung im 3-Tesla Magnetresonanztomograph des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums in Köln

Oberstabsarzt Dr. med. Sven Kühn  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

bwzkrhskoblenzpresseoffz@bundeswehr.org

fertigt sowie eine Reihe von psychometrischen Verfahren wie dem Wiener Determinationstest gemacht.

Zusammen mit dem DLR wurden Untersuchungen im Projekt „Edema Formation in the High Alps“ und darauf aufbauend in zwei weiteren Projekten „MyoCardioGen“ und „+30° Acute Mountain Sickness“ durchgeführt, wobei das ZentrLuRMedLw vor allem zur Beurteilung und Auswertung der MRT-Datenanalyse beisteuerte (Abb. 3).

Diese und weitere Erkenntnisse der internationalen luft- und raumfahrtmedizinischen Gemeinschaft wurden in der Science and Technology Organization der NATO – Arbeitsgruppe „The Impact of Hypobaric Exposure on Aviators and High-Altitude Special Operations Personnel“ (HFM-RTG-274) zusammengetragen, ausgewertet und sollen im Frühjahr 2022 veröffentlicht werden (Abb. 4).

Der beständige wissenschaftliche Austausch im nationalen und internationalen Kontext bildet die Grundlage für die Fähigkeit zur Einordnung außergewöhnlicher luft- und raumfahrtmedizinischer Befunde und ist damit ein unverzichtbarer Beitrag zur Flugsicherheit.



Abb. 4: Wappen des Zentrums für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, der NATO, des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums und der Science and Technology Organization

Flottenarzt Dr. med. Sebastian Klapa  
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine  
Kronshagen

Dr. rer. nat. Wataru Kähler  
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine  
Kronshagen

Bente Rieger, M. Sc.  
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine  
Kronshagen

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

## Tauchmedizinische Untersuchung auf mögliche Residuen nach SARS-CoV-2 Infektion vor Wiederaufnahme des Taucherdienstes – Klinische Beobachtungsstudie an betroffenem Personal der Bundeswehr

Die Wiederaufnahme des dienstlichen Tauchens nach einer Infektion mit dem SARS-CoV-2 Virus macht es notwendig, den Taucher bzw. die Taucherin mit besonderer Sorgfalt zu untersuchen, gerade um mögliche Einschränkungen der körperlichen Leistungsfähigkeit zu erkennen. Diese könnten das Gesundheitsrisiko beim Tauchen deutlich erhöhen. Im Rahmen einer klinischen Beobachtungsstudie werden die Taucher und Taucherinnen der Marine im Rahmen einer erweiterten Zwischenuntersuchung mit ihrem individuellen und dokumentierten Gesundheitszustand vor der Infektion verglichen.

**Hintergrund/Fragestellung:** Der Taucherdienst der Bundeswehr stellt hohe Anforderungen an die Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Soldatinnen und Soldaten. Insbesondere die Tatsache, auch bei widrigen Witterungsbedingungen Unterwasserarbeiten durchführen zu müssen, sowie die körperlichen Belastungen durch schweres Tauchgerät machen es notwendig, dass der Taucher in guter körperlicher Verfassung ist, um vermeidbare Gesundheitsgefährdungen zu minimieren.

Die derzeitige pandemische Corona-Lage hat in den letzten Monaten auch zu Infektionen bei Tauchern geführt, so dass deren Rückkehr in den Taucherdienst nach der Erkrankung einer besonderen Beachtung bedarf.

Die SARS-CoV-2 Infektion kann auch bei jüngeren Menschen mit gesundheitlichen Residuen einhergehen, die als direkte Folgen der Akutinfektion auftreten können oder auch als eine vermutete „Nach“-Erkrankung, das sogenannte „Post-Covid-Syndrom“. Es wurde deshalb innerhalb der Marine entschieden, Soldaten mit Zustand nach nachgewiesener SARS-CoV-2 Infektion vor Wiederaufnahme des Tauchdienstes im Rahmen einer

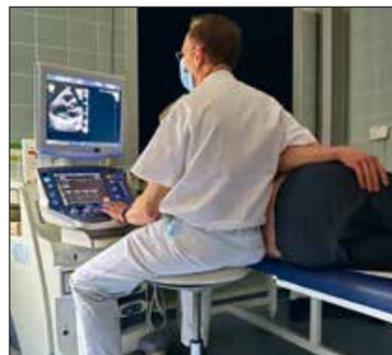


Abb. 1: Echokardiographie im Rahmen der erweiterten Covid-Nachuntersuchung



Abb. 2: Spiro-Ergometrie in der TUKV-Abteilung des SchiffMedInstM

Flottenarzt Prof. Dr. med. Andreas Koch  
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine  
Kronshagen

Oberstabsarzt Tatjana Noy  
1. Ubootgeschwader Sanitätsdienst  
Eckernförde

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

Zwischenuntersuchung erneut auf Tauchtauglichkeit zu beurteilen.

**Methode:** Im Rahmen der prospektiven Beobachtungsstudie wurden die Ergebnisse der Zwischenuntersuchung, die in Ergänzung zur Regeluntersuchung (TUKV) auch eine Echokardiographie und die Bestimmung von Trop I und nt-proBNP umfassten, mit den jeweiligen Ergebnissen der vor der Infektion gelegenen letzten TUKV-Untersuchung verglichen.

**Ergebnisse:** Es wurden bis 09/2021 43 Soldaten untersucht, Altersdurchschnitt 34 Jahre. Es wurden 11 asymptomatische und 30 mild symptomatische ambulante Verläufe dokumentiert, in 2 Fällen kurzfristige Hospitalisation für wenige Tage. 39 Probanden konnte die uneingeschränkte Tauchtauglichkeit bescheinigt werden, 2 Probanden mussten vorübergehend als nicht uneingeschränkt tauchtauglich eingestuft werden. 2 Probanden mit dringendem Verdacht auf Long-Covid-Syndrom konnte keine TUKV erteilt werden.

Für Parameter der Lungenfunktion, Diffusionskapazität und individuelle Leistung in der Ergo-Spirometrie (PWCmax und VO2max) ergaben sich durchgehend Leistungswerte wie vor der Infektion.

Schlussfolgerung: Für 39/43 Soldaten konnte mindestens vier Wochen nach Symptombefreiheit die TUKV uneingeschränkt wieder erteilt werden. Vier Probanden (9 %) zeigten zunächst auffällige Befunde, bei zweien musste der Verdacht auf ein Post-Covid-Syndrom mit Leistungsknick und /oder kardialen Auffälligkeiten gestellt werden. Die TUKV-übliche apparative Diagnostik (Spiro-Ergometrie, Lungenfunktion mit Diffusion) war auch hier ohne wegweisende Aussagekraft.

Deshalb erscheint nach jetziger Datenlage eine genaue Anamnese gerade des Krankheitsverlaufes mit Erfassung der aktuellen Befindlichkeit zielführender als Standarddiagnostik hinsichtlich Lungenfunktion und Leistungsfähigkeit. Neben der genauen Anamnese sollten das EKG, die Echokardiographie, ggf. spezielles Labor und mögliche weiterführende Diagnostik gezielt zum Einsatz kommen.

Auch wenn bei jüngeren Menschen die SARS-CoV-2 Infektion vornehmlich deutlich weniger schwer verläuft als bei Älteren, so ist doch ein besonderes Augenmerk auf das Auftreten eines Post-Covid-Syndroms zu legen, da es offensichtlich auch in dieser besonders leistungsbereiten Gruppe auftritt und eine Erteilung der Tauchtauglichkeit dann in der Regel nicht zulässt.

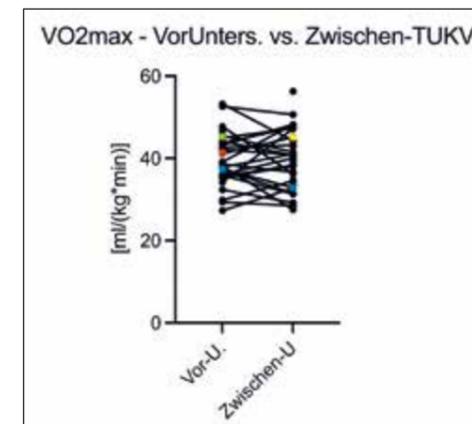


Abb. 3: VO<sub>2</sub>max-Werte [ml/(kg\*min)] in der Spiro-Ergometrie der untersuchten Soldaten vor und nach SARS-Cov2-Infektion; farblich markiert die Daten der auffälligen Soldaten

Oberfeldarzt Dr. med. Maximilian Schreiner  
Bundeswehrkrankenhaus Berlin  
Berlin

BwKrhsBerlin@bundeswehr.org

Oberstabsarzt Dr. med. Christian Zobel  
Bundeswehrkrankenhaus Berlin  
Berlin

BwKrhsBerlin@bundeswehr.org

## Identifikation von prädiktiven Biomarkern für den schweren Verlauf einer COVID-19 Erkrankung

An den Bundeswehrkrankenhäusern Berlin, Hamburg und Westerstede sowie am Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz wurde die einzige prospektive Multicenter-Studie der Bundeswehr zu COVID-19 durchgeführt. In Blutproben von über 120 Patientinnen und Patienten wurden herkömmliche und experimentelle Parameter gemessen, mit dem Ziel, einen schweren Verlauf einer COVID-19 Erkrankung vorhersagen zu können.

Die COVID-19 Pandemie belastet das Gesundheitswesen in Deutschland und vielen anderen Ländern erheblich. Um Krankenhäuser zu entlasten, wäre es wichtig, besonders gefährdete Patienten möglichst frühzeitig zu identifizieren, um alle anderen vorzugsweise ambulant zu behandeln. Die Klinik I am Bundeswehrkrankenhaus Berlin hat zu dieser Fragestellung die erste und bislang einzige Multicenter-Studie der Bundeswehr zu COVID-19 initiiert. Im Rahmen eines wehrmedizinischen Sonderforschungsprojektes führten wir eine prospektive Beobachtungsstudie an hospitalisierten COVID-19-Patienten an den Bw(Z)Krhs in Berlin, Hamburg, Koblenz und Westerstede durch (Abb. 1). Auch das Robert-Koch-Institut war als Kooperationspartner an dieser Studie beteiligt.

Hauptziel der Studie war die Identifikation von Biomarkern im Blut, die den schweren Verlauf einer COVID-19 Erkrankung mit Beatmungspflichtigkeit frühzeitig vorhersagen können. Nach einer Literaturrecherche wurden bis zu 21 Biomarker als vielversprechend identifiziert, die eine Rolle bei Entzündungsprozessen, viralen Erkrankungen oder Lungenversagen spielen. Unsere Hypothese lautete, dass ein schwerer COVID-19 Verlauf

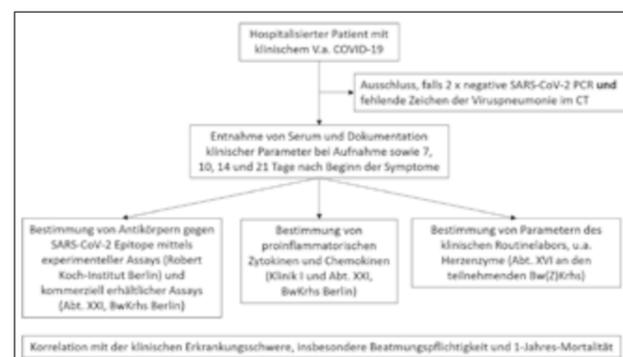


Abb. 1: Schematischer Ablauf der COVID-Studie des BwKrhs Berlin; das vollständige Studienprotokoll ist im Deutschen Register Klinischer Studien prospektiv registriert (Quelle: www.drks.de; Studien-ID: DRKS00021591)



Abb. 2: Mehr als 120 Blutproben von Patienten mit COVID-19 wurden im Rahmen der Studie auf Biomarker untersucht, die bei Entzündungsprozessen, viralen Erkrankungen oder Lungenversagen eine wesentliche Rolle spielen

bereits in der Notaufnahme nach Bestimmung eines oder mehrerer dieser Marker aus dem Blut vorhergesagt werden kann, sodass die entsprechenden Patienten dann besonders intensiv beobachtet werden können.

Insgesamt konnten an den vier Testzentren Blutproben und Daten von über 120 Patienten ausgewertet werden (Abb. 2). Nach einer Vortestung aller Biomarker an den ersten Studienpatienten wurden schließlich neun vielversprechende Faktoren ausgewählt, die in den Blutproben aller Patienten getestet wurden. Nach der statistischen Auswertung konnten zwei Biomarker identifiziert werden (einer mit einer bekannten Rolle bei viralen Erkrankungen und einer bei chronischen Lungenerkrankungen), die möglicherweise einen schweren COVID-19 Verlauf vorhersagen können. Die Publikation der Ergebnisse ist in Vorbereitung. Mittelfristiges Ziel ist die Etablierung eines dieser beiden Parameter im Routinelabor der Bundeswehrkrankenhäuser.

Darüber hinaus wurden für jeden COVID-19-Patienten die Daten des Routinelabors einschließlich Entzündungswerte, Nierenfunktionsparameter und Herzenzyme erfasst. Im Verlauf des stationären Aufenthalts der Patienten akkumulierten so im Durchschnitt mehr als 100 einzelne Datenpunkte, die mit Hilfe von Big Data-Methoden voraussichtlich statistische Korrelationen mit der Erkrankungsschwere und auf diese Weise weitere Aussagen zum Verlauf der COVID-19-Erkrankung erlauben werden.

Als Reaktion auf eine COVID-19 Erkrankung werden Antikörper gegen SARS-CoV-2 gebildet (Abb. 3). Diese können mit mehreren kommerziell erhältlichen Tests gemessen werden.



Abb. 3: SARS-CoV-2 Viren führen im Körper oftmals zu mehr als nur einer Atemwegserkrankung. Das Virus kann ebenfalls Gewebe außerhalb der Lunge infizieren – zum Teil mit verheerenden Folgen

Es gibt bislang wenig herstellerunabhängige Daten, die diese Tests gegeneinander vergleichen, um das optimale Testverfahren ermitteln zu können. Hierfür wurden in einem zweiten Teil dieser Studie SARS-CoV-2 Antikörper im Zeitverlauf des stationären Aufenthalts mit verschiedenen kommerziell erhältlichen Tests bestimmt. Diese Antikörperdaten wurden zusätzlich mit einer experimentellen Methode zur SARS-CoV-2-Antikörper-Bestimmung des Robert-Koch-Instituts verglichen, die mit einer besonders geringen Menge an Blut auskommt. Falls diese neue Methode dieselbe Aussagekraft wie die herkömmlichen Antikörper-Tests besitzt, könnten vergleichbare Informationen bereits aus geringeren Mengen Blut erhalten werden.

OFArzt Dr. med. Heinrich Weßling, M.A.  
Bundeswehrkrankenhaus Westerstede  
Westerstede

BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org

OStArzt Dr. med. Sven Duda  
Bundeswehrkrankenhaus Westerstede  
Westerstede

BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org

## Die Entwicklung und Anwendung eines 3D-Druckverfahren nutzenden Ausbildungsmoduls zur Trepanationsplanung

Ein Ausbildungsmodul zur Trepanationsplanung anhand auf Computertomographien realer schwer Schädel-Hirn-verletzter Patientinnen und Patienten basierender 3D-gedruckter Schädelmodelle wurde entwickelt und in Form eines Workshops für Sanitätsoffiziere in Fachweiterbildung erfolgreich getestet.

Die 3D-Drucktechnologie findet allgemein in den chirurgischen Disziplinen zunehmend Anwendung. Seit 2018 widmet sich im Bundeswehrkrankenhaus Westerstede die AG „3D-Druck in der Neurochirurgie“ in enger Kooperation mit dem Labor für Fertigungstechnik der Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät der Universität der Bundeswehr Hamburg der Erforschung von neurochirurgischen Anwendungen dieser Technologie im Bereich der Ausbildung sowie auch der der Operationsvorbereitung und der Anfertigung von Implantaten.

Unter dem Titel „Trepanationsplanung an patientenspezifischen, per 3D-Druck hergestellten Schädelmodellen“ wurde ein Workshop mit Sanitätsoffizieren in Weiterbildung durchgeführt, der bei den Teilnehmern auf sehr gute Resonanz stieß, und der nachwies, dass die Simulation von Trepanationen mithilfe 3D-gedruckter Schädelmodelle eine sehr nützliche, kostengünstige und effektive Methode ist, auch schwierige Techniken einzuüben, insbesondere für das sehr einsatzrelevante Gebiet der Versorgung schwerer Schädel-Hirn-Traumen.

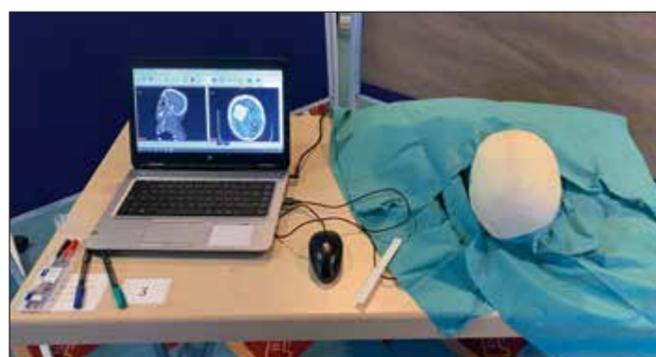


Abb. 1: Arbeitsplatz mit Schädelmodell und Computertomographie



Abb. 2: Von innen beleuchtetes Schädelmodell mit dadurch sichtbar gewordener Läsion

OStArzt Lisa Meyer  
Bundeswehrkrankenhaus Westerstede  
Westerstede

BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org

KptLt Sascha Hartig, M. Sc.  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Bei diesem Workshop wurden den Teilnehmern Schädelmodelle präsentiert, die jeweils verschiedene, traumabedingte und operationsbedürftige pathologische Veränderungen enthielten. Diese Schädelmodelle wurden anhand von Computertomografien hergestellt, die bei der Notfallversorgung tatsächlicher Schädel-Hirn-Trauma Patienten angefertigt wurden. Zusätzlich zu den Schädelmodellen konnten die Teilnehmer dann die entsprechenden Computertomografien einsehen (Abb. 1). Die einzuübende Fähigkeit bestand darin, aus den Computertomografien den bestmöglichen chirurgischen Zugang zu der Läsion zu entnehmen und dann die Zugangsplanung auf der Schädeloberfläche einzuzeichnen, ähnlich wie dies in der tatsächlichen neurochirurgischen Praxis geschieht.

Nach Beendigung dieser Aufgabe konnte dann eine unmittelbare Erfolgskontrolle durchgeführt werden, da die Schädelmodelle von innen beleuchtet sind. (Abb. 2) Bei eingeschaltetem Licht projiziert sich die Läsion auf die transparente 3D gedruckte Schädeloberfläche, sodass sofort festgestellt werden kann, ob der geplante chirurgische Zugang tatsächlich auf die Läsion hinführen würde. (Abb. 3) Da dies vom gleichen Teilnehmer jeweils in mehreren Durchgängen mit mehreren verschiedenen Schädelmodellen geübt werden konnte, konnte aus den Ergebnissen der Auswertung der Teilnehmerleistungen entnommen

werden, dass sich tatsächlich ein nicht unerheblicher Übungseffekt schon nach wenigen Durchgängen einstellt.

Erste Ergebnisse der Auswertung des Pilot-Workshops zur Trepanationsplanung konnten bereits international publiziert werden.

Perspektivisch ist die Fortentwicklung der Schädelmodelle zu einer immer größeren Detailgenauigkeit hinsichtlich anatomischer intrakranieller Strukturen geplant. So wurden die Schädelmodelle probatorisch mit weiteren anatomisch wichtigen Elementen ausgestattet, wie z. B. den großen venösen Sinus. Dies ist ein weiterer wesentlicher Fortschritt in der Simulationstechnik, da die Einübung der Berücksichtigung dieser Strukturen die Patientensicherheit weiter erhöht.



Abb. 3: Erfolgskontrolle und Rücksprache mit Lehrperson

Oberstabsarzt Dr. med. Patrick Hoth  
Bundeswehrkrankenhaus Ulm  
Ulm

BwKrhsUlm@bundeswehr.org

Oberfeldarzt PD Dr. med. habil. Gerhard Achatz  
Bundeswehrkrankenhaus Ulm  
Ulm

BwKrhsUlm@bundeswehr.org

Oberfeldarzt PD Dr. med. habil. Dan Bieler  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org

## Der „Terror and Disaster Surgical Care“-Kurs (TDSC®)

Das Konzept des „Terror and Disaster Surgical Care“-Kurses umfasst ein simulationsbasiertes Entscheidungstraining bei TerrorMANV-Lagen (Massenanfall von Verletzten bei lebensbedrohlichen Lagen). Im Rahmen des Forschungsverbundes Süd mit der UniBw München wird die Digitalisierung des Kurses methodisch-didaktisch als auch wissenschaftlich vorangetrieben. Zukünftige Projekte sollen die Vernetzung von Kliniken in der Bewältigung von TerrorMANV-Lagen verbessern.

Die sich wandelnde globale Sicherheitslage seit den Terroranschlägen vom 11. September 2001 sowie die jüngsten terroristischen Anschläge in Europa und Deutschland haben das Thema „Sicherheit“ in deutschen Kliniken als kritische Infrastruktur zunehmend in den Fokus gerückt.

Diese veränderte Lage hat in der Folge zu einer engen Kooperation zwischen der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU) und dem Sanitätsdienst der Bundeswehr geführt.

Resultierend aus dieser Kooperation entwickelte die bereits im Jahre 2013 ins Leben gerufene Arbeitsgemeinschaft für Einsatz-, Katastrophen- und Taktische Chirurgie der DGU (AG EKTC) ein Konzept zur Umsetzung eines Simulationstrainings für Terrorlagen.

Terrorlagen sind durch besondere Merkmale charakterisiert und weisen dadurch wesentliche Unterschiede zum normalen Massenanfall von Verletzten (MANV vs. TerrorMANV) und zu den im Alltag häufigen und bekannten schweren Verletzungen (z. B. Polytrauma nach Verkehrsunfall) auf.

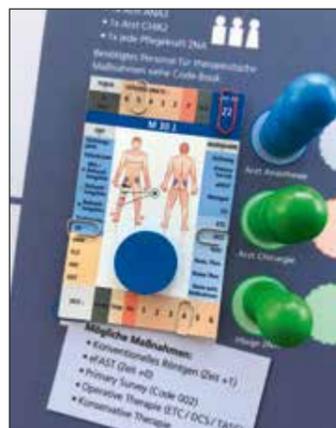


Abb. 1: Darstellung einer Patientenkarte auf dem Spielbrett des TDSC® (Terror, Disaster and Surgical Care)-Kurses. Die Patientenkarte simuliert einen Patienten im Spiel einschließlich des Verletzungsmusters, sowie der Therapieform

Oberfeldarzt Prof. Dr. med. Axel Franke  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org

Oberstabsarzt Prof. Dr. med. Benedikt Dieter Friemert  
Bundeswehrkrankenhaus Ulm  
Ulm

BwKrhsUlm@bundeswehr.org

Prof. Dr. Marko Hofmann  
Universität der Bundeswehr München  
Neubiberg

info@unibw.de

Diese Merkmale sind:

- Komplexe und dynamische Lagen, z. B. durch Second-Hit-Anschläge und un gelenkte Zuströme von Verwundeten
- Essenzielle Bedeutung der Kooperation mit Sicherheitsbehörden in Krisenstäben und am Einsatzort
- Hohe Bedeutung des Selbstschutzes und eines robusten Krankenhausalarm- und Einsatzplanes
- Penetrierende Verletzungen, insbesondere durch Schuss- und Explosionsverletzungen
- Kritische Blutungen durch Extremitäten- und Körperhöhlenverletzungen.

Inhaltlich umfasst der TDSC®-Kurs über zweieinhalb Tage Präsentationen durch Instruktoren auf Expertenniveau aus verschiedenen chirurgischen sowie anästhesiologischen Fachgebieten, interaktive Diskussionen, Fallbesprechungen sowie ein brettgestütztes Simulationsspiel zum Training der Entscheidungsfindung bei TerrorMANV-Lagen.

Die Spieler sind hierbei gezwungen, Entscheidungen auf medizinischer, taktischer und organisatorischer Basis sowie auf der Grundlage von unterschiedlichen personellen Ressourcen und Behandlungskapazitäten zu treffen, um ihre Kompetenz zur Bewältigung solch bedrohlicher Einsatzlagen zu steigern. Diese Entscheidungen werden auf einem Spielbrett (Abb. 1)

mit Patientenkarten (Abb. 2) und einem Codebook, das die Spieler durch die verschiedenen Szenarien leitet (Abb. 3), abgebildet.

Die Weiterentwicklung des Spielkonzeptes zielt vor allem auf das Thema „Digitalisierung“ ab. Dazu sollen schrittweise sämtliche Spielelemente in eine digitale Form überführt werden, um in Zukunft eine bessere Vernetzung der Spieler zu ermöglichen, z. B. von Kliniken innerhalb eines Traumanetzwerkes.

Ein weiterer Entwicklungsmeilenstein könnte die Portierung der Benutzeroberfläche des zukünftigen digitalisierten Spiels zum Personal- und Ressourcenmanagement für sanitätsdienstliche Behandlungseinrichtungen bei MANV in den Einsatzgebieten der Bundeswehr sein. Auch in der zivilen Katastrophenmedizin kann diese Oberfläche für NGOs (Nichtregierungsorganisationen) ein nützliches Tool sein.

Auch die Stressforschung könnte bei der Bewältigung der Spielszenarien ihren Einsatz finden und hieraus Erkenntnisse für die zukünftige Einsatzausbildung von Sanitätspersonal gewonnen werden.



Abb. 2: Darstellung des Spielbrettes zum TDSC® (Terror, Disaster and Surgical Care)-Kurs als Abbild einer Klinikstruktur mit den verschiedenen Behandlungsbereichen sowie den zugehörigen Patientenkarten



Abb. 3: Darstellung einer Spielsituation aus einem TDSC-Kurs unter Nutzung sowohl des elektronischen Codebooks auf einem Tablet als auch des konventionellen Codebooks in Papierform

Oberfeldarzt Professor (APL) Dr. med. Hagen Frickmann  
Bundeswehrkrankenhaus Hamburg  
Außenstelle am Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin  
Hamburg

BwKrhsHamburg@bundeswehr.org

## Erweiterte Evaluation molekularer Diagnostikverfahren für tropische Parasitenerkrankungen

**Im Jahresbericht 2020 wurde der Beginn der Evaluation molekularer Diagnostik zum Nachweis infektiöser Parasiten in humanen Proben vorgestellt. Inzwischen wurden die Untersuchungen vom Spektrum her erweitert, um in Vorbereitung der Verordnung (EU) 2017/746 ein breites Portfolio an Assays für Rückkehrer aus tropischen Einsatzgebieten auf diagnostische Akkuratheit zu charakterisieren.**

Wie bereits im Jahresbericht 2020 in Aussicht gestellt, wurde im Berichtszeitraum die vergleichende Evaluation molekularbiologischer Diagnostikverfahren zum Nachweis humaner Parasiteninfektionen in teils multinationalen Kooperationen weiter forciert, um in enger Kooperation mit dem deutschen Nationalen Referenzzentrum für tropische Infektionserreger Bernhard Nocht Institut für Tropenmedizin Hamburg zur Vorbereitung der Verordnung (EU) 2017/746 („CE-IVD“-Richtlinie) ein möglichst breites Portfolio an tropen-mikrobiologischer Spezialdiagnostik zum Erregerdirektnachweis aus humanen diagnostischen Proben hinsichtlich seiner diagnostischen Zuverlässigkeit beurteilen zu können.

Unter Beachtung sowohl der quantitativen Bedeutung als auch der klinischen Schwere wichtiger tropischer Parasitosen kommt der Malaria eine besondere Bedeutung zu, wobei neben dem Assay-Vergleich auch die Mitbetrachtung präanalytischer Einflüsse im Fokus des wissenschaftlichen Interesses steht. Eine weitere systemische Parasitose, deren molekularer Nachweis in Blutproben evaluiert wurde, war die Kala Azar, die viszerale Form der humanen Infektion durch Leishmanien

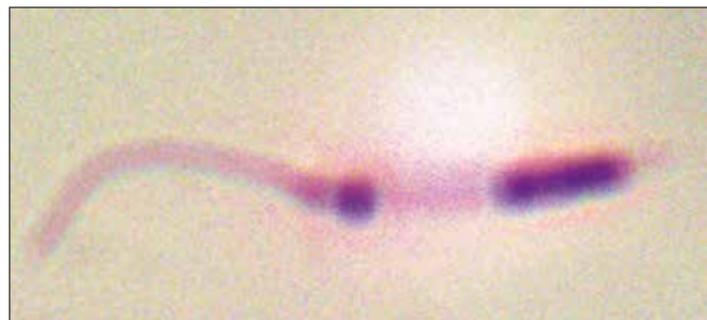


Abb. 1: Leishmania spp. (promastigotes Stadium)

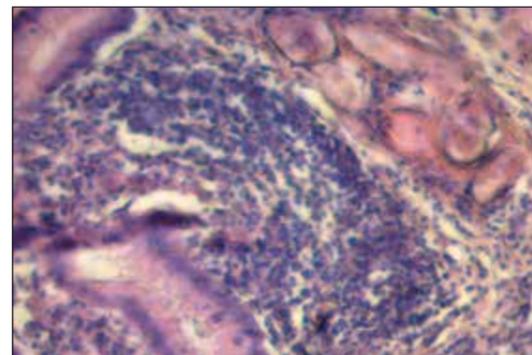


Abb. 2: Schistosomeneier in enteralem Gewebe

(Abb. 1). Hier konnte ein hoch empfindlicher PCR-Nachweis einer Kinetoplastennukleinsäure-Sequenz selbst aus Serum demonstriert werden. Ferner ließ sich, nach vielversprechenden Ergebnissen mit Serumproben von Reiserückkehrer(inne)n und Migrantinnen und Migranten, auch eine sehr sensitive Detektion hochrepetitiver Elemente der DNA afrikanischer Schistosomen im Serum von Einwohnerinnen madagassischer Hochendemiegebiete zeigen. Interessanterweise waren vergleichbare Analysen mit Serumproben laotischer Patientinnen und Patienten, die mit asiatischen Schistosomenarten infiziert waren und deren Residualproben vom Baseler Tropeninstitut zur Verfügung gestellt wurden, deutlich weniger empfindlich, was Raum für weitere Optimierungen lässt.

Weitergeführt wurden auch die Untersuchungen zum molekularen Nachweis von Darmparasiten, wobei sowohl Protozoen als auch Helminthen (Abb. 2 und 3) im Fokus standen. Vergleichende Untersuchungen mehrerer Multiplex-PCR-Panels verschiedener europäischer Hersteller und In-house-Assays zeigten vergleichbare diagnostische Akkuratheit bei meist akzeptabler Konkordanz der mit Residualproben von Studienkollektiven und Tropenrückkehrenden erhobenen Ergebnisse, wobei die Zusammensetzung der verschiedenen Assays teils etwas variierte. Eine Untersuchung zum Vergleich von Standard- und robusteren Nukleinsäure-Extraktionsverfahren für den Nachweis von Helminthen-DNA in Stuhlproben zeigte heterogene Resultate mit allenfalls einer Tendenz für eine höhere Empfindlichkeit bei Anwendung harscherer Extraktionsprotokolle, was im Widerspruch zu vorausgegangenen Untersuchungen steht. Dies galt sowohl für speziesspezifische Helminthen-PCRs als auch für gruppenübergreifende Konsensus-Assays.



Abb. 3: Hakenwurm

Die Bereitstellung von Residualstuhlproben von HIV-Patientinnen und -Patienten aus dem ghanaischen Hochprävalenzgebiet seitens des Bernhard-Nocht-Instituts ermöglichte ferner die Evaluation von PCR-Assays für Darmparasiten, die vor allem bei immunsupprimierten Patientinnen und Patienten, wie sie etwa im Rahmen von tropischen Einsätzen mit humanitärer Zielsetzung mit dem Sanitätsdienst in Berührung kommen könnten, differenzialdiagnostisch eine Rolle spielen. Dazu gehörten etwa Kokzidien wie *Cryptosporidium spp.* und *Cystoisospora belli*. Insbesondere für erstgenannte Erreger gelang der Nachweis durchaus heterogener diagnostischer Zuverlässigkeit häufig gewählter Zielgene, was die beobachtete Diskordanz beim Vergleich der Assays unterschiedlicher Herstellerfirmen in Teilen miterklären könnte. Auch Assays für Mikrosporidien, die phylogenetisch den Pilzen zugeordnet werden, aber Parasiteneigenschaften aufweisen, zeigten teils deutliche Unterschiede hinsichtlich der Akkuratheit ihrer Ergebnisse.

Flottenarzt Dr. med. Christoph Jänig  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

Oberstarzt Dr. med. Willi Schmidbauer  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

BwZKrhsKoblenzKlinikXAnaesthesiologie@bundeswehr.org

BwZKrhsKoblenzKlinikXAnaesthesiologie@bundeswehr.org

## Der digitale Weg des Verwundeten – Künstliche Intelligenz im Dienst der Patientenversorgung

Die Landes- und Bündnisverteidigung steht derzeit im Fokus der militärischen Zukunftsplanung. Kernelement der medizinischen Vorbereitungen ist die Versorgung von ca. 1000 Verwundeten am Tag. Dies stellt einen hohen logistischen Aufwand und eine hohe Arbeitsbelastung für das Fachpersonal entlang der einzelnen Versorgungsebenen dar. Künstliche Intelligenz (KI) kann hierbei ein wertvoller Partner sein.

Die Sanitätsdienste der Streitkräfte stehen bei den Szenarien der Landes- und Bündnisverteidigung vor großen Herausforderungen. Hauptaufgaben sind die adäquate Behandlung verwundeter Soldatinnen und Soldaten sowie die Erhaltung der Kampfkraft durch Prävention und eine schnelle Wiedereingliederung versorgter Patienten in ihre Kampfverbände. Die Verantwortlichen müssen stets in der Lage sein, ein aktuelles Lagebild über die Anzahl Verwundeter und die Auslastung medizinischer Versorgungseinrichtungen an die Führung weitergeben zu können.

Kernelemente dieser Arbeiten lassen sich in den Schlagworten DETEKTIEREN – PRIORISIEREN – VISUALISIEREN – ASSISTIEREN – DYNAMISIEREN zusammenfassen.

Eine KI-gestützte IT-Infrastruktur ist in der Lage, diese Prozesse zu unterstützen und so die Leistungsfähigkeit des Sanitätsdienstes zu steigern. Die Entwicklung einer gemeinsamen IT-Architektur zur Vernetzung aller Teilbereiche (Abb. 1) ist das Zukunftsthema der digitalen Forschung für einen effizienten Sanitätsdienst. Die im Jahr 2021 gestartete wissenschaftliche Initiative von Medizinern des Bundeswehrzentralkrankenhauses

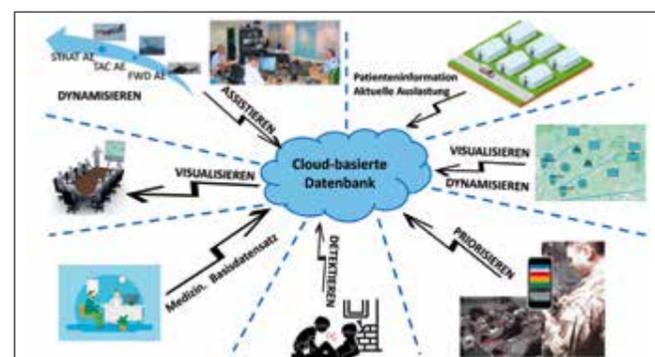


Abb. 1: Schematische Darstellung der vernetzten Informationserfassung und -verarbeitung mittels einer gemeinsamen IT-Architektur zur Digitalisierung des Verwundetenweges



Abb. 2: Beispiel einer smarten Textilie mit Sensortechnik zur Erfassung relevanter Vitalparameter (Quelle: WIWeB)

Oberstarzt Prof. Dr. med. Robert Schwab  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

BwZKrhsKoblenzKlinikIIKlinischerDirektor@bundeswehr.org

Koblenz, IT-Spezialisten der Universität der Bundeswehr München und des Planungsamtes der Bundeswehr leistet hierzu einen Beitrag.

DETEKTIEREN: Das Projekt Human Performance Enhancement – Smart Textiles and Augmented Reality (HPE-STAR) unterstützt durch Sensortechnik in smarten Textilien die Erkennung von Erschöpfungszuständen von Soldatinnen und Soldaten (s. Abb. 2 und 3). Zukünftig soll die Detektierung von Blut auch die Früherkennung lebensbedrohlicher Blutungen ermöglichen.

PRIORISIEREN: Ein weiterer Aspekt der Forschung ist die Etablierung einer KI, welche aus prozessierten Biosensordaten (Vitalparametern) die Priorisierung (= Triageentscheidung) durch das medizinische Personal unterstützen kann.

VISUALISIEREN: Die grafische Echtzeit-Darstellung der sanitätsdienstlichen Lage, z. B. des Standortes mobiler Einheiten, der Anzahl und Kategorie Verwundeter am Point of Interest sowie der Auslastung im Operationsgebiet zur Verfügung stehender medizinischer Behandlungseinrichtungen ist ein Kernelement zur Lenkung der Verwundetenströme und ein unverzichtbarer Bestandteil zur Operationsführung (s. Abb. 4).



Abb. 3: Visualisierung des individuellen medizinischen Status (Quelle: Fraunhofer FKIE)

Apl. Prof. Dr. Marko Hofmann  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Technische Informatik  
München

info@unibw.de

ASSISTIEREN: Die Disposition zahlreicher mobiler Sanitätseinheiten und die optimale Auslastung aller zur Verfügung stehenden Ressourcen ist eine große operative Aufgabe. Ein Arbeitspaket des Forschungsprojektes beschäftigt sich explizit mit der Patiententransportlogistik, um den richtigen Patienten mit dem richtigen Rettungsmittel über den richtigen Transportweg zur richtigen Behandlungseinrichtung zu verbringen. KI kann hierbei unterstützen, die große Flut an eingehenden Daten zu prozessieren und automatisch Dispositionsvorschläge zu unterbreiten.

DYNAMISIEREN: Der Zustand eines Verwundeten kann je nach Verletzungsschwere entlang der Zeitachse eine hohe Dynamik aufweisen. Initial getroffene Transport- und Behandlungsentscheidungen können dadurch aufgrund veränderter Voraussetzungen einer Anpassung bedürfen. Ebenso unterliegen die Frontlinien in hochmobilen Gefechten einer Dynamik, welche z. B. den Transportweg oder das Transportziel des Verwundeten entscheidend beeinflussen kann. Die Integration KI-assistierter Transportlogistik, einer geographischen Lagedarstellung in Echtzeit und der Abschätzung der Verletzungsschwere anhand von Biosensordaten können im Verbund nach entsprechender Verarbeitung dazu beitragen, nicht nur den Weg des Verwundeten, sondern auch die Behandlung des Patienten entscheidend zu beeinflussen.

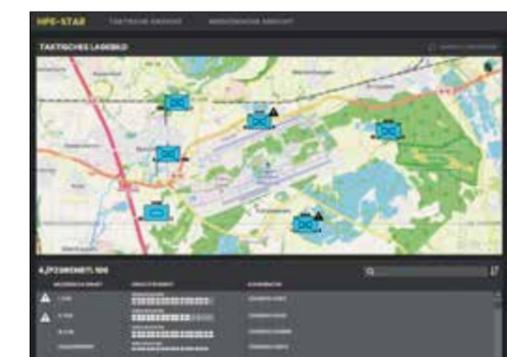


Abb. 4: Visualisierung der taktischen Lage (Quelle: Fraunhofer FKIE)

ORR'in PD Dr. Johanna Abendroth  
Streitkräfteamt  
Dezernat Militärpsychologische Forschung  
Hamburg

SKAAbtPersGdsFordGrpMilPsych-ForschgDez3MilPsychFg@bundeswehr.org

## Die Testpsychologie Psychische Fitness im Psychologischen Dienst der Bundeswehr

Als Teil der Erfassung der Psychischen Fitness erfolgt die computerbasierte Testpsychologie PsychFit freiwillig und mit Einverständnis. Es werden sieben Komponenten der Psychischen Fitness erhoben, die wesentlich dafür sind, dass Soldatinnen und Soldaten belastende Situationen psychisch bewältigen können. Die automatisierte Rückmeldung zu den Komponenten kann für die Beratung verwendet werden.

Der Dienst bei der Bundeswehr kann belastende Situationen für den Einzelnen im Grundbetrieb wie auch im Einsatz mit sich bringen, die die Psychische Fitness beeinträchtigen können. Mit dem computerbasierten Fragebogenverfahren *Testpsychologie Psychische Fitness* (Testpsychologie PsychFit) bietet der Psychologische Dienst der Bundeswehr ein zielgruppenorientiertes Verfahren zur Erfassung unterschiedlicher Komponenten der Psychischen Fitness an. Der Grad der Psychischen Fitness hängt neben den allgemein angeeigneten militärischen Grundfertigkeiten und der soldatischen Professionalität auch von einer Kombination von Verhaltensweisen, Merkmalen und Ressourcen ab, die die Soldatinnen und Soldaten befähigen, einen militärischen Einsatz oder stark belastende Dienstsituationen psychisch gesund bewältigen zu können.

Dabei nutzt die Testpsychologie PsychFit wissenschaftliche Testverfahren und erfasst sieben Komponenten der Psychischen Fitness (Abb. 1):

- 1.) Resilienz, 2.) Kohärenzgefühl, 3.) somatische Symptome, 4.) depressive Symptome, 5.) Hinweise über eventuelle Suizidgedanken, 6.) Hinweise zu aktuellen Belastungen und

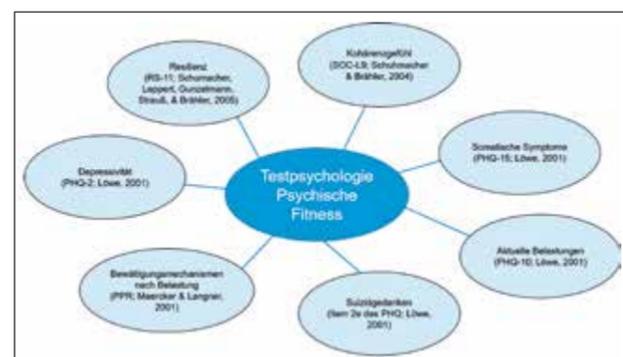


Abb. 1: In der Testpsychologie Psychische Fitness erfasste Komponenten der Psychischen Fitness



Abb. 2: Ergebnisberichtseite der Testpsychologie Psychische Fitness (Auszug mit fiktiven Werten)

7.) Hinweise zu vorhandenen Bewältigungsmechanismen nach Belastung.

Die Testpsychologie PsychFit wird als Bestandteil der Erfassung der Psychischen Fitness immer auf freiwilliger Basis mit Einverständnis der Soldatin oder des Soldaten durchgeführt. Die Berichtsseiten (Abb. 2) enthalten neben wesentlichen Informationen zur Person und dem Testzeitpunkt ausführliche Informationen zu allen durch die Testpsychologie PsychFit erfassten Komponenten. Hierfür werden zur Auswertung automatisch Textbausteine in die Berichtsseiten eingefügt, die neben einer allgemeinverständlichen Beschreibung der jeweiligen Komponente auch standardisierte Rückmeldung zum individuellen Abschneiden der Soldatinnen und Soldaten auf der jeweiligen Komponente sowie zum Prozentrang geben.

Neben der computerbasierten Erfassung zur Einzelberatung kann die Testpsychologie PsychFit auch zur Führungsberatung im Rahmen pseudonymisierter Quer- oder Längsschnittstudien eingesetzt werden, die keinerlei Aussagen zu den Werten einzelner Personen erlauben. Exemplarisch seien die Ergebnisse der Studie *PsychFit-M* zusammengefasst. Die Studie *PsychFit-M* fand als empirische Verlaufsmessung während eines Auslandseinsatzes der Fregatte BRANDENBURG zu drei Messzeitpunkten (t1, t2 und t3) mit der pseudonymisierten Testpsychologie PsychFit im Zeitraum Oktober 2020 bis April 2021 statt (N = 229; nt1 = 93, nt2 = 70, nt3 = 66; nt1t2t3 = 24). Eingebettet in die allgemeinen Rahmenbedingungen des Auslandseinsatzes und mit den Besonderheiten aufgrund der Pandemiesituation legen die Befunde der Studie ein differenziertes Bild in Bezug auf die Veränderung der erfassten Komponenten der Psychischen Fitness über den Marineeinsatz hinweg nahe. So zeigte sich

z. B. keine bedeutsame Beeinträchtigung während der Verlaufsmessung in Bezug auf Resilienz und Kohärenzgefühl. Die Werte dieser Komponenten lagen im Mittel zu allen drei Messzeitpunkten im durchschnittlichen Normwertebereich. Die Verlaufsmessung zeigte jedoch einen signifikanten Anstieg der depressiven und somatischen Symptomatik in den überdurchschnittlichen Normwertebereich zu t2 im Vergleich zu den durchschnittlichen Normwerten der anderen Messzeitpunkte. Die Werte der depressiven sowie somatischen Symptomatik sanken zu t3 signifikant auf das durchschnittliche Ausgangsniveau von t1 zurück, d. h. die beobachteten Beeinträchtigungen scheinen vorübergehender Natur zu sein. Auch fanden sich Hinweise auf eine Veränderung der Art potenzieller Belastungen von t1 zu t2 (Abb. 3). Damit liefert *PsychFit-M* empirische Kenntnisse über den Verlauf unterschiedlicher Indikatoren der Psychischen Fitness auf See, die zur Führungsberatung genutzt werden können.

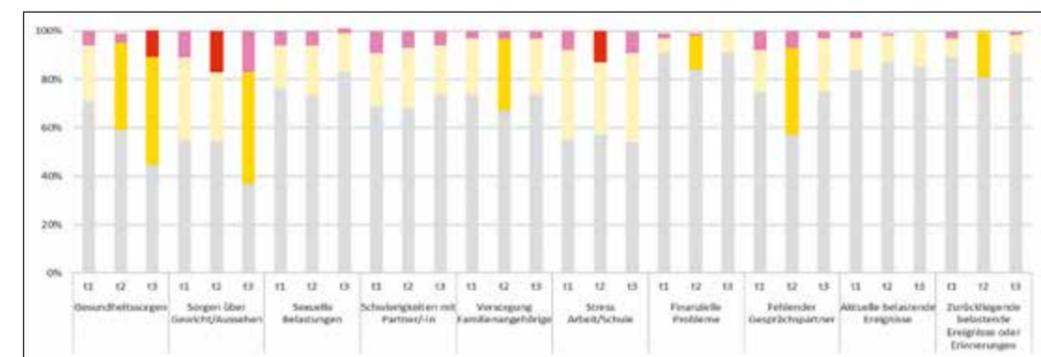


Abb. 3: Deskriptiver Querschnitt zu den Hinweisen zu aktuellen Belastungen (PHQ-10) der Studie *PsychFit-M*. Grau dargestellt ist der Prozentsatz an Antworten in der Antwortkategorie 1 = nicht beeinträchtigt. Hellgelb markiert ist der Prozentsatz an Antworten in der Antwortkategorie 2 = wenig beeinträchtigt und rosa markiert ist der Prozentsatz an Antworten in der Antwortkategorie 3 = stark beeinträchtigt. Dunkelgelb markierte Bereiche stellen eine Zunahme leichter Belastungen mit  $\geq 5\%$  und rot markierte Bereiche stellen eine Zunahme starker Belastungen mit  $\geq 5\%$  zwischen zwei benachbarten Messzeitpunkten dar

# 3

## Militärgeschichtliche und Sozialwissenschaftliche Forschung

Das Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) betreibt militärgeschichtliche und sozialwissenschaftliche Forschung im Auftrag des Bundesministeriums der Verteidigung, um mit den dabei gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnissen die öffentlichen Diskussionen über Militär und Sicherheit in Deutschland aktiv mitzugestalten. Das ZMSBw erforscht die deutsche Militärgeschichte nach den allgemein anerkannten Methoden und Standards der Geschichtswissenschaft unter Berücksichtigung der Wechselbeziehungen zwischen Militär, Politik, Wirtschaft, Gesellschaft und Kultur.

Mit seiner sozialwissenschaftlichen Forschung leistet das ZMSBw einen Beitrag zur Fortentwicklung der Sozialwissenschaften sowie zur wissenschaftsbasierten Politikberatung. Die Verschränkung der Geschichtswissenschaft sowie der Sozialwissenschaften erweitert die Möglichkeiten auf dem Gebiet der Forschung und der Anwendung ihrer Ergebnisse in der historischen Bildung.

Das ZMSBw leistet einen Beitrag zum Verständnis der Rolle von Streitkräften in einer pluralistischen Gesellschaft. In der thematischen Verschränkung mit der Militärgeschichte tragen die Sozialwissenschaften zur Erforschung und Deutung neuer Konflikte und besonderer Einsatzszenarien der Bundeswehr bei.

Die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des ZMSBw sind mit ihren Forschungen Teil der wissenschaftlichen Community. Sie pflegen Kontakte zu Organisationen, Institutionen und Dienststellen des In- und Auslandes sowie zu inner- wie außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Zunehmend wichtig ist die Kooperation mit anderen Institutionen der Bundeswehr, die ausbilden, forschen und erziehen. Die Einsätze der Bundeswehr unterstützt das ZMSBw mit historischen und sozialwissenschaftlichen Analysen.



Dr. Philipp Münch  
Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften  
der Bundeswehr (ZMSBw)  
Potsdam

ZMSBwEingang@bundeswehr.org

## Politische Zwecke und Ziele des internationalen militärischen Afghanistan-Engagements in den Jahren 2001 – 2014

**Im August 2021 zerfiel die von zahlreichen Staaten unterstützte afghanische Regierung unter dem Druck der Taliban. Als eine Ursache für die Probleme des internationalen Afghanistan-Engagements galt bereits zuvor dessen „mission creep“, also ungeplant über den ursprünglichen Zweck hinaus erweiterte Ziele. Doch warum weiteten sich die Ziele des internationalen militärischen Engagements so stark aus?**

Zwei Missionen bildeten die längste Zeit den Kern des internationalen militärischen Engagements in Afghanistan: Die US-geführte Operation Enduring Freedom (OEF) und die ab 2003 von der NATO geführte International Security Assistance Force (ISAF). Ab 2007 verschmolzen die beiden Ende 2014 abgeschlossenen Missionen de facto zunehmend.

Bereits ein oberflächlicher Blick auf den Verlauf des internationalen militärischen Engagements von 2001 bis 2014 zeigt, dass sich die Ziele immer stärker ausweiteten. Zweck der OEF war es ursprünglich, vorrangig die Verantwortlichen für „9/11“ „zur Rechenschaft zu ziehen“. Bereits 2003 verfolgte sie allerdings das hiermit nicht verbundene Ziel der Aufstandsbekämpfung. Der Zweck der ISAF lag darin, die neue afghanische Regierung zu festigen. Dazu sollte sie diese zunächst nur in Kabul und Umgebung schützen und ihre Sicherheitskräfte ausbilden. Später galt die ISAF aber selbst als verantwortlich für Sicherheit und „Stabilität“ ganz Afghanistans.

In der Forschung gilt die ungeplante Erweiterung der Ziele des internationalen Engagements als wichtige Ursache für dessen



Abb. 1: Die ranghöchsten Vertreter der US-Streitkräfte, ISAF und NATO mit dem afghanischen Präsident Hamid Karzai (2. v. r.) am 5. Oktober 2006 in Kabul (Quelle: NATO)



Abb. 2: Sitzung des Nordatlantikrats am 6. Dezember 2006 mit dem Supreme Allied Commander Europe General James Jones (Quelle: NATO)

Scheitern. Auch US-Präsident Joe Biden begründete im August 2021 das Ende des militärischen Engagements damit, dass die ursprünglichen Ziele aus den Augen verloren gegangen seien. Es drängt sich daher die allgemeine Frage auf, wie es zu dieser enormen Ausweitung gekommen war.

Das 2022 abzuschließende Projekt arbeitet die von den internationalen Akteuren des militärischen Afghanistan-Engagements von 2001 bis 2014 verfolgten Ziele heraus und kontrastiert sie mit den politischen Zwecken des Vorhabens. Zudem legt es dar, mit welchen Strategien sie diese Ziele erreichen wollten. Auf dieser Grundlage ist die Fragestellung zu beantworten, wieso sich die anfangs verfolgten Ziele und Vorgehensweisen entgegen den ursprünglichen Absichten immer stärker ausweiteten. Also zusammengefasst: Zu welchen Zwecken wollten die internationalen Entscheidungsträger was, wie erreichen und aufgrund welcher Ereignisse, Entwicklungen und Dynamiken mündete es ungewollt im intensivsten und zweitlängsten Engagement der NATO?

Das Forschungsprojekt verfolgt einen interdisziplinären Ansatz, der historische Quellenarbeit mit politikwissenschaftlichen Theorien verbindet. Ausgehend von den Vorannahmen von Bureaucratic Politics und Praxistheorie, sieht das Projekt Staaten nicht als geschlossene Akteure, die eine nutzenmaximierende Gesamtkalkulation machen und deren politischer Zweck ahistorisch vorauszusetzen ist. Gleiches gilt für die NATO und andere internationale Organisationen.

Stattdessen stehen Einzelpersonen im Fokus. Bei diesen ist im Einklang mit Bureaucratic Politics-Theorien davon auszugehen, dass ihre institutionelle Verortung entscheidend mitbestimmte,

wie sie den politischen Zweck des Afghanistan-Engagements interpretierten und welche diesbezüglichen Ziele und Vorgehensweisen sie befürworteten. Plausibel erscheint auch die praxistheoretische Annahme, dass die Akteure nicht bewusst die großen Linien ihres Handelns reflektierten.

Um die Fragestellung beantworten zu können, soll zum einen nachvollzogen werden, welche Zwecke und Ziele diese Akteure zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Mission artikulierten. Zum anderen ist zu rekonstruieren, wie sie sich bei Schlüsselentscheidungen verhielten und warum sie dies taten. Hierunter sind jene Entscheidungen zu verstehen, die im Rückblick den größten Einfluss auf den Verlauf des militärischen Engagements hatten. Diese Methode soll auch jene Zwecke und Ziele offenlegen, welche die Akteure nicht ausdrücklich artikulierten und deren Aussagen mit der tatsächlichen Praxis kontrastieren.

Als Quellen dienen zum einen zahlreiche offengelegte US-Dokumente, vor allem des US Department of Defense und des US Department of State. Hinzu kommen die im Bundesarchiv lagernden Akten des BMVg sowie erstmals offengelegte NATO-Dokumente.



Abb. 3: Soldaten der Bundeswehr im Rahmen der ISAF in Afghanistan, 2011 (Quelle: Bundeswehr / Rippl)

WissDir Dr. Gregor Richter  
 Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften  
 der Bundeswehr (ZMSBw)  
 Potsdam

ZMSBwZentralesManagement@bundeswehr.org

## Sozialwissenschaftliche Forschung zur Digitalkultur in der Bundeswehr

„Digitalkultur“ bezeichnet den Umgang der Angehörigen des Geschäftsbereichs BMVg mit Anforderungen, Chancen und Risiken der Digitalisierung auf Grundlage eines gemeinsamen Verständnisses. Mit den Ergebnissen einer vom Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) durchgeführten bundeswehrweiten Befragung 2020 wurde eine Grundlage für Maßnahmen zur Stärkung der Digitalkultur gelegt. Die Studie wird mit weiteren Umfragen 2022 fortgesetzt.

Grundlage für das Ressortforschungsprojekt im Bereich der Militärsoziologie bildet die mittlerweile fortgeschriebene „Umsetzungsstrategie Digitale Bundeswehr“ (Stand: 2022), die den Auftrag enthält, ein Konzept zum Aufbau der Digitalkultur für den Geschäftsbereich des BMVg zu entwickeln und zu realisieren. Die Daten der Begleituntersuchung wurden über eine Online-Umfrage unter einer repräsentativen Auswahl von Soldatinnen und Soldaten sowie zivilen Beschäftigten erhoben.

Ausgewählte Ergebnisse der Null-Messung des Standes der Digitalkultur sind (Abb. 1): Ein ausgewogenes bis leicht kritisches Bild ergibt sich bei der Frage nach der Zufriedenheit mit dem bisher Erreichten in Sachen Digitalisierung (vgl. Abb. 2): 26 Prozent sind (eher) zufrieden, 34 Prozent sind (eher) unzufrieden und ein Großteil von 39 Prozent antwortet mit „teils / teils“. Eine klare Mehrheit von jeweils über 75 Prozent hält die Digitalisierung für geeignet, die Bundeswehr effizienter zu machen, und nimmt an, die Bundeswehr könne mit ihr ihre Aufgaben besser erfüllen. Ein kritischeres Meinungsbild ergibt sich für die oft gescholtene Bürokratie in der Bundeswehr: 39 Prozent beobachten eine Reduktion der Bürokratie, 28 Prozent nehmen



Abb. 1: Forschungsbericht zur ersten Befragungswelle

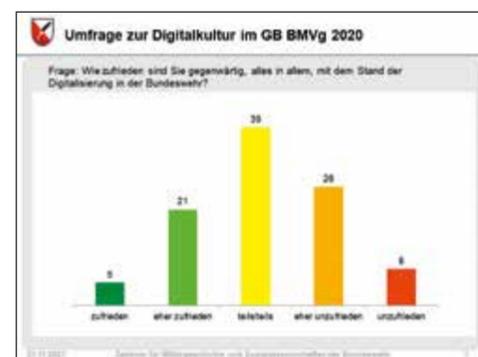


Abb. 2: Ausgewähltes Befragungsergebnis zum Stand der Digitalisierung in der Bundeswehr

eine Mittelposition ein und 33 Prozent beobachten immerhin sogar eine Zunahme an Bürokratie infolge der Digitalisierung.

Generell sind der Studie zufolge in Hinblick auf mentale Faktoren beim militärischen wie beim zivilen Personalkörper (Stichwort: „Digital Mindset“) nur geringe Hemmnisse für die digitale Transformation zu erkennen. Kritisch zu bewerten sind dagegen strukturelle Faktoren und solche, die mit dem digitalen Prozessmanagement zu tun haben. Zum Beispiel wird Kritik an der Beschaffungsorganisation für Informations- und Kommunikationstechnologie erkennbar: Aus Sicht von 65 Prozent trifft es (eher) nicht zu, dass die Beschaffungsprozesse für IT transparent sind, und für 80 Prozent der Befragten dauern die Prozesse schlichtweg zu lange. Hier deutet sich Optimierungsbedarf für die IT-Bereitstellungs- und Serviceorganisation der Bundeswehr an, die heute durch ein Nebeneinander von privaten und staatlichen Akteuren und vielfach durch Mehrfachzuständigkeiten gekennzeichnet ist.

Entscheidend für die Digitalisierung ist die Unterstützungsleistung von Vorgesetzten (Stichwort: „Enabling Leadership“) bei einer nicht nur zeitgerechten, sondern auch einer an individuelle Bedarfe des Personals angepassten Informations- und Kommunikationstechnologie. 61 Prozent der Befragten wünschen sich mehr Mitsprachemöglichkeiten bei der IT-Ausstattung an ihrem Arbeitsplatz.

Zielsetzung der flächendeckenden Modernisierung der Bundeswehr-IT im Rahmen der Öffentlich-Privaten-Partnerschaft „HERKULES“ vor über zehn Jahren war es, Insellösungen zu vermeiden, die Informations- und Kommunikationstechnologie zu vereinheitlichen und zu standardisieren. Nach wie vor kulli-

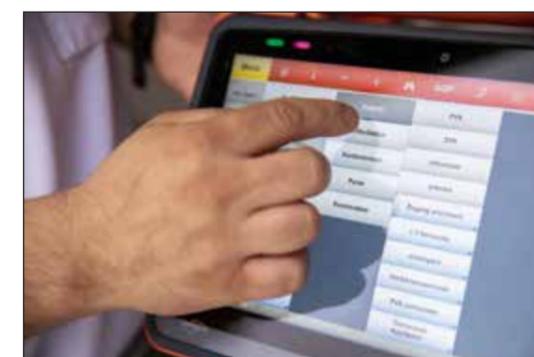


Abb. 3: Einsatz des NIDA-Pad (Notfall-, Informations- und Dokumentationsassistent) (Quelle: Bilddatenbank der Bundeswehr)

diert diese Zielsetzung offenbar in manchen Bereichen mit dem Erfordernis, geeignete nutzerspezifische Lösungen bereitstellen zu können.

Das Verhalten der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in organisationalen Veränderungsprozessen ist durch das persönliche Wollen (Motivation und Werte), das individuelle Können (Fähigkeiten und Fertigkeiten), das soziale Sollen und Dürfen (Normen und Regelungen) und durch die situative Ermöglichung (hemmende und begünstigende äußere Umstände) geprägt. Verdichtet man die Ergebnisse der Studie zur Digitalkultur vor diesem Hintergrund, lässt sich folgendes Fazit aus Sicht des modernen Changemanagements ziehen: Persönliches Wollen und individuelles Können der Bundeswehrangehörigen sind starke Assets, an die der digitale Veränderungsprozess anknüpfen kann. Gestärkt werden müsste in Zukunft das soziale Sollen und Dürfen (Stichworte: Führungskultur, Innovationskultur und Fehlerkultur) und die situative Ermöglichung (Stichworte: optimierte Beschaffungsverfahren, zeitgerechte IT-Ausstattung und weniger Digitalisierungsbürokratie), um die digitale Transformation der Bundeswehr ins Ziel zu bringen.

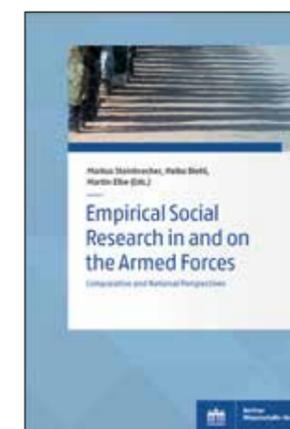


Abb. 4: Aktuelle Veröffentlichung aus dem Forschungsbereich Militärsoziologie

## 4

## Geowissenschaftliche Forschung

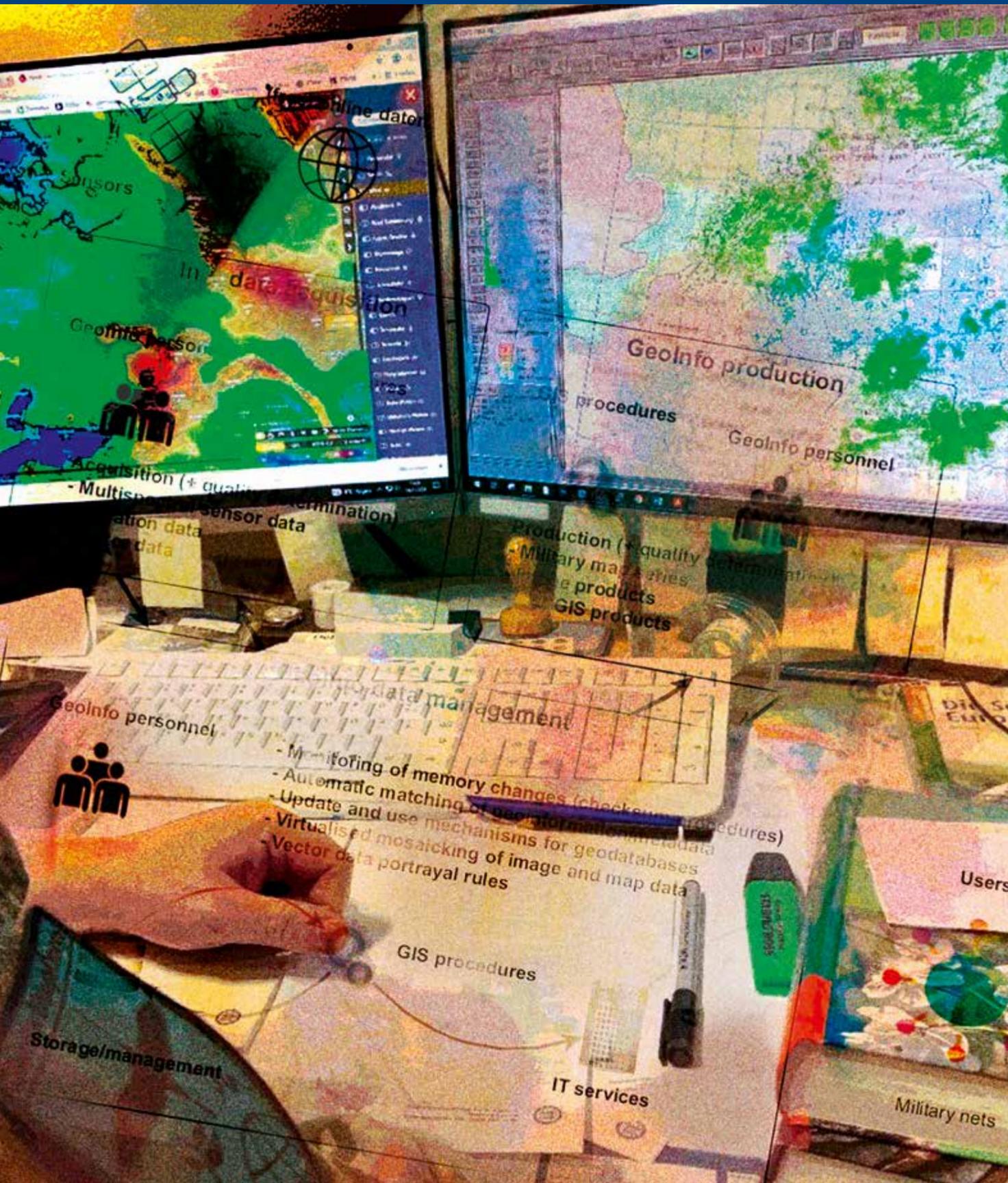
Das Geoinformationswesen der Bundeswehr umfasst ein Portfolio von 18 wissenschaftlichen Fachrichtungen, die beileibe nicht alle die Vorsilbe „Geo“ in ihrer Bezeichnung enthalten. Allen gemeinsam ist aber, dass sie letztendlich einen Beitrag leisten, um die Bundeswehr in ihrer Gesamtheit und die Streitkräfte im Besonderen zu befähigen, ihren Auftrag besser, effektiver, effizienter und möglichst ressourcenschonender erfüllen zu können.

Während die unmittelbaren und mittelbaren Unterstützungsleistungen des Geoinformationswesens den bestehenden aktuellen Bedarf decken, ist der zeitliche Horizont der geowissenschaftlichen Forschung naturgemäß mehr in die nahe oder etwas weitere Zukunft gerichtet.

Um trotzdem die notwendige Fokussierung zu gewährleisten, hat der Leiter des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr Handlungsfelder für die künftige Ausrichtung des Geoinformationswesens der Bundeswehr bis 2030 erlassen, an denen sich auch alle Vorhaben im Rahmen der geowissenschaftlichen Ressortforschung ausrichten. Dies sowie die Begleitung aller Neuvorhaben durch den Wissenschaftlichen Beirat beim ZGeoBw garantiert den zielgerichteten Einsatz aller Ressourcen im Rahmen der angewandten geowissenschaftlichen Forschung.

In den Handlungsfeldern für die Neuausrichtung werden natürlich auch die Megatrends, wie Digitalisierung, Automatisierung, datenzentrierte Ansätze oder auch Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz gebührend berücksichtigt. Das diese Themen für das Geoinformationswesen eine besondere Bedeutung besitzen aber auch nicht unbedingt Neuland darstellen, wird auch bei der Auswahl der Themen für den Jahresbericht 2021 deutlich.

Neben den Beiträgen zu den Herausforderungen des Datenmanagements und der Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens bei der Auswertung von Massendaten zeigt aber gerade der Beitrag der Vorhersage der Waldbrandgefährdung für Infrastruktur und Personal der Bundeswehr in Grundbetrieb, Ausbildung und Einsatz die zu Beginn angesprochene Vielfalt der Fachrichtungen und Themen im Bereich der im Geoinformationswesen verorteten Geowissenschaften.



## Herausforderungen der Her- und Bereitstellung digitaler Geoinformationen

**Wachsenden Mengen verfügbarer Daten und steigenden Anforderungen an IT-Services begegnet die geowissenschaftliche FuE mit Beiträgen zur Automationssteigerung in den Verfahren. Große Potenziale werden bei Herstellungsverfahren gesehen, wo bisher noch menschliches Abstraktionsvermögen benötigt wird. Die Online-Verfügbarkeit der GeoInfo-Daten und -Produkte wird u.a. durch interne FuE-Maßnahmen vorangetrieben.**

Die Digitalisierung und die zunehmende Menge verfügbarer Geoinformationen stellt die GeoInfo-Unterstützung vor neue Herausforderungen. Dies betrifft die Prozesse (vgl. Abb. 1)

- (1) zur Gewinnung von GeoInfo-Daten, d. h. qualitätsgesicherter Geoinformationen und zur Ableitung standardisierter GeoInfo-Produkte (GeoInfo-Datengewinnung / -Produktion),
- (2) zur Verwaltung und digitalen Bereitstellung von GeoInfo-Daten und -Produkten in Form von IT-Services (GeoInfo-Datenmanagement) sowie
- (3) die Bereitstellung der dazu erforderlichen personellen und materiellen Ressourcen.

Eine wesentliche Herausforderung ist die Bestimmung gesicherter Qualitätsaussagen zu den Geoinformationen wie z. B. zur Vollständigkeit, Genauigkeit von Position und Thematik, Logische Konsistenz. Bei einer stetig wachsenden Menge verfügbarer Geoinformationen sowie den steigenden Anforderungen an IT-Services, hat sich hier ein Spannungsfeld von Qualität, Geschwindigkeit und Effizienz aufgetan.

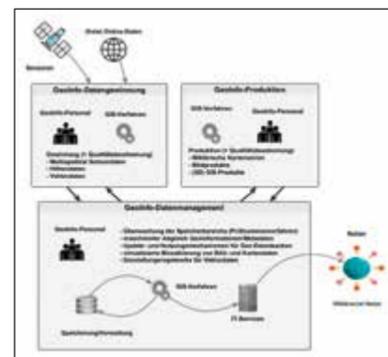


Abb. 1: Schematische Darstellung der Befähigungen zur Her- und Bereitstellung von Geoinformationen für die Bundeswehr

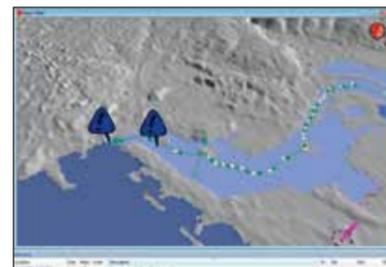


Abb. 2: Markierungen der aus einem automatischen Prüfverfahren für digitale Höhendaten ermittelten Anomalien



Abb. 3: Markierungen von Fehleranschlüssen aus einem automatischen Prüfverfahren zur logischen Konsistenz von Vektordaten

IT-Verfahrenslösungen zur Her- und Bereitstellung von Geoinformationen (GIS-Verfahren) werden in erster Priorität auf Basis von Commercial-, Government- and Military off-the-Shelf (CGM)-Produkten gesucht. Moderne handelsübliche Software-Plattformen bieten dazu eine breite Palette von Werkzeugen, die mittels Skriptsprachen oder graphischem Prozessdesign miteinander verknüpft und – auch unter Einbindung freier Programmbibliotheken – flexibel für die Automation von Prozessschritten der Geodatenverarbeitung eingesetzt werden können.

Ein Ziel der geowissenschaftlichen FuE-Aktivitäten ist es, den Automationsgrad der GIS-Verfahren systematisch zu erhöhen. Dies gelingt in Teilbereichen gut, z. B. wo die logische Konsistenz von Raster- oder Objekt- bzw. Vektordaten durch Bedingungsabfragen bestimmt wird. Beispiele dafür sind u. a. die Etablierung (halb-)automatischer Prüf- und Korrekturwerkzeuge zur Beseitigung von Anomalien in Höhendaten (Abb. 2), zur Einhaltung von Konsistenzkriterien bei Vektordaten (Abb. 3) sowie die derzeitige Untersuchung teilautomatischer Generalisierungsverfahren auf Basis von Konsistenz- bzw. Topologiekriterien (Abb. 4).

Allerdings ist die Gewinnung / Produktion von Geoinformationen und die Qualitätsbestimmung, vielfach auf das menschliche Abstraktionsvermögen angewiesen, insbesondere bei der Erfassung / Bewertung von Objektdaten und der (kartographischen) Generalisierung. Hier liegen noch viele Potentiale zur Steigerung der Automation, z. B. durch Integration von Mustererkennung in die GIS-Verfahren. Dies ist ein ideales Kooperationsfeld mit der Wirtschaft i. S. der „Strategischen Leitlinie Digitalisierung“. Daher werden auch Wege eines gezielten Informationsaus-

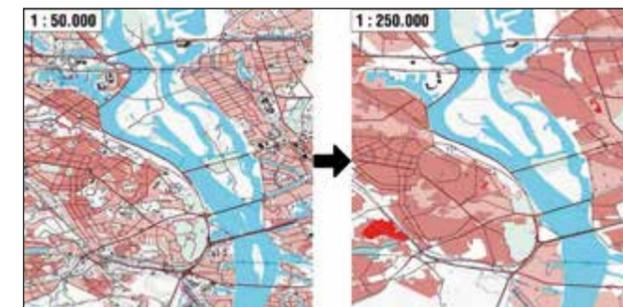


Abb. 4: Kartendarstellungen eines auf Basis von Topologie- und Attributkriterien automatisch generalisierten Vektordatensatz

tausches mit der Wirtschaft im vorwettbewerblichen Raum gesucht.

Auch beim GeoInfo-Datenmanagement werden im Rahmen der geowissenschaftlichen FuE (internes Fachprojekt 5654 „Aufbau GeoInfo-Datenmanagementsystem“) die Ansatzpunkte zur Automation gezielt mit den Mitteln der GIS-Verfahren vorangetrieben. Dazu gehört z. B. die automatische Registrierung aller dateibasierten Geoinformationen in Katalog-Servern, die Änderungs-Überwachung der Speicherbereiche mittels Prüfsummenverfahren, maschineller Abgleich der Geoinformationen und zugehörigen Metadatenätzen, Update- und Nutzungsmechanismen für Geo-Datenbanken, virtualisierte Mosaikierung von Bild- und Kartendaten sowie maßstabsabhängige Darstellungsregelwerke für Vektordaten zur Versorgung von Bild- und Kartendiensten. Für den Portalzugriff auf die Geoinformationen und deren bedarfsgerechte Online-Nutzung muss das Portfolio geeigneter Web-Anwendungen stetig gezielt weiterentwickelt werden.

Derzeit wird im Schwerpunkt an der Einführung einer zentralen Kataloganwendung aller verfügbaren Geoinformationen gearbeitet (Abb. 5). Diese soll noch in 2022 zur internen Nutzung im ZGeoBw etabliert werden und in 2023 im Intranet Bw zur Verfügung stehen.



Abb. 5: Zur Verbesserung der Online-Verfügbarkeit von Geoinformationen wird im Rahmen der geowissenschaftlichen FuE u. a. an der Einführung einer zentralen Katalog-Anwendung gearbeitet

ORR Dr. Stefan Koller  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Euskirchen

ROI'in Lea Chilla  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Euskirchen

ZGeoBwChdSt@Bundeswehr.org

ZGeoBwChdSt@Bundeswehr.org

## Vogelzugvisualisierung mittels Machine Learning – Entwicklung eines Modells zur Erkennung von Vogelzugmustern in Radardaten

Um das Vogelschlagrisiko im militärischen Flugbetrieb zu reduzieren, wird der Vogelzug über Radarsignale erfasst und visualisiert, so dass spezifische Warnungen ausgegeben werden können. Mit einem Machine Learning Algorithmus soll die Qualität dieser Vogelzugwarnungen und die Unterstützung der Berater und Beraterinnen in ihrer Arbeit verbessert werden.

Die gemeinsame Nutzung des Luftraums durch Vögel und Flugzeuge führt regelmäßig zu Kollisionen (Vogelschlag), die eine erhebliche Gefahr für die Besatzungen, die Luftfahrzeuge und die Bevölkerung darstellen. Um das Vogelschlagrisiko zu reduzieren, werden in der Bundeswehr Warnungen bei erhöhten Vogelpopulationen im Luftraum ausgegeben, sogenannte BIRDTAMs (Bird Notice(s) to Airmen/ Air Missions). Diese Warnungen werden durch BeraterInnen mit Hilfe einer eigenen Vogelzugvisualisierungs-Software (VoVis) erstellt, die den Vogelzug anhand von primären Radardaten aus dem militärischen und zivilen Radarnetz graphisch visualisieren kann.

Die Radarechos bieten Echtzeit-Informationen über Lage und Höhe von potentiellen Vogelaufkommen. Um aus der Fülle von Radarechos, die Benötigten zu identifizieren und darin Muster von Vogelzug zu erkennen, ist derzeit noch die langjährige Erfahrung der zuständigen Mitarbeitenden des Zentrums für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) für die Erstellung der BIRDTAMs nötig.



Abb. 1: Kranichzug



Abb. 2: Berater bei der Einschätzung der Radardatenlage von VoVis

Das ZGeoBw arbeitet daher an der Entwicklung eines Machine Learning Modells zur Mustererkennung, das die BeraterInnen bei der Beobachtung unterstützt, indem es

1. eine höhere Objektivität bei der Erkennung von Mustern schafft.
2. die Fehlerquote des Beratungsverfahrens durch eine Voreinschätzung des Machine Learning-Algorithmus verringert und so eine Optimierung ermöglicht.

Die eingehenden Daten der Radarstationen aus den letzten sechzig Minuten stehen als Datei im Arkonadatenformat zur Verfügung und werden als solche gespeichert. So lassen sich Fortbewegungsrichtung und Geschwindigkeit interpretieren. Arkona ist ein (proprietäres und) sehr effizientes Binärdatenformat, welches im bestehenden Vogelschlagwarnsystem bereits zur Übertragung von Radardaten eingesetzt wird.

Anhand der automatisch archivierten BIRDTAMs, werden die (Arkona) Rohdaten durch das Modell automatisch klassifiziert. Das beste Modell erreicht derzeit eine Genauigkeit von 80,6 % und berücksichtigt neben den primären Radardaten, welche mit einer Convolutional Neuronale Network (CNN)-Architektur trainiert wurden auch die Faktoren Wind und Jahreszeit.

Neben der Weiterentwicklung des Machine Learning Algorithmus wird an einer Modernisierung der Vogelzugvisualisierungs-Software gearbeitet, um eine weitere Reduzierung des Vogelschlagrisikos im militärischen Flugbetrieb durch verbesserte Warnungen der Luftfahrzeugbesatzungen zu erreichen.

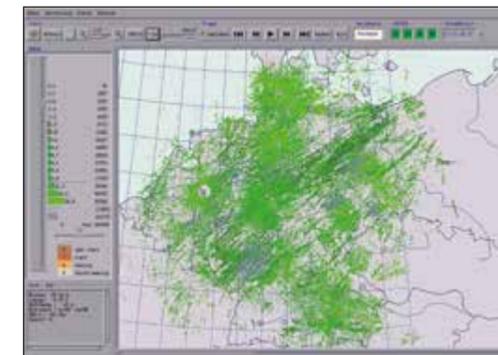


Abb. 3: Radardatenlage in VoVis vom 11. 11. 2016 (Herbstzug)

So sollen zusätzlich Wetterparameter, wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung, in die VoVis Oberfläche mit eingebunden werden, um das Vogelschlagrisiko für die Berater und Beraterinnen einschätzbarer zu gestalten.

ORR Dr. Stefan Polanski  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Euskirchen

ORR Rolf Thiele  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Euskirchen

ZGeoBwChdSt@Bundeswehr.org

ZGeoBwChdSt@Bundeswehr.org

## Vorhersage der Waldbrandgefährdung für Infrastruktur und Personal der Bundeswehr in Grundbetrieb, Ausbildung und Einsatz

Waldbrände gefährden nicht nur das Leben, die Gesundheit und die Infrastruktur der Zivilbevölkerung, sondern auch militärische Dislozierungen, Installationen und Aufträge im betroffenen Gebiet. Daher ist eine genaue Vorhersage und rechtzeitige Warnung vor einem potenziellen Waldbrandrisiko auch für militärische Entscheider essenziell, um die konkrete Einsatzplanung und -durchführung entsprechend der aktuellen Gefahrenlage anpassen zu können.

Das Sachgebiet Atmosphärische Umwelteinflüsse im Dezernat Atmosphärenphysik des Zentrums für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) ist für die Bereitstellung des operationellen GeoInfo-Verfahrens zur Analyse und Vorhersage der Waldbrandgefährdung von Infrastruktur und Personal der Bundeswehr in Grundbetrieb, Ausbildung und Einsatz fachlich zuständig. Seit mehreren Jahren wird dafür der weltweit anerkannte und vielfach genutzte Berechnungsalgorithmus des kanadischen Fire Weather Index (FWI) verwendet.

Der FWI beruht auf Mittagswerten der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und der 24-stündigen Niederschlagsmenge. Zudem wird im FWI-Algorithmus auch der Feuchtegehalt der abgestorbenen Pflanzenmasse des Waldes und – sofern vorhanden – eine winterliche Schneedecke berücksichtigt. Die dem FWI zugrundeliegende Referenzbaumart ist Kiefernbestand mit Nadelstreuauflage auf einer Rohhumusdecke. Aus der Sättigungfeuchte der oberen Bodenschichten sowie aus der Streufeuchte und Windgeschwindigkeit lassen sich das dynamische Angebot brennbarer Biomasse und die Laufgeschwindigkeit

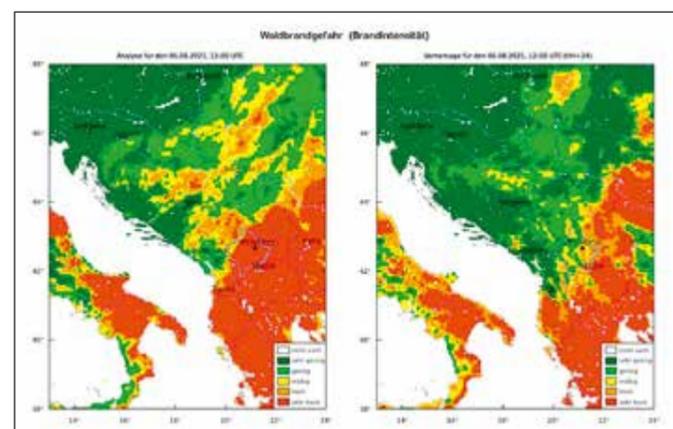


Abb. 1: Kartendarstellung der Waldbrandgefährdung auf dem Balkan für den aktuellen Tag (5. 8. 2021, 12.00 UTC, links) und den darauffolgenden Tag (6. 8. 2021, 12.00 UTC, rechts) (Quelle: GeoInfo-Portal Bw)

der Feuerfront abschätzen. Beide Größen bestimmen die Feuerintensität, die als fünfstufiges Maß für den Bekämpfungsaufwand ausgegeben wird (Stufe 1 = sehr geringe, Stufe 5 = sehr hohe Intensität).

Auf den Routineclustern des Deutschen Meteorologischen Rechenzentrums (DMRZ) werden aktuell einmal täglich Waldbrandwarnstufen für jede geographische Koordinate ausgewählter Einsatzräume auf der Basis von Eingabefeldern des numerischen Wettervorhersagemodells des DWD (ICON) vollautomatisiert berechnet. Daraus werden im nächsten Schritt für den aktuellen Tag um 12:00 UTC und den darauffolgenden Tag um 12:00 UTC Karten der Waldbrandgefahr (Brandintensität und Zündbereitschaft) erstellt. Für den Balkan werden die Karten während der Waldbrandsaison von März bis November im GeoInfo-Portal veröffentlicht.

Im täglichen Routinebetrieb können die so durch das Dezernat Atmosphärenphysik aufbereiteten Daten in der GeoInfo-Beratung und hier insbesondere für den Warndienst der Meteorologischen Vorhersagezentrale verwendet werden. Auf der Grundlage dieser Warninformationen können militärische Entscheider konkrete Maßnahmen zum Eigenschutz von militärischen Liegenschaften und des Personals ergreifen.

Im Zuge der rasant fortschreitenden technischen Entwicklung und schnell wachsenden Möglichkeiten der Digitalisierung von Diensten und Informationen wurde im Rahmen der kontinuierlichen Verfahrenspflege und Qualitätssicherung ein konkreter Optimierungsbedarf des Verfahrens erkannt. Das erste Ziel der weiteren Verfahrensoptimierung besteht in einer vollständig automatisierten und onlinegestützten Neufassung

des bestehenden GeoInfo-Verfahrens durch Entwicklung und Bereitstellung einer räumlich weltweit aufgelösten Waldbrand-Vorhersage-App mit modularen Erweiterungsoptionen.

Als Grundlage dienen die Rohdaten des Global Wildfire Information System (GWIS) der Europäischen Kommission, die als WMS-Dienst an eine thematische Webanwendung im Bundeswehr Intranet angebunden werden. Unter Berücksichtigung der aktuell weiterentwickelten Anforderungen an das optimierte FWI-GeoInfo-Verfahren durch die verschiedenen Bedarfsträger in den militärischen Organisationsbereichen soll in einem ersten Schritt die weltweite FWI-Vorhersage bis zu neun Tage im Voraus in dieser Webanwendung dargestellt werden. Ein erster Demonstrator wurde bereits entwickelt. Die konkrete Überführung des optimierten Verfahrens in die operationelle Nutzung erfolgt in Forschungs- und Entwicklungsprojekten des ZGeoBw als Ressortforschungseinrichtung des Bundes.

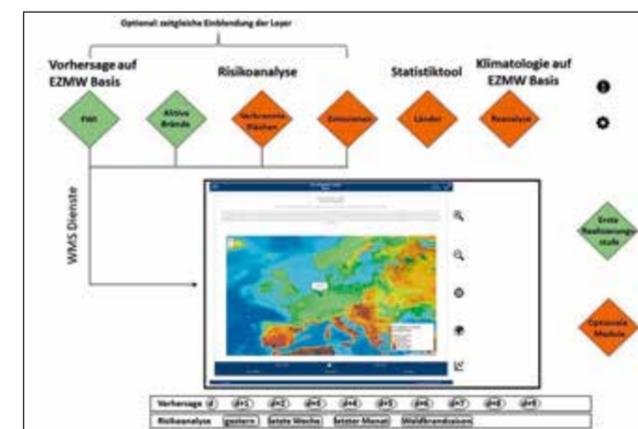


Abb. 2: Module des neu geplanten GeoInfo-Verfahrens zur weltweiten Waldbrandgefährdung im Rahmen einer Webanwendung im Intranet Bw

# 5

## Forschung Cyber / Informationstechnik

Wehrtechnische Forschung im Bereich der Cyber- und Informationstechnologien orientiert sich einerseits an zivilen und disruptiven Innovationen wie Künstlicher Intelligenz, andererseits sind die spezifischen Gegebenheiten zukünftiger Konflikte zu berücksichtigen, die zunehmend „hybrid“ geführt werden.

Es werden hier einige Beispiele aus dem breiten Spektrum an Forschungsaktivitäten vorgestellt. Diese reichen von internationalen Aktivitäten bis hin zu ganz speziellen IT-Sicherheitsaufgaben, beleuchten unterschiedlichste Anwendungen der Künstlichen Intelligenz und untersuchen Herausforderungen von hybriden Konflikten.

Dabei soll möglichst viel zivile Technologie verwendet werden, die für den späteren militärischen Einsatz wo erforderlich angepasst wird. Eine übergreifende Automatisierung in allen wehrtechnischen Forschungsbereichen wird hierbei sichtbar.



Dr. Volker Krebs  
Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung  
der Bundeswehr (BAAINBw)  
Koblenz

BAAINBwPosteingang@bundeswehr.org

Matthias Kopp  
Atos Information Technology GmbH  
München

de-info@atos.net

## ErzUntGlas – Erzeugung eines gläsernen Gefechtsfeldes zur Unterstützung dynamischer Operationen

Während aktuell im Rahmen der Digitalisierung land-basierter Operationen (D-LBO) die Basis zur vernetzten Operationsführung realisiert wird, wurde in der Forschungsstudie „ErzUntGlas“ (Erzeugung eines gläsernen Gefechtsfeldes zur Unterstützung dynamischer Operationen) die Automatisierung auf dem zukünftigen Gefechtsfeld in einer Live-Demonstration vorgeführt.

Bis 2023 soll taktisches Teaming zwischen Soldatinnen bzw. Soldaten und unbemannten fliegenden Systemen an realen Szenarien zusammen mit dem Heer unter Einsatzbedingungen gezeigt werden. Während es für den Nutzer von solchen Systemen eine ergonomische Herausforderung sein wird, ist es technisch der Schritt in die Automatisierung von Prozessen mit Hilfe von unterschiedlichsten Arten von künstlicher Intelligenz.

Neben den menschlichen Nutzern eines solchen Systems (Infanteristen, Besatzungen von Gefechtsfahrzeugen, Gefechtsstände) werden die unbemannten Systeme integriert, die sowohl als Kommunikationsdrohnen zur Verbesserung der physikalischen Verbindung als auch für die automatisierte Aufklärung verwendet werden.

Was momentan noch spezialisierte Luftbildauswerter durchführen, wird zukünftig ein Deep-Learning Mechanismus in jeder Aufklärungsdrohne übernehmen und eine Vorklassifikation vornehmen.



Abb. 1: Beispielhafte Missionsplanung für eine Gebietsaufklärung durch einen Drohnenschwarm (Quelle: Atos GmbH)



Abb. 2: Sitaware Frontline (Quelle: Atos GmbH)

Im Rahmen der Demonstration 2021 bei der WTD 61 in Manching wurde gezeigt, wie durch eine automatisierte Aufklärung von Drohnen, die mittels einer Schwarmsteuerung zentral geplant und gesteuert werden, ein digitales Lagebild des Gefechtsfeldes erzeugt werden kann. Die Routen für die Aufklärungsdrohnen werden abhängig von dem Geschehen am Boden berechnet, wobei zwischen taktischen „High-Level“-Befehlen wie Angriffs-, Rundum- oder Verteidigungsszenarien unterschieden werden kann (Abb. 1).

Die automatisierte Erkennung und Identifizierung von Objekten im bildgebenden Sensor (IR / VIS), z. B. Fahrzeuge und Personen, erfolgt dabei durch die Unterstützung von in den Drohnen integrierten KI-Bausteinen, so dass diese Informationen lokal in der Drohne verarbeitet und als ereignisgesteuerte Nachricht nahezu in Echtzeit in das Lagebild überführt werden. Die direkte Übertragung der Lageinformationen in ein Führungssystem des Heeres wurde über eine Anbindung von Sitaware Frontline medienbruchfrei nachgewiesen (Abb. 2).

Durch die offene Architektur des Systems ErzUntGlas auf Basis der Trusted Service Mesh (TSM), bietet das System eine flexible Möglichkeit zur Anbindung weiterer Softwareapplikationen und Software definierter Systeme, z.B. Führungssystemen, Sensor-To-Shooter, Joint-Fire Support, Kommunikationssystemen etc. (Abb. 3).

Neben einer verbesserten automatisierten Aufklärung wurde auch demonstriert, wie ein Bekämpfungsprozess deutlich beschleunigt werden kann. Dazu wurde der vollständige Sensor-to-Shooter Cycle mit Einbindung des Systems Fireweaver vorgeführt. Dabei kamen wiederum Drohnen als autonom wirkende



Abb. 3: Sensor-To-Shooter System (Quelle: Atos GmbH)

Sensoren zum Einsatz. Der zentrale mobile Leitstand zur Planung und Steuerung der Missionen sowie zur Lagebearbeitung wurde in einem mobilen militärischen Gefechtsstand integriert und dessen Arbeitsfähigkeit in der Bewegung gezeigt.

Die digitale Informationsübertragung und taktische Kollaboration (Audio, Video, Daten) innerhalb des hochdynamischen Szenarios wurde durch ein robustes, leistungsfähiges Mobile Ad-hoc Netzwerk (MANET) im UHF- und S-Band auf Basis von Software Defined Radio (SDR) Funksystemen ermöglicht. Dabei kamen mehrere sogenannte Mobile Kommunikationsknoten zur Kommunikation aller Komponenten zum Einsatz. Hierbei konnte auch die Live-Übertragung der Videostreams aus der Drohnensensorik über das MANET der taktischen Funkgeräte in Bewegung demonstriert werden.

Beim späteren Einsatz von bis zu 16 unbemannten Systemen im Einsatz besteht dann die Herausforderung darin, den Bediener bei der Verifikation der Ergebnisse intelligent zu unterstützen und laufend ein aggregiertes Gesamtbild zu erzeugen für ein gläsernes Gefechtsfeld.

Bis 2023 werden unter Einbindung von Soldatinnen und Soldaten als Nutzer und in Koordination mit den Entwicklungen bei D-LBO der operative Mehrwert des Systems unter Einsatzbedingungen weiter optimiert und in iterativen Schritten bis zum Reifegrad TRL 6 weiterentwickelt. Anschließend ist eine Realisierung des Zielsystems im Rahmen eines Projekts geplant.

TORR Dipl.-Ing. Florian Johannes Wörner  
Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie  
und Elektronik (WTD 81)  
Greding

WTD81posteingang@bundeswehr.org

Dipl.-Ing. Robert Koch  
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS  
Erlangen

info@iis.fraunhofer.de

## Moderne Kurzwellen-Kommunikation

**Die Kommunikation über Kurzwelle rüstet sich für die Anforderungen moderner, digitalisierter Streitkräfte. So könnte man die technische Entwicklung der letzten Jahre im Bereich der Wellenformen und Funkgeräte zusammenfassen. Neue breitbandige Übertragungsverfahren wurden von der Industrie entwickelt, in zahlreichen Feldtests erprobt und mittlerweile auch teilweise in der NATO standardisiert.**

Die bisherige, klassische Kommunikation über die Kurzwelle erfolgt typischerweise in Kanälen von nur 3 kHz Bandbreite. Dies ist, und bleibt, ausreichend für analoge oder digitale Sprache und die Übermittlung wichtiger Einzelmeldungen. Um dem allgemeinen Trend der Streitkräfte hin zur Vernetzung aller Ebenen und Entwicklung eines großflächigen, gemeinsamen Lagebildes zu entsprechen, mussten sich jedoch auch die Leistungsparameter der Kurzwellen-Funkgeräte und ihrer Wellenformen grundlegend verbessern. Von daher erscheinen nun auch nach und nach die nächsten Gerätegenerationen auf dem Markt, die den Bedarf an größeren Bandbreiten und höheren Datenraten zu decken versprechen.

Zusammen mit der WTD 81 und dem BAaINBw hat das Fraunhofer IIS diese Entwicklung in den letzten Jahren begleitet und Untersuchungen bezüglich der Verfügbarkeit von Frequenzen und der Nutzbarkeit von breitbandigen Übertragungsverfahren durchgeführt.

Die Standardisierung breitbandiger Verfahren begann mit der Erweiterung des MIL-STD-188-110 zu nunmehr Revision D.

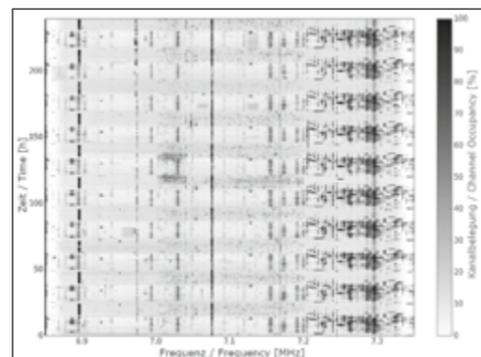


Abb. 1: Messung der tatsächlichen Frequenzbelegung und Auswertung der statistischen Kanalbelegung der Kurzwelle über unterschiedliche Frequenzabschnitte und längere Zeiträume an mehreren Standorten

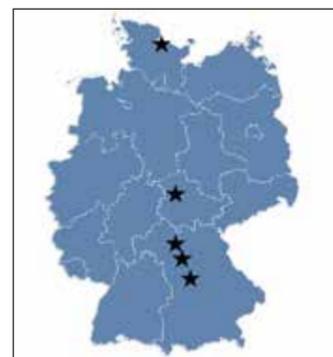


Abb. 2: Standorte für die Langzeit-Messung und Auswertung der tatsächlichen Frequenzbelegung der Kurzwelle. Ausgewählt wurden Greding / WTD 81 (ländlich), Eckernförde / WTD 71 (Küste, ruhig) sowie Erlangen (städtisch), Nürnberg, (städtisch) und Ilmenau (ländlich) / jeweils FhG IIS

Dipl.-Ing. Ewald Hedrich  
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS  
Erlangen

info@iis.fraunhofer.de

Er beschreibt Verfahren bis 48 kHz Bandbreite und 240 kbit/s Datenrate. Darauf folgend wurden auch Aktivitäten für eine NATO-Standardisierung begonnen. In Ausarbeitung oder Verabschiedung befinden sich dabei momentan die STANAGs 5069 (48 kHz Breitband Physical Layer), 4539-H (Multi-Träger-Bündelung), 4203 (Geräteanforderungen) und 5066 (Data Link Layer).

Im Rahmen mehrjähriger Messungen wurde die Verfügbarkeit von Kurzwellen-Kanälen untersucht. Dazu wurde an verschiedenen Empfangsstandorten innerhalb Deutschlands die tatsächliche Belegung des Frequenzbandes ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten durchgehend eine niedrige Auslastung. Auch wenn sich dies zukünftig mit dem Aufkommen neuer breitbandiger Funkgeräte ändern sollte, so bleibt eine zweite wichtige Erkenntnis bestehen: Es finden sich fast durchgängig freie Frequenzblöcke im relevanten Spektrum, die sich durch einen frequenz-agilen und zeitlich dynamischen Zugriff nutzen ließen. Dadurch wäre eine breitbandige Kommunikation mit hoher Datenrate möglich. Der Fokus weiterführender Diskussionen sollte daher nicht auf der technischen Nutzbarkeit der Frequenzen liegen – die Funktechnik scheint ausgereift und verfügbar –, sondern in der Realisierung gemeinsamer Rahmenbedingungen zur effektiven und dynamischen Nutzung des sehr kleinen Frequenzbereichs in der Kurzwelle.

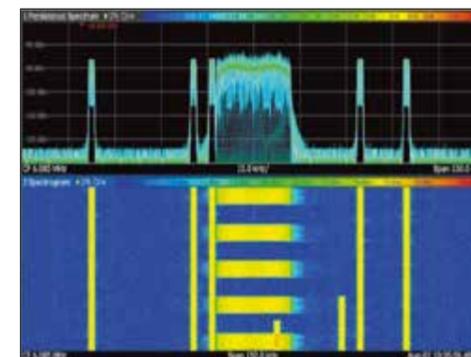


Abb. 3: Spektrogramm und Wasserfalldiagramm der durch das Modell erzeugten, künstlichen Kanalbelegungen und Überlagerung mit einem breitbandigen Funksignal

Zur Unterstützung der WTD bei der Vermessung, Bewertung und Auswahl zukünftiger Funkgeräte für die Bundeswehr wurde auf Grundlage der beobachteten Frequenzbelegungen ein stochastisches Kanalbelegungsmodell entwickelt. Es besitzt die empirisch ermittelten, statistischen Eigenschaften einer möglichen Kurzwellen-Belegung und kann diese auf einem definierten Frequenzband wiedergeben. Damit ist es möglich, HF-Kanalsimulatoren zu bauen, die im Labor zwischen kommunizierende Funkteilnehmer geschaltet werden können, um so deren Übertragungen durch die Simulation von belegten Kanälen beeinflussen zu können. Durch Beobachtung und Vergleich des Verhaltens können somit die Fähigkeiten der neuen Verfahren zur automatischen Kanal- und Bandbreitenwahl (Automatic Link Establishment – ALE) bewertet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei den regulatorischen Grundlagen zur dynamischen Nutzung der knappen Frequenzressourcen noch einige Herausforderungen zu meistern sind. Die technische Nutzbarkeit der Kurzwelle mit breitbandigen Systemen für hohe Datenraten befindet sich aber bereits auf einem guten Weg.

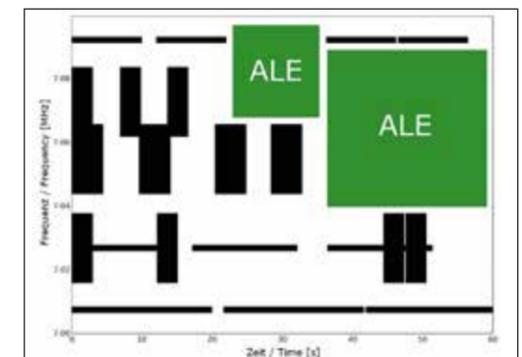


Abb. 4: Diagramm einer modellierten Kanalbelegung unterschiedlicher Bandbreite (schwarz) über Zeit und Frequenz und daraus resultierend die zu findenden Zeit-Bandbreiten-Fenster für eine ALE-fähige Wellenform (grün) für die spätere Untersuchung im Labor und Bewertung der Leistungsfähigkeit

Prof. Dr. Ulrich Schade  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung  
 und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Dr. Felix Govaers  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung  
 und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

## Adversariale Angriffe gegen textverarbeitende Künstliche Intelligenz (KI)

Bei einer hybriden Kriegsführung ändern sich Angriffe und Abwehrmöglichkeiten. Dies trifft auch für die KI zu, die zur Erkennung, zur Aufklärung und zur Abwehr von Angriffen eingesetzt werden kann. Im Beitrag werden adversariale Angriffe gegen KI, im Beispiel gegen textverarbeitende KI, beschrieben, deren Generierung erläutert und eine Möglichkeit zur Erkennung dieser Angriffe vorgestellt.

Militärische Operationen sind immer mit Aspekten von Tarnen und Täuschen verbunden. Bei klassischen Operationen können KI-Verfahren eingesetzt werden, um Tarn- und Täuschungsversuchen entgegenzuwirken. Im Gegenzug kann ein Gegner versuchen, nicht nur die menschliche Aufklärung, sondern auch die eingesetzten KI-Systeme zu täuschen. Bei der hybriden Kriegsführung muss aber manchmal ein anderer Ansatz gewählt werden. Eine Beeinflussungskampagne in den Sozialen Medien muss für die Personen der Zielgruppe zwar nicht als Beeinflussung erkennbar sein, aber verbreitete Texte und Bilder müssen für diese lesbar bzw. erkennbar sein. Gleichzeitig sollen KI-Verfahren getäuscht werden, die als Filter die Verbreitung unterbinden. Hier kommen die adversarialen Angriffe ins Spiel. Texte und Bilder sind bei adversarialen Angriffen so verändert, dass KI-Verfahren getäuscht werden, der Inhalt der Bilder und Texte für einen menschlichen Betrachter bzw. Leser aber unbeeinträchtigt bleibt.

KI-Verfahren operieren oft als Klassifikatoren. In Bezug auf die sozialen Medien können Beiträge etwa wegen „Fake News“, „Hate Speech“, „Angriff auf die demokratische Grundordnung“

Klassifikationsbeispiele		
Text	Klassifikation	Konfidenz
Some of the protesters vandalized a store.	VIOL_DEMONSTR	0.9633
Some of the pro+es+ers vandalized a store.	MOB_VIOL	0.7388
Some of the protet+ers vandalized a store.	MOB_VIOL	0.7099
Some of the pretesters vandalized a store.	MOB_VIOL	0.7153
Some of the protectors vandalized a store.	MOB_VIOL	0.7554
Some of the protesters vanadalizt a store.	PEACE_PROTEST	0.7945

Abb. 1: Die Klassifikation hängt an den Wörtern „protesters“ und „vandalized“. Durch Modifikationen sind sie für die KI nicht mehr oder weniger gut erkennbar, sodass sich die Klassifikation ändert

etc. der Klasse „bedenklich“ zugeordnet oder als „unbedenklich“ klassifiziert werden. Werden Beiträge geändert und Klassifikatoren getäuscht, ohne dass ein Mensch der Täuschung unterliegen würde, bezeichnet man die Änderung als „utility-preserving“. Das ist das Kennzeichen adversarialer Angriffe. Sollen Änderungen im Text erfolgen, können für ihre Generierung linguistische Kenntnisse, etwa aus dem Bereich der Leseforschung, herangezogen werden.

Abb. 1 zeigt solche Änderungen auf der Zeichenebene, wobei der Zielsatz unter den Änderungen anders klassifiziert wird. Unter den Änderungen wird das jeweils geänderte Wort für das System weniger kenntlich. Es wird damit für die Klassifikation weniger oder gar nicht herangezogen. Im Beispiel wird in dem Satz „Some of the protesters vandalized a store.“ das Wort „protesters“ verändert, was die Klassifikation (Was für ein Ereignis beschreibt der Satz?) von „Violent Demonstration“ zu „Mob Violence“ ändert. Wird dagegen eine Manipulation an „vandalized“ durchgeführt, ergibt sich die Klassifikation „Peace Demonstration“. Alle Manipulationen sind von der Art, dass ein Mensch das Wort weiterhin erkennt. Neben solchen Änderungen können Texte auch mit Zusätzen (sogenannten sprachlichen Ornamenten) erweitert werden, die nicht zu der eigentlichen Aussage beitragen.

Abb. 2 verdeutlicht dies mit Relativsätzen, deren Einfügung ebenfalls zu der Fehlklassifikation „Peace Demonstration“ führt.

Adversariale Angriffe können über eine Art Trick erkannt werden: Ein Klassifikator lässt sich so trainieren, dass er nicht nur Bilder, Texte etc. korrekt klassifiziert, sondern auch als

Autoencoder genutzt werden kann. Ein Autoencoder stellt aus der internen Repräsentation etwa eines Textes, die für die Klassifikation genutzt wird, die ursprüngliche Eingabe wieder her. Beim Training einer entsprechenden KI sind zwei Kostenfunktionen zu minimieren, die der Klassifikation und die des Autoencodings. Dabei wird sichergestellt, dass die Klassifikationsfunktion der Anwendung eine vorgegebene Schwelle, beispielsweise 95 %, nicht unterschreitet, aber das Autoencoding trotzdem gute Ergebnisse liefert. Adversariale Angriffe werden gegen die Kategorisierungsfunktion der Anwendung geführt und lösen falsche Kategorisierungen aus. Da aber die Anwendung auch als Autoencoder genutzt werden kann, lässt sich zu jeder Kategorisierung, die die Anwendung vornimmt, auch das zugehörige Ergebnis des Autoencoders auswerten. Bei adversarialen Angriffen nimmt der Fehler des Autoencoders zu, was für die Entdeckung des Angriffs genutzt wird.

Klassifikationsbeispiele		
Text	Klassifikation	Konfidenz
Some of the protesters vandalized a store.	VIOL_DEMONSTR	0.9633
Some of the protesters that later were identified due to their involvement in a social media campaign that criticized arrests made by the police that day vandalized a store.	PEACE_PROTEST	0.4882

Abb. 2: Durch „sprachlichen Ornamente“, also durch zusätzliche Wörter oder Nebensätze, die die Semantik der Aussage nicht ändern, wird die Klassifikation in eine andere Richtung gelenkt

TORR Dipl.-Ing. Stefan Kolm  
 Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie  
 und Elektronik (WTD 81)  
 Greding  
 wtd81210@bundeswehr.org

Dipl.-Ing. Thomas Kuhn  
 HTV Halbleiter-Test & Vertriebs-GmbH  
 Bensheim  
 info@HTV-GmbH.de

## Design informationssicherer Field Programmable Gate Arrays (FPGAs)

Die Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie und Elektronik (WTD 81) hat mit der Fa. HTV Halbleiter-Test & Vertriebs-GmbH FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) analysiert, um die Funktionalität der sicheren Kryptobibliothek Botan (eine sog. Secure Sockets Layer Bibliothek) auf einem Prozessor vom Typ Zynq UltraScale+ umzusetzen.

Im Einzelnen wurden Krypto-Algorithmen aus der Bibliothek Botan in eine VHDL-Hardwarebeschreibungssprache (VHDL: Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) implementiert und deren fehlerfreie Funktionsweise evaluiert. Die Funktionsweise der Algorithmen umfasst die Verschlüsselung, Authentifikation und Erzeugung von sog. Hashwerten. Die realisierten Algorithmen konnten erfolgreich in ein spezielles Protokoll (TLS 1.3) integriert werden, das auf einem FPGA vom Typ Zynq UltraScale+ MPSoC in Betrieb genommen wurde.

FPGAs sind integrierte Schaltkreise der Digitaltechnik und kommen in vielen Gebieten der digitalen Elektronik zum Einsatz. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität und Parallelität werden sie gerne als Co-Prozessoren für CPUs (z. B. zur Berechnung kryptographischer Algorithmen) eingesetzt, um deren Performanz zu beschleunigen. Auch als programmierbare Logik-Bausteine in der Informationstechnik gewinnen sie immer stärker an Bedeutung. Aus diesem Grund haben die beiden großen CPU-Hersteller (Intel und AMD) in den vergangenen Jahren die beiden marktführenden FPGA-Hersteller (Xilinx und Altera) aufgekauft.



Abb. 1: UltraZed SOM

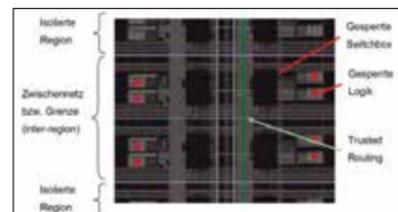


Abb. 2: Isolation Design Flow (IDF)

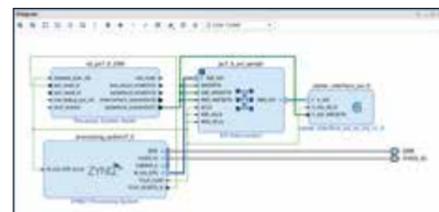


Abb. 3: Block-Design – Anschluss des VHDL-Algorithmus über die universelle Schnittstelle (cipher\_interface) an das Prozessorsystem (ZYNQ)

Als Hardware-Plattform wurde das UltraZed-SOM-Board (Embedded System On Modul, SOM) mit einem Zynq UltraScale+ MPSoC-FPGA (Multiprocessor System on a Chip, MPSoC) der Firma Xilinx gewählt (vgl. Abb. 1).

Damit einzelne Bereiche sich in der FPGA-Logik nicht gegenseitig beeinflussen können (z. B. in einem Flugzeug die Steuerung der Beleuchtung und des Triebwerks), wurden Mechanismen zur physikalischen Trennung der einzelnen Bereiche untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass über den Isolation Design Flow (IDF) des FPGA-Herstellers Xilinx ein Verfahren angeboten wird, das eine physikalische Trennung (engl. fence) unterschiedlicher Daten bzw. Algorithmen ermöglicht (vgl. Abb. 2).

Zukünftig wird dies immer wichtiger, um FPGAs im Betrieb mit partieller Rekonfiguration umzuladen und eine gleichzeitige Nutzung unterschiedlicher Anwendungen zu ermöglichen.

Für die Entwicklung kryptographischer Algorithmen oder Protokolle werden fehlerfreie Testdaten (Testvektoren) benötigt. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) begleitet und evaluiert dafür Botan. Es ist für viele Einsatzszenarien und Anwendungen mit erhöhtem Sicherheitsbedarf (z. B. VS-NfD) geeignet.

Für die Evaluation der Algorithmen wurde in Zusammenhang mit der Umsetzung einer universellen Testumgebung auch eine universelle Schnittstelle entwickelt. Mit deren Hilfe können die für die FPGA-Logik entwickelten kryptographischen Algorithmen leicht an das Prozessorsystem angeschlossen werden (vgl. Abb. 3).

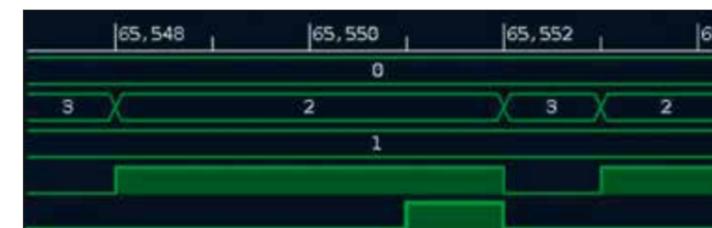


Abb. 4: Signalanalyse im Waveform-Window (Vivado von Xilinx)

In einer einfachen C oder einer Python-Anwendung im Linux Betriebssystem PetaLinux konnten die Daten dann aus der universellen Testumgebung an den jeweiligen Algorithmus übertragen werden.

Partielle Rekonfiguration wurde eingesetzt, um im laufenden Betrieb unterschiedliche Algorithmen in den FPGA laden und testen zu können. In der Entwicklungsumgebung Vivado können über einen speziellen PR-Wizard Bereiche für die partielle Rekonfiguration in der FPGA-Logik reserviert und passende partielle Bitströme erzeugt werden. Diese können anschließend mit dem FPGA-Manager in PetaLinux in den FPGA geladen werden. Mit der Anwendung Bootgen ist darüber hinaus auch eine verschlüsselte Übertragung von Bitströmen möglich.

Die Erzeugung von Algorithmen für die FPGA-Logik erfolgte mit der Programmiersprache VHDL und Vivado sowie dem Software Development Kit (SDK) von Xilinx. Die simulierten Signale eines VHDL-Algorithmus zeigt beispielhaft Abb. 4.

Auf dem UltraZed-SOM Board wurde das TLS 1.3 Protokoll erfolgreich umgesetzt und davon einige Algorithmen zur Beschleunigung in die FPGA-Logik ausgelagert. Unter anderem wurden AES-256-GCM, AES-128-CCM (vgl. Abb. 5) und SHA-3 in VHDL erfolgreich implementiert.

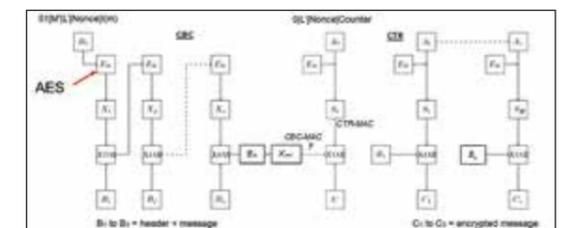


Abb. 5: AES-CCM – Beispiel zum Ablaufplan eines kryptographischen Algorithmus



# 6

## Anhang





Bundesministerium  
der Verteidigung

Bundesministerium  
der Verteidigung  
Postfach 13 28  
53003 Bonn  
Internet: www.bmvg.de

Abteilung Ausrüstung - A III 5  
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 41 66  
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 41 75  
E-Mail: BMVgAIII5@bmvg.bund.de

Abteilung Ausrüstung - A III 6  
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 41 80  
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 41 89  
E-Mail: BMVgAIII6@bmvg.bund.de

Abteilung Cyber / Informationstechnik  
- CIT I 2  
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 2 61 22  
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 3 35 61 21  
E-Mail: BMVgCITI2@bmvg.bund.de

Abteilung Führung Streitkräfte – FüSK III 3  
Tel.: +49 (0) 30 / 2004 - 2 48 38  
Fax: +49 (0) 30 / 2004 - 18 03 68 13  
E-Mail: BMVgFueSKIII3@bmvg.bund.de

Abteilung Führung Streitkräfte – FüSK San 1  
Tel.: +49 (0) 30 / 20 04 - 2 48 54  
fax: +49 (0) 30 / 20 04 - 8 97 00  
E-Mail: BMVgFueSKSan1@bmvg.bund.de

Abteilung Personal - P I 5  
Tel.: +49 (0) 30 / 18 24 - 2 31 57  
Fax: +49 (0) 30 / 18 24 - 8 95 40  
E-Mail: BMVgPI5@bmvg.bund.de

Abteilung Personal - P III 5  
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 33 51  
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 35 30  
E-Mail: BMVgPIII5@bmvg.bund.de



Bundesamt für Ausrüstung, Informations-  
technik und Nutzung der Bundeswehr  
(BAAINBw)  
Ferdinand-Sauerbruch-Straße 1  
56073 Koblenz  
Tel.: +49 (0) 261 / 400 - 0  
Fax: +49 (0) 261 / 400 - 3866  
E-Mail:  
BAAINBwPosteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de



Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Postfach 70 08 22  
22008 Hamburg  
Tel.: +49 (0) 40 / 65 41 - 1  
Fax: +49 (0) 40 / 65 41 - 28 69  
E-Mail: forschung@hsu-hh.de  
Internet: www.hsu-hh.de

Universität München

Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85579 Neubiberg  
Tel.: +49 (0) 89 / 60 04 - 0  
Fax: +49 (0) 89 / 60 04 - 35 60  
E-Mail: info@unibw.de  
Internet: www.unibw.de



Wehrtechnische Dienststelle  
für Schutz- und Sondertechnik  
(WTD 52)  
Oberjettenberg  
83458 Schneizlreuth  
Tel.: +49 (0) 86 51 / 76 82 - 10 01  
Fax: +49 (0) 86 51 / 16 00  
E-Mail: WTD52posteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wtd52



Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge  
und Luftfahrtgerät der Bundeswehr  
(WTD 61)  
Flugplatz  
85077 Manching  
Tel.: +49 (0) 84 59 / 80 - 1  
Fax: +49 (0) 84 59 / 80 - 20 22  
E-Mail: WTD61posteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wtd61



Wehrtechnische Dienststelle  
für Schiffe und Marinewaffen,  
Maritime Technologie und Forschung  
(WTD 71)  
Berliner Straße 115  
24340 Eckernförde  
Tel.: +49 (0) 43 51 / 467 - 0  
Fax: +49 (0) 43 51 / 467 - 120  
E-Mail: WTD71posteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wtd71



Wehrtechnische Dienststelle  
für Informationstechnologie und Elektronik  
(WTD 81)  
Bergstraße 18  
91171 Greiding  
Tel.: +49 (0) 84 63 / 652 - 0  
Fax: +49 (0) 84 63 / 652 - 607  
E-Mail: WTD81posteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wtd81



Wehrtechnische Dienststelle  
für Waffen und Munition  
(WTD 91)  
Am Schießplatz  
49716 Meppen  
Tel.: +49 (0) 59 31 / 43 - 0  
Fax: +49 (0) 59 31 / 43 - 20 91  
E-Mail:  
WTD91posteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wtd91



Wehrwissenschaftliches Institut  
für Schutztechnologien – ABC-Schutz  
(WIS)  
Humboldtstraße 100  
29633 Munster  
Tel.: +49 (0) 51 92 / 136 - 201  
Fax: +49 (0) 51 92 / 136 - 355  
E-Mail: WISPosteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wis



Wehrwissenschaftliches Institut  
für Werk- und Betriebsstoffe  
(WIWeB)  
Institutsweg 1  
85435 Erding  
Tel.: +49 (0) 81 22 / 95 90 - 0  
Fax: +49 (0) 81 22 / 95 90 - 39 02  
E-Mail: WIWeB@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wiweb



Zentrum für Geoinformationswesen  
der Bundeswehr  
Frauenberger Straße 250  
53879 Euskirchen  
Tel.: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 00  
Fax: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 55  
E-Mail: ZGeoBwChdSt@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Zentrum für Militärgeschichte und  
Sozialwissenschaften der Bundeswehr  
Zeppelinstraße 127/128  
14471 Potsdam  
Tel.: +49 (0) 331 / 97 14 - 501  
Fax: +49 (0) 331 / 97 14 - 507  
E-Mail: ZMSBwZentralesManagement@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr  
Neuherbergstraße 11  
80937 München  
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 39 82  
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 39 83  
E-Mail:  
InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Institut für Pharmakologie und Toxikologie  
der Bundeswehr  
Neuherbergstraße 11  
80937 München  
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 29 26  
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 23 33  
E-Mail:  
InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Institut für Radiobiologie der Bundeswehr  
in Verbindung mit der Universität Ulm  
Neuherbergstraße 11  
80937 München  
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 22 51  
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 22 55  
E-Mail:  
InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin  
der Luftwaffe  
Flughafenstraße 1  
51147 Köln  
Tel.: +49 (0) 22 03 / 9 08 - 16 10  
Fax: +49 (0) 22 03 / 9 08 - 16 14  
E-Mail:  
zentrlurmedlwpresseoea@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Schiffahrtmedizinisches Institut  
der Marine  
Kopperpähler Allee 120  
24119 Kronshagen  
Tel.: +49 (0) 431 / 54 09 - 17 01  
Fax: +49 (0) 431 / 54 09 - 17 78  
E-Mail: SchiffMedInstM@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Institut für Präventivmedizin  
der Bundeswehr, Abteilung A  
Aktienstraße 87  
56626 Andernach  
Dienstort:  
Andernacher Straße 100  
56070 Koblenz  
Tel.: +49 (0) 261 / 896 - 7 70 01  
Fax: +49 (0) 261 / 896 - 7 70 99  
E-Mail: InstPraevMedBw@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Deutsch-Französisches  
Forschungsinstitut Saint-Louis  
Postfach 1260  
79547 Weil am Rhein  
5, rue du Général Cassagnou  
F-68300 Saint-Louis  
Tel.: +33 (0) 389 / 69 50 - 00  
Fax: +33 (0) 389 / 69 50 - 02  
E-Mail: isl@isl.eu  
Internet: www.isl.eu



Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
Im Bundeswehrkrankenhaus Berlin  
Scharnhorststraße 13  
10115 Berlin  
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 22 89  
Fax: +49 (0) 30 / 28 41 - 10 43  
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org  
Internet: www.berlin.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Rübenacher Straße 170  
56072 Koblenz  
Tel.: +49 (0) 261 / 281 - 89  
Fax: +49 (0) 261 / 281 - 26 69  
E-Mail: BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org  
Internet: https://koblenz.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Berlin  
Scharnhorststraße 13  
10115 Berlin  
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 2 289  
Fax: +49 (0) 30 / 28 41 - 10 43  
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org  
Internet: https://berlin.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Hamburg  
Lesserstraße 180  
22049 Hamburg  
Tel.: +49 (0) 40 / 69 47 - 0  
Fax: +49 (0) 40 / 69 47 - 1 06 29  
E-Mail: BwKrhsHamburg@bundeswehr.org  
Internet: https://hamburg.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Ulm  
Oberer Eselsberg 40  
89081 Ulm  
Tel.: +49 (0) 731 / 17 10 - 24 00  
Fax: +49 (0) 731 / 17 10 - 24 03  
E-Mail: BwKrhsUlm@bundeswehr.org  
Internet: https://ulm.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Westerstede  
Lange Straße 38  
26655 Westerstede  
Tel.: +49 (0) 44 / 88 50 - 0  
Fax: +49 (0) 261 / 896 - 1 31 99  
E-Mail: BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org  
Internet: https://westerstede.bwkrankenhaus.de



Streitkräfteamt  
Pascalstraße 10 s  
53125 Bonn  
Tel.: +49 (0) 228 / 55 04 - 60 30  
Fax: +49 (0) 228 / 55 04 - 61 09  
E-Mail: skachdst@bundeswehr.org  
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation

 **Fraunhofer**  
VVS  
Fraunhofer-Leistungsbereich  
Verteidigung, Vorbeugung und  
Sicherheit VVS  
Fraunhoferstraße 1  
76131 Karlsruhe  
Tel.: +49 (0) 721 / 60 91 - 210  
Fax: +49 (0) 721 / 60 91 - 413  
E-Mail: [info@iosb.fraunhofer.de](mailto:info@iosb.fraunhofer.de)  
Internet: [www.vvs.fraunhofer.de](http://www.vvs.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
EMI  
Fraunhofer-Institut für  
Kurzzeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Ernst-Zermelo-Straße 4  
79104 Freiburg  
Tel.: +49 (0) 761 / 27 14 - 101  
Fax: +49 (0) 761 / 27 14 - 316  
E-Mail: [info@emi.fraunhofer.de](mailto:info@emi.fraunhofer.de)  
Internet: [www.emi.fraunhofer.de](http://www.emi.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
FHR  
Fraunhofer-Institut für  
Hochfrequenzphysik und  
Radartechnik FHR  
Fraunhoferstraße 20  
53343 Wachtberg  
Tel.: +49 (0) 228 / 94 35 - 227  
Fax: +49 (0) 228 / 94 35 - 627  
E-Mail: [info@fhr.fraunhofer.de](mailto:info@fhr.fraunhofer.de)  
Internet: [www.fhr.fraunhofer.de](http://www.fhr.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
FKIE  
Fraunhofer-Institut für  
Kommunikation, Informations-  
verarbeitung und Ergonomie  
FKIE  
Fraunhoferstraße 20  
53343 Wachtberg  
Tel.: +49 (0) 228 / 94 35 - 103  
Fax: +49 (0) 228 / 94 35 - 685  
E-Mail: [kontakt@fkie.fraunhofer.de](mailto:kontakt@fkie.fraunhofer.de)  
Internet: [www.fkie.fraunhofer.de](http://www.fkie.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
IAF  
Fraunhofer-Institut für  
Angewandte Festkörperphysik  
IAF  
Tullastraße 72  
79108 Freiburg  
Tel.: +49 (0) 761 / 51 59 - 458  
Fax: +49 (0) 761 / 51 59 - 714 58  
E-Mail: [info@iaf.fraunhofer.de](mailto:info@iaf.fraunhofer.de)  
Internet: [www.iaf.fraunhofer.de](http://www.iaf.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
ICT  
Fraunhofer-Institut für  
Chemische Technologie ICT  
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7  
76327 Pfinztal  
Tel.: +49 (0) 721 / 46 40 - 123  
Fax: +49 (0) 721 / 46 40 - 442  
E-Mail: [info@ict.fraunhofer.de](mailto:info@ict.fraunhofer.de)  
Internet: [www.ict.fraunhofer.de](http://www.ict.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
IIS  
Fraunhofer-Institut für  
Integrierte Schaltungen IIS  
Am Wolfsmantel 33  
91058 Erlangen  
Tel.: +49 (0) 91 31 / 776 - 0  
Fax: +49 (0) 91 31 / 776 - 20 19  
E-Mail: [info@iis.fraunhofer.de](mailto:info@iis.fraunhofer.de)  
Internet: [www.iis.fraunhofer.de](http://www.iis.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
INT  
Fraunhofer-Institut für  
Naturwissenschaftlich-  
Technische Trendanalysen INT  
Postfach 14 91  
53864 Euskirchen  
Tel.: +49 (0) 22 51 / 18 - 0  
Fax: +49 (0) 22 51 / 18 - 277  
E-Mail: [info@int.fraunhofer.de](mailto:info@int.fraunhofer.de)  
Internet: [www.int.fraunhofer.de](http://www.int.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
IOSB  
Fraunhofer-Institut für  
Optronik, Systemtechnik und  
Bildauswertung IOSB  
  
Standort Karlsruhe  
Fraunhoferstraße 1  
76131 Karlsruhe  
Tel.: +49 (0) 721 / 60 91 - 210  
Fax: +49 (0) 721 / 60 91 - 413

Standort Ettlingen  
Gutleuthausstraße 1  
76275 Ettlingen  
Tel.: +49 (0) 7243 / 992 - 131  
Fax: +49 (0) 7243 / 992 - 299  
  
E-Mail: [info@iosb.fraunhofer.de](mailto:info@iosb.fraunhofer.de)  
Internet: [www.iosb.fraunhofer.de](http://www.iosb.fraunhofer.de)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Programmkoordination Sicherheitsforschung  
(PK-S)  
Linder Höhe  
51147 Köln  
Tel.: +49 (0) 2203 / 601 - 40 31  
Fax: +49 (0) 2203 / 673 - 40 33  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/sicherheit](http://www.dlr.de/sicherheit)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
DLR FA  
Lilienthalplatz 7  
38108 Braunschweig  
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 23 00  
Fax: +49 (0) 531 / 295 - 28 75  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/fa](http://www.dlr.de/fa)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Flugführung DLR FL  
Lilienthalplatz 7  
38108 Braunschweig  
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 25 00  
Fax: +49 (0) 531 / 295 - 25 50  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/fl](http://www.dlr.de/fl)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und  
Radarsysteme DLR HR  
Oberpfaffenhofen  
82234 Weßling  
Tel.: +49 (0) 81 53 / 28 23 05  
Fax: +49 (0) 81 53 / 28 11 35  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/hr](http://www.dlr.de/hr)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Kommunikation und Navigation DLR KN  
Oberpfaffenhofen  
82234 Weßling  
Tel.: +49 (0) 81 53 / 28 28 11  
Fax: +49 (0) 81 53 / 28 14 42  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/kn](http://www.dlr.de/kn)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Methodik der Fernerkundung DLR MF  
Oberpfaffenhofen  
82234 Weßling  
Tel.: +49 (0) 81 53 / 28 26 68  
Fax: +49 (0) 81 53 / 28 13 37  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/imf](http://www.dlr.de/imf)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Einrichtung für Raumflugbetrieb und  
Astronautentraining DLR RB  
Oberpfaffenhofen  
82234 Weßling  
Tel.: +49 (0) 81 53 / 28 27 00  
Fax: +49 (0) 22 03 / 673 40 33  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/rb](http://www.dlr.de/rb)

 **DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Technische Physik DLR TP  
Pfaffenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 - 773  
Fax: +49 (0) 711 / 68 62 - 788  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/tp](http://www.dlr.de/tp)



**HERAUSGEBER**

Bundesministerium der Verteidigung  
 Unterabteilung A III  
 Fontainengraben 150  
 53123 Bonn

**INHALTLICHE BETREUUNG**

Fraunhofer INT, Euskirchen

**GESTALTUNG UND REALISATION**

Konzeptbüro Schneider, Erfstadt

**DRUCK**

Warlich Druck Meckenheim GmbH, Meckenheim

**STAND**

Mai 2022



**FOTOS**

	Seite	
© Bundeswehr / Carsten Borgmeier; Jane Schmidt; Marc Jeffrey Hinnemann; Michel Baldus	01	DLR, Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Oberpfaffenhofen
© Bundeswehr / Marco Dorow	08	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen
© Bundeswehr / Jana Neumann; Andrea Bienert	09	DLR, Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Fürstenfeldbruck
© Bundeswehr / Maximilian Schulz	10	DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung, Oberpfaffenhofen
© Bundeswehr / Sascha Sent; Christian Timmig	11	DLR, Institut für Technische Physik, Stuttgart
		DLR, Raumflugbetrieb und Astronautentraining, Weßling
© IBM	66	Fraunhofer EMI, Freiburg i. Br.
© Commonwealth of Australia 2020	68	Fraunhofer FHR, Wachtberg
© Polaris Raumflugzeuge GmbH, Bremen	88	Fraunhofer FKIE, Wachtberg
© AeroDesignWorks GmbH, Köln	90	Fraunhofer IAF, Freiburg i. Br.
© National Defense Medical College of the Japan Self Defense Forces Saitama, Japan	107	Fraunhofer ICT, Pfinztal
© Central Readiness Force of the Japan Ground Self Defense Force Tokyo, Japan	107	Fraunhofer IIS, Erlangen
© www.drks.de / Studien-ID: DRKS00021591	114	Fraunhofer INT, Euskirchen
© NATO	128	Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, Ettlingen
© Bundeswehr / Martin Rippl	129	HTV Halbleiter-Test & Vertriebs-GmbH, Bensheim
© Bilddatenbank der Bundeswehr	131	Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg
© GeoInfo-Portal Bw	138	Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
© Atos GmbH	142-143	Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr, München
		Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr, Koblenz
		Institut für Radiobiologie der Bundeswehr, München
		Kommando Heer, Strausberg
		Psychotraumazentrum der Bundeswehr, Berlin
		Schiffahrtmedizinisches Institut der Marine, Kronshagen
		Streitkräfteamt, Hamburg
		Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
		WIS, Munster
		WIWeB, Erding
		WTD 52, Schneizlreuth
		WTD 61, Manching
		WTD 71, Kiel
		WTD 81, Greding
		WTD 91, Meppen
		Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Euskirchen
		Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Fürstenfeldbruck
		Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr, Potsdam
1. Ubootgeschwader Sanitätsdienst, Eckernförde		
Atos Information Technology GmbH, München		
Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr, Koblenz		
Bundesministerium der Verteidigung, Bonn		
Bundeswehrkrankenhaus Berlin		
Bundeswehrkrankenhaus Hamburg		
Bundeswehrkrankenhaus Ulm		
Bundeswehrkrankenhaus Westerstede		
Bundeswehrzentralkrankenhaus Koblenz		
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut, Saint-Louis		
DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig		
DLR, Institut für Flugführung, Braunschweig		