



Bundesministerium  
der Verteidigung

# Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2019

Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte



BUNDESWEHR

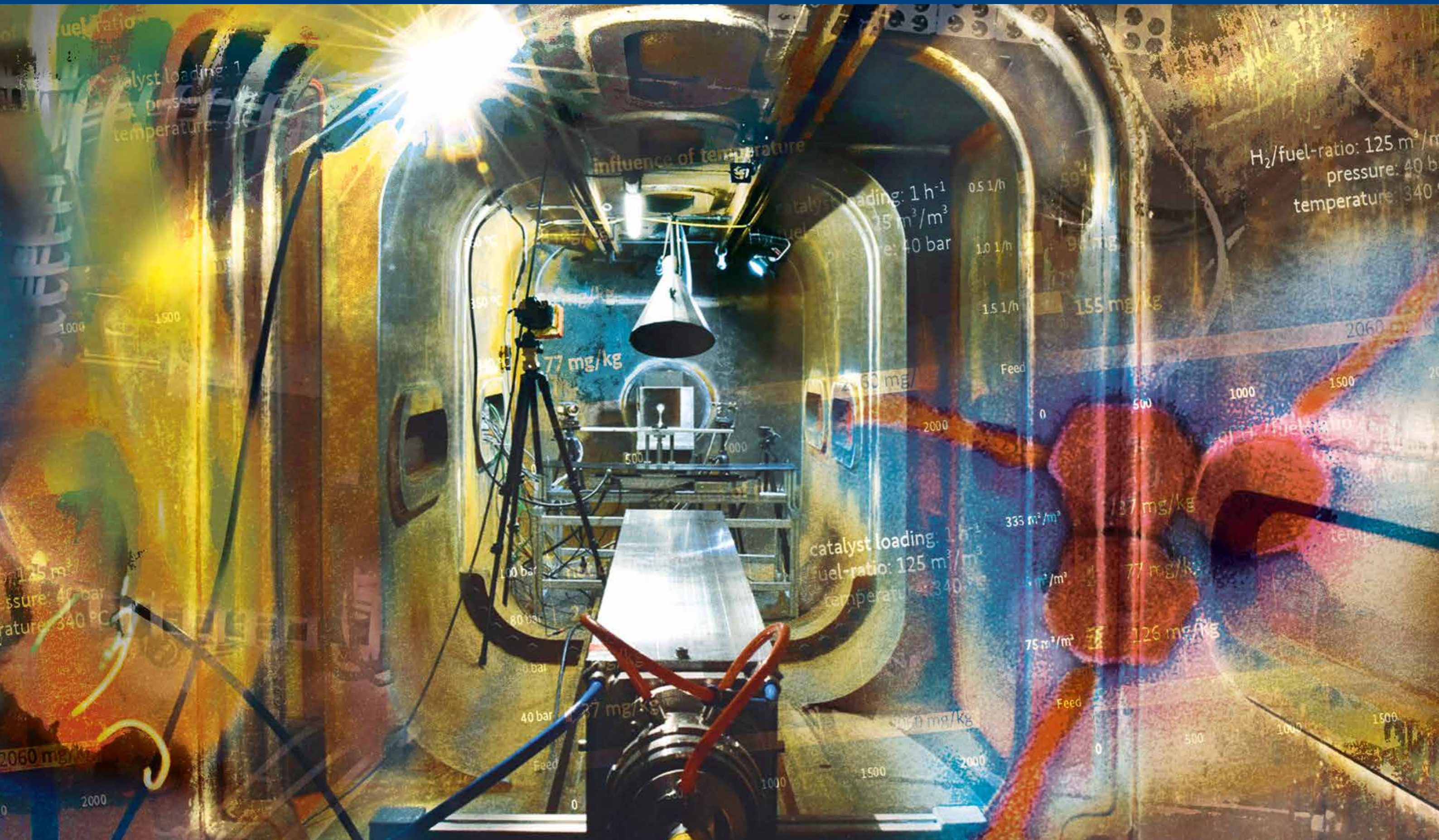
---

## Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2019

Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte

19

---



fuel ratio

catalyst loading: 1

pressure: 40 bar

temperature: 340

influence of temperature

catalyst loading: 1 h<sup>-1</sup>

fuel ratio: 125 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

pressure: 40 bar

H<sub>2</sub>/fuel-ratio: 125 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

pressure: 40 bar

temperature: 340

1000

1500

77 mg/kg

60 mg/kg

155 mg/kg

2060

1000

1500

125 m<sup>3</sup>

pressure: 40 bar

temperature: 340 °C

catalyst loading: 1 h<sup>-1</sup>

fuel ratio: 125 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

temperature: 340 °C

333 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

77 mg/kg

77 mg/kg

75 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

126 mg/kg

2060 mg/kg

2000

40 bar

Feed

0

1000

1500

2000

Feed

0

500

1000

1500



Ministerialdirigent Ralf Schnurr

Unterabteilungsleiter A II und Forschungsbeauftragter  
Bundesministerium der Verteidigung

---

## Wehrwissenschaftliche Forschung für die Streitkräfte

Die sicherheits- und verteidigungspolitischen Herausforderungen Deutschlands, der EU sowie der NATO sind in den zurückliegenden Jahren größer, volatiler und komplexer geworden.

Fortschritte in der Forschung und der Entwicklung neuer Technologien, wie z. B. in der Digitalisierung, im Bereich der Künstlichen Intelligenz, unbemannter Systeme, der Hyperschalltechnik, der Biotechnologien und der Cyber-Instrumente werden grundlegende Auswirkungen auf die sicherheits- und verteidigungsrelevanten Systeme der Zukunft haben. Damit sind auch Fragen nach dem möglichen Destabilisierungspotenzial und der Völkerrechtskonformität des Einsatzes neuer Technologien in Waffensystemen verbunden.

Auch die zivile und militärische Nutzung des Welt- raums wird vor dem Hintergrund der sicherheits- politischen Veränderungen künftig an sicherheits- und verteidigungspolitischer Bedeutung weiter gewinnen.

Die Grundaufstellung der Bundeswehr enthält Fähigkeiten, Kräfte und Mittel für folgende Auf- gaben:

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

Diese Aufgaben sind jederzeit und gleichzeitig wahrzunehmen.

---

Alle Aufgaben der Bundeswehr sind übergreifend durch das Zusammenwirken aller Organisations- bereiche zu erfüllen. Dies kommt auch bei den Forschungsbereichen der

- der Wehrtechnischen Forschung,
- der Wehrmedizinischen und Wehrpsychologi- schen Forschung,
- der Militärgeschichtlichen und Sozialwissen- schaftlichen Forschung,
- der Geowissenschaftlichen Forschung und
- der Cyber / Informationstechnischen Forschung zum Ausdruck, die im Folgenden an ausgewählten Beispielen vorgestellt werden.



Ralf Schnurr



*Durch Anklicken direkt zum Artikel gelangen*

# 19

<b>Vorwort</b>	<b>06 Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte</b>	
<b>Teil 1</b>	<b>13 Wehrtechnische Forschung</b>	
	14 Softwareentwicklung für kurzzeitdynamische Simulationsanwendungen	52 Verträglichkeit von Elastomeren mit neuartigen synthetischen Flugturbinenkraftstoffen
	16 Skalierungseffekte bei Laserimpakt	54 Herausforderungen für die nächste Generation Kampfflugzeuge – aktive Strömungsstabilisierung in einem stark konturierten Triebwerkseinlauf
	18 Multifunktionale kohärente Radarverbünde	56 Sichere Führung durch ad-hoc-Kommunikation mit der Kleinen Entfaltbaren Antenne (KEAN)
	20 Technik, die den Soldaten versteht: Das Diagnosewerkzeug „RASMUS“ erfasst und bewertet Nutzerzustände in Echtzeit	58 Datenbasierte Optimierung innerhalb von Hybriden Szenarien zur Energiesicherheit – integriertes Reachback Informations System IRIS
	22 Fortschrittliche Analyse von Binärcode	60 Effiziente Nutzung der additiven Fertigung zur Ersatzteilversorgung der Streitkräfte
	24 Referenztestaufbau für die HPEM-Normenentwicklung	62 Kontaktfreie Bestimmung der kritischen Einkoppelfrequenzen von elektrischen Geräten
	26 Analyse der internationalen wehrtechnischen Forschung und Technologie zur Unterstützung langfristiger F&T-Planung	64 Visualisierung elektrorheologischer Fluide
	28 Millimeterwellen-Komponenten für neuartige militärische Kommunikationssysteme und taktische Datenlinks	66 Aufbau einer Prüfumgebung zur Strahlungsqualifizierung von Wehrmaterial
	30 Neue Methoden der Abbrandcharakterisierung zur Entwicklung leistungsfähiger Raketentreibstoffe	68 Hydrierende Entschwefelung von Dieselkraftstoff
	32 Alternative Energieversorgung für stationäre und mobile Anwendungen im Einsatz	70 Bundeswehr-Liegenschaften energieeffizient betreiben durch automatisierte Analyse von Betriebsdaten
	34 Innovative Methoden in der Zulassung Militärischer Luftfahrzeuge	72 Auslegung eines modernen Turbostrahltriebwerks
	36 Automatisierter Lufttransport in niedriger Flughöhe und dessen Technologie-Demonstration	74 Automatische Zielerkennung in der unbemannten Minenjagd
	38 Multimodales Hubschraubercockpit – Flugführung mit Virtual Reality und 3D-Audio	76 KI-Gestützte Bildauswertung für die Bundeswehr
	40 TRAILER: Detektion und Abwehr von Bedrohungen aus der Luft	78 VR und AR Analyse für die Simulations- und Testumgebung der Bundeswehr (SuTBw)
	42 Änderungsdetektion mit großen Synthetic Apertur Radar (SAR)-Bildserien	80 Entwicklung reaktiver Struktur-Materialien in deutsch-kanadischer Kooperation
	44 Digitalisierung in MRO – AR-unterstützte Strukturüberwachung und Schadensanalyse	
	46 Additiver 3D-Druck von Treibladungen	
	48 Resilienz in Produktion und Logistik durch Blockchain	
	50 Shared Information Space Management	



## Teil 2

- 83 Wehrmedizinische und Wehrpsychologische Forschung**
- 84** Isolierung und Charakterisierung von Bakteriophagen zur Therapie multiantibiotikaresistenter Bakterien
- 86** Identifizierung langlebiger Protein-Biomarker: Neue Methoden zum forensischen Nachweis der Vergiftung mit chemischen Kampfstoffen
- 88** Anstrengungsbedingter Hitzestress in Kälte – ein scheinbares Paradoxon mit Auswirkungen auf die Gesundheit und die Leistung
- 90** Die Hochdurchsatzdiagnostik der Akuten Strahlenkrankheit kann durch Verwendung strahleninduzierter Genexpressionsänderungen entscheidend gesteigert werden
- 92** Einbezug Angehöriger zur schnellen Diagnostik und Behandlung von psychisch einsatzgeschädigten Soldatinnen und Soldaten
- 94** Psychische Reaktionen der Rettungskräfte auf den Terroranschlag in Berlin Breitscheidplatz und Optimierung der Einsatzvor- und Einsatznachbereitung
- 96** Arbeitsplatzanalyse im Waffensystem Eurofighter – ein Beitrag zur Human System Optimization
- 98** Wie wirken sich Ausdauertraining und/oder wiederholte Hyperoxie beim Sauerstofftauchen auf den Immunstatus aus?
- 100** PTmHBP – Praktikabilitätstestung der magistralen Herstellung von Bakteriophagen zur Therapie septischer Infektionen an der unteren Extremität (PhagoFlow)
- 102** Nutzung von 3D-Druck-Technologien in der simulationsgestützten Vermittlung neurotraumatologischer Kenntnisse für Einsatzchirurgen
- 104** Pilotstudie zur Evaluierung der Rolle von zirkulierenden zellabstammenden Extrazellulären Vesikeln im Rahmen des Polytraumas: Entwicklung eines Bluttests zur Erkennung innerer Verletzungen



## Teil 3

**107 Militärgeschichtliche und Sozialwissenschaftliche Forschung**

- 108** Inklusion von Schwerbehinderten und diesen gleichgestellten Behinderten in der Bundeswehr

## Teil 4

**111 Geowissenschaftliche Forschung**

- 112** Biometeorologische Gefährdungslage
- 114** Land-/Seeübergang – kombinierte Nutzung von land- und seebezogenen GeoInfo-Daten

## Teil 5

**117 Forschung Cyber / Informationstechnik**

- 118** Erzeugung eines gläsernen Gefechtsfeldes zur Unterstützung dynamischer Operationen (Forschungsstudie „ErzUntGlas“)
- 120** Interoperables Cloud Computing (IOCC)

## Teil 6

**123 Anhang**

- 124** Adressen und Kontakte
- 130** Impressum

# 1

## Wehrtechnische Forschung

Das erforderliche breite Fähigkeitsspektrum 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 Erkenntnisse der zivilen Forschung aufgegriffen und technologische Entwicklungen hinsichtlich ihrer zukünftigen militärischen Verwendbarkeit bzw. ihres Bedrohungspotenzials analysiert.

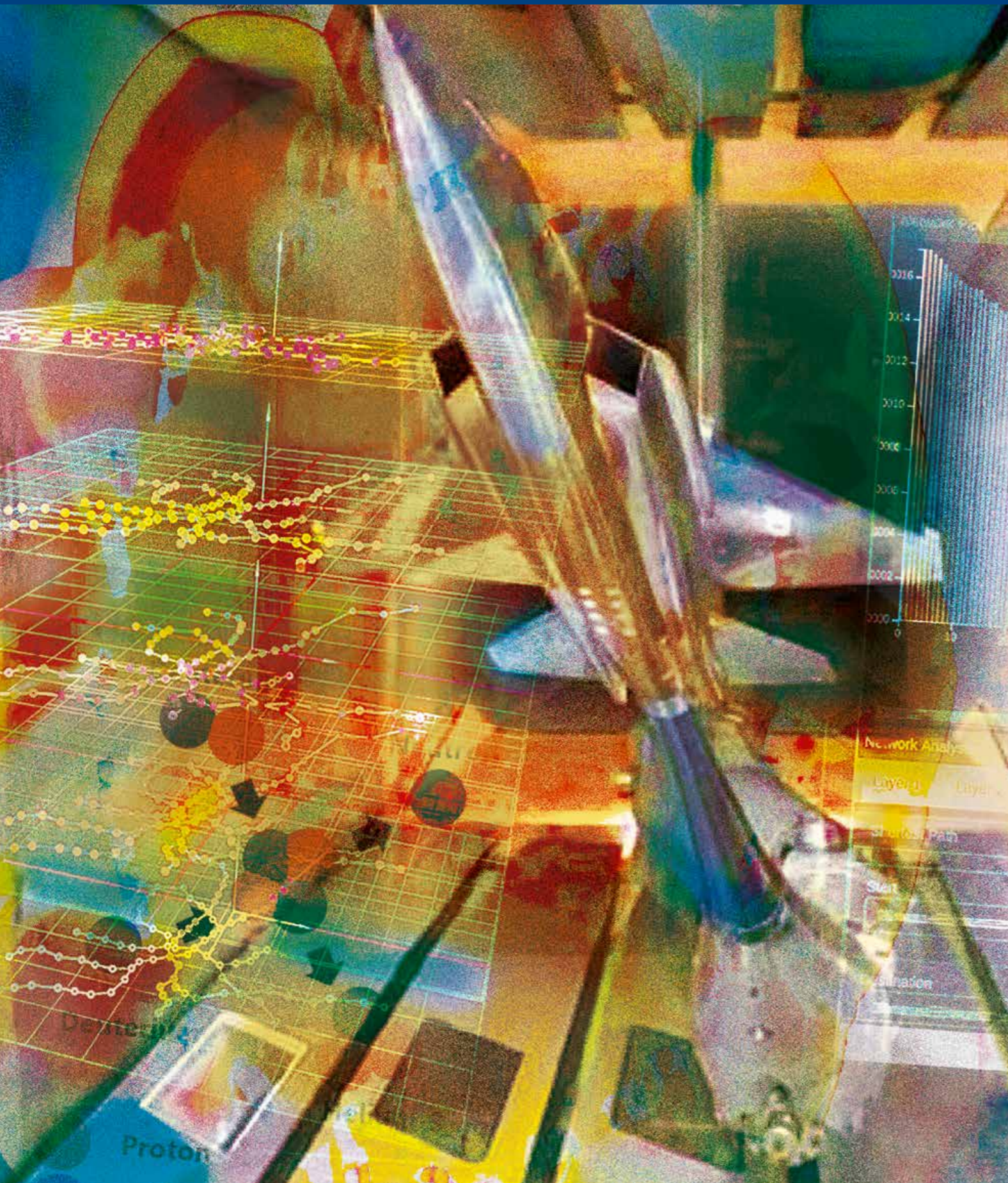
Zur Weiterentwicklung der Fähigkeiten der Bundeswehr werden strategische Interessensfelder identifiziert und relevante Zukunftstechnologien zeitgerecht bis zur Produktnähe vorangetrieben. Dabei ist die eigene technologische Souveränität auf dem Gebiet nationaler Schlüsseltechnologien zu erhalten und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

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

Die Durchführung Wehrtechnischer 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 2019 aus diesen drei Durchführungsebenen dargestellt.





Dr.-Ing. Arno Klomfass  
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Dr. Pascal Matura  
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

## Softwareentwicklung für kurzezeitdynamische Simulationsanwendungen

**Simulationsanwendungen überführen wissenschaftliches Verständnis in anwendbare Modelle. In Verbindung mit dem in Materialbibliotheken dokumentierten Modellparametern stellen sie einen wesentlichen Wissensspeicher dar. Kurzezeitdynamische Simulationsanwendungen für Explosions- und Impakt ereignisse befähigen zur detaillierten Analyse von Wirkmechanismen und der Auslegung von Schutzmaßnahmen.**

Mit dem APOLLO Blastsimulator und dem SOPHIA Finite-Elemente-Solver werden am Fraunhofer EMI moderne und leistungsfähige Softwarewerkzeuge entwickelt, welche physikalisch basierte Simulationen von Explosions- und Impaktprozessen ermöglichen. Diese Werkzeuge sind für die Anforderungen wehrtechnischer Forschung und Entwicklung maßgeschneidert; sie gehören seit ca. 20 Jahren zu unserem Portfolio und werden in Lizenz auch bei Kunden und Partnern eingesetzt.

Trotz eines dynamisch wachsenden Marktes kommerzieller Simulationssoftwarelösungen bestehen gute Gründe für eine nachhaltig angelegte Eigenentwicklung derartiger Simulationssoftware:

- Die Anforderungen für kurzezeitphysikalische Simulationsanwendungen können durch Spezialisierung bedarfsgerecht realisiert werden. Demgegenüber ist die Entwicklung kommerzieller Simulationssoftware marktgetrieben und adressiert in erster Linie ein breites Anwendungsspektrum.
- Eine eigene Methoden- und Softwareentwicklung erlaubt es, neue physikalische Modelle und mathematische Verfah-

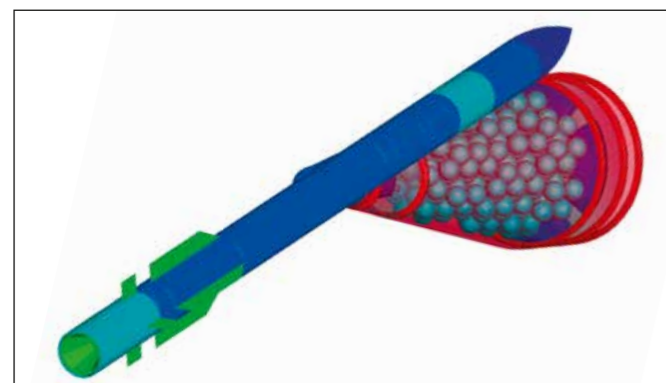


Abb. 1: Trefferwirkungsanalyse für die Raketenabwehr: Modell für eine Impaktsimulation mit SOPHIA

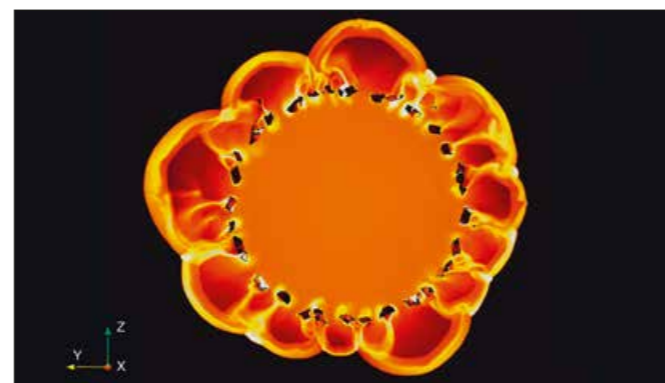


Abb. 2: Fragmentierung eines sprengstoffgefüllten Rohrsegments und Entstehung der Druckwelle bei der Detonation: Co-Simulation mit APOLLO Blastsimulator und SOPHIA

Dr.-Ing. Martin Sauer  
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Dr. Michel May  
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

ren uneingeschränkt entwickeln und nutzen zu können. Demgegenüber sind die kommerziellen Softwareprodukte Black Boxes, die nur in begrenztem Umfang Schnittstellen zur Implementierung eigener Ansätze offerieren.

- Die Abhängigkeit von ausländischen Softwarehäusern wird reduziert und damit das Risiko, dass die zukünftige Verfügbarkeit wehrtechnisch relevanter Softwareprodukte durch Exportbeschränkungen beeinträchtigt werden kann.
- Die anfallenden, nutzungsabhängigen Lizenzkosten limitieren die Nutzung kommerzieller Software heute mehr als die Kosten für leistungsfähige Hardware. Das Leistungspotential kommerzieller Software kann dadurch nicht immer ausgeschöpft werden.

Aus ähnlichen Gründen werden wehrtechnisch relevante Simulationswerkzeuge in den USA überwiegend von den großen National Labs entwickelt.

Unser Ziel ist es Simulationswerkzeuge bereitzustellen, die sowohl für die Forschung, wie auch für die routinemäßige Anwendung geeignet sind. Dazu werden bedarfsgerechte Modellierungsoptionen, Simulationsverfahren mit hoher Effizienz (hohe Genauigkeit bei geringem Ressourcenbedarf) und eine anwenderfreundliche Ausgestaltung realisiert. Eine nachhaltige Entwicklung wird auch mit Hinblick auf die investierten

Mittel angestrebt. Wo dies möglich und sinnvoll ist, greifen wir dazu auch auf verfügbare bestehende Lösungen zurück, wie z. B. bei Visualisierungstools.

Die wichtigste Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung ist das Zusammenführen der Erfahrungen aus den Bereichen der praktischen Anwendung der Simulationswerkzeuge, der physikalischen Modellierung, der mathematischen Methoden und des Softwareengineerings. Die Entwicklung der instituts-eigenen Software folgt einer langfristig angelegten Strategie, wobei Anforderungen aus aktuellen Projekten kurzfristig berücksichtigt werden. So können neue Leistungsmerkmale bedarfsgerecht entwickelt und etabliert werden.

Die Softwaretools APOLLO Blastsimulator und SOPHIA ermöglichen es, Explosionslasten vorhersagefähig zu ermitteln und die strukturdynamischen Auswirkungen von Explosionen und Impaktbelastungen auf Anlagen, Fahrzeuge und Bauwerke zu analysieren und zu bewerten. Dazu können diese Tools sowohl sequentiell, wie auch als Co-Simulation, d. h. fluid-struktur-gekoppelt, angewendet werden. Der APOLLO Blastsimulator kommt darüber hinaus auch als Modul von Expertentools für Risikobewertungen zum Einsatz, z. B. für die zivile Kampfmittelräumung.

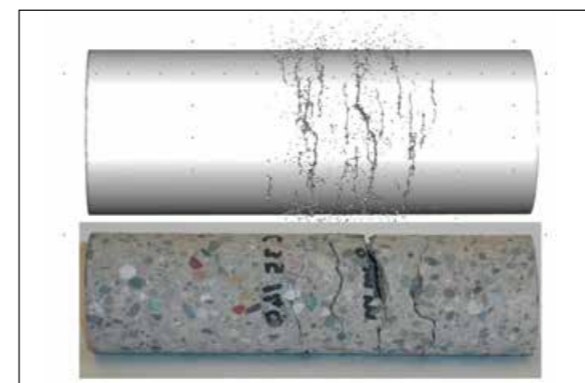


Abb. 3: Rissbildung in Beton unter Impaktbedingungen: Ergebnis einer SOPHIA Simulation und Experiment

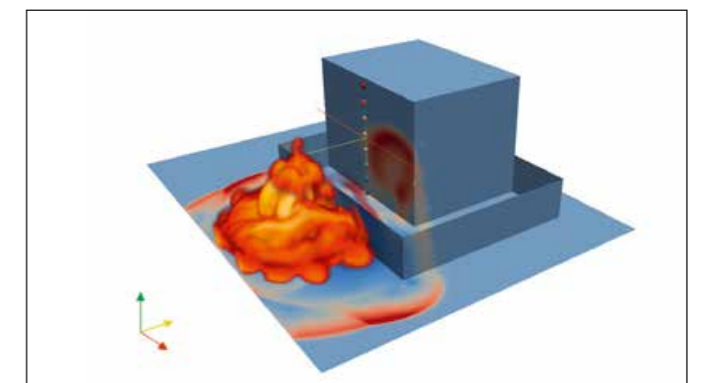


Abb. 4: Simulation der Explosionseinwirkung mit dem APOLLO Blastsimulator für ein Gebäude mit Schutzmauer

Dr. Jens Osterholz  
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Martin Lück  
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

## Skalierungseffekte bei Laserimpakt

Das Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI hat sein 2013 vorgestelltes Speziallabor für Laserwirkung um einen leistungsstarken Hochenergielaser erweitert. Damit stehen zukünftig die experimentellen Fähigkeiten zur Verfügung, um Skalierungseffekte bei Laserimpakt bis zu einer Leistung von 120 kW untersuchen zu können. Die Grundlagen zum Verständnis des Werkstoffverhaltens bei Laserimpakt können substantiell erweitert werden.

In Zentrum der Erweiterung steht der neu installierte Multimode-Faserlaser für Laboruntersuchungen mit kurzen Abständen zu den Effekten von hochintensiver Laserstrahlung. Es handelt sich um einen von der Fa. IPG, Burbach, gebauten Industrielaser für Daueranwendung, dessen optische Ausgangsleistung bis zu 120 kW einstellbar ist. Der Hochenergielaser emittiert bei einer Wellenlänge von 1,07  $\mu\text{m}$ . Er kann mit einem optischen Faserkoppler für eine Arbeitsfaser betrieben werden. Zusätzlich können mit der Feedingfaser auch ohne Hinzuschaltung des Kopplers Versuche durchgeführt werden. Besonders zu erwähnen ist die kompakte Ausführung der Lasereinheit mit Abmessungen von 3,6 m x 1,8 m x 1,0 m. Es konnte bereits gezeigt werden, dass ein Betrieb mit einer Generator-basierten Stromversorgung und damit auch die Durchführung von Versuchskampagnen an verschiedenen Orten mit dem robusten Laser möglich sind.

Der bisher eingesetzte Faserlaser, der zukünftig für Untersuchungen in einem zusätzlichen Laserlabor zur Verfügung steht, war auf eine Ausgangsleistung von 10 kW begrenzt. Entsprechend erweitert sich der untersuchbare Leistungs-



Abb. 1: Industrielaser mit einer Leistung von bis zu 120 kW

Dr. Matthias Wickert  
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI  
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

bereich substantiell um mehr als eine Größenordnung. Die Festlegung der Ausgangsleistung des neuen Lasers orientierte sich an der Erwartung von Experten für Laserwaffensysteme, die eine Einführung von Laserwaffen mit einer Leistung von deutlich über 100 kW ab der Mitte dieses Jahrzehnts erwarten. Ein erster Demonstrator einer Laserwaffe dieser Leistungsklasse wird derzeit beispielsweise von der US Navy vorbereitet.

Bei ersten Versuchen mit dem neuen Lasersystem am EMI konnte bereits verifiziert werden, dass Perforationsdauern für Bleche aus Stahl und Aluminium, die bei Leistungen bis 10 kW noch deutlich voneinander abweichen, bei hohen Strahlleistungen nicht mehr starke Unterschiede aufweisen sondern sich angleichen. In engem Zusammenhang mit derartigen Skalierungseffekten stehen wissenschaftliche Fragen zu thermischen Effekten und thermomechanischem Werkstoffverhalten. Mit der neuen Laborfähigkeit lassen sich insbesondere Phänomene von Materialversagen im Hinblick auf Temperaturabhängigkeit und Aufheizratenabhängigkeit untersuchen. Die neuartigen Versuchsmöglichkeiten erweitern die Basis von Versuchsdaten erheblich, die dann weiter für die Modellbildung für die numerische Simulation zur Verfügung steht. Denn durch den Laser lassen sich nun innerhalb kürzester Zeiten sehr hohe Energieeinträge in die Zielwerkstoffe erreichen, gegenüber denen die Wärmediffusionsprozesse verhältnismäßig langsam sind.

Solche Grundlagenuntersuchungen zum Verständnis der Effekte von Hochenergielaserstrahlung stehen im Mittelpunkt des Interesses, um Gefährdungen einordnen und geeignete Maßnahmen zum Schutz der Soldatinnen und Soldaten ergreifen zu können. Denn es ist davon auszugehen, dass zukünftig Laserwaffen auch sehr hoher Leistung zum Einsatz kommen werden.



Abb. 2: Innenansicht Untersuchungskammer Laserwirkung.

Dr. Patrick Berens  
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR  
Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

Dr. Stephan Stanko  
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR  
Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

## Multifunktionale kohärente Radarverbünde

**Durch die Erschließung höherer Frequenzbereiche lassen sich bildgebende Radarsysteme miniaturisiert und kostengünstig aufbauen. Der Betrieb mehrerer derartiger Systeme kooperativ im Verbund führt zu verbesserten Aufklärungsfähigkeiten, einer reduzierten Verwundbarkeit sowie zusätzlichen Einsatzmöglichkeiten.**

In den letzten Jahrzehnten wurden bildgebende Radarsensoren entwickelt, die basierend auf dem SAR-Prinzip hochaufgelöste Abbildungen einer Szene erzeugen können. Diese agieren je nach Anwendungsfall luft- oder raumgestützt mit Wellenlängen im Bereich weniger Zentimeter, wie bspw. mit 3 cm im X-Band. Derartige Sensoren sind in der Regel hochkomplex, leistungshungrig und großvolumig, so dass ihr Betrieb den Einsatz eines größeren Trägers erfordert.

Dank der Entwicklung neuester Komponenten können SAR-Systeme heute auch für höhere Frequenzen aufgebaut werden. Beschränkt man sich dabei gleichzeitig auf die grundlegenden Fähigkeiten, sind kostengünstige Mini-Sensoren realisierbar. So können Sensoren im W-Band, die bei Wellenlängen um 3,2 mm arbeiten, auf Drohnen der Klasse C4 betrieben werden.

Da der Aufbau und der Betrieb eines herkömmlichen Systems im X-Band mit erheblichem Aufwand verbunden sind, wird dieses in der Regel stand-alone rein monostatisch betrieben. Für die kostengünstige Kombination aus W-Band-Sensor und Drohne bietet es sich hingegen an, die Performance durch den

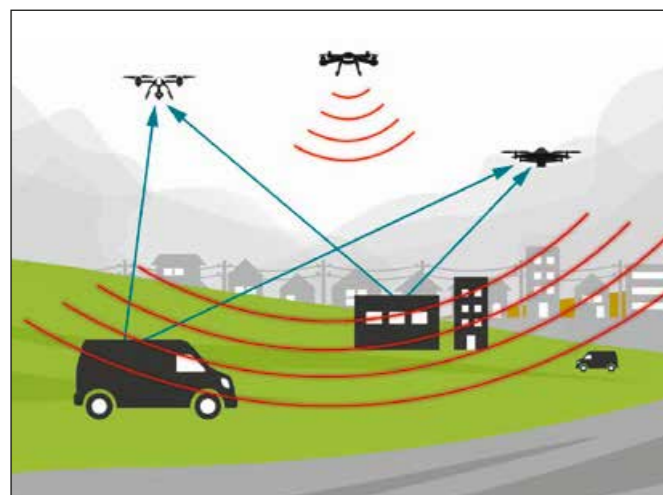


Abb. 1: Leichte, luftgestützte Radarsensoren, die im Verbund miteinander operieren, bieten Vorteile für die Aufklärung. Die Synchronisierung erfolgt mit Hilfe des direkten Signals

Einsatz mehrerer derartiger Teilsysteme, wie in Abb. 1 dargestellt, zu verbessern. Dabei ergeben sich diverse Vorteile:

1. Der kooperative Betrieb unterschiedlicher Teilsysteme ermöglicht bi- oder multistatische Aufnahmen, die einen Informationsgewinn beinhalten, da andere Aspekte der abgebildeten Szenen zutage treten.
2. Durch die inhärente Verteilung der Gesamtfähigkeit auf mehrere Drohnen wird die Robustheit verbessert und die Verwundbarkeit reduziert.
3. Es bietet eine leichte Skalierbarkeit, bei der durch die Anzahl der eingesetzten Sensoren und Drohnen z. B. die aufgeklärte Fläche, die Häufigkeit der Beobachtungen oder die Diversität der Beobachtungsrichtungen an konkrete Bedürfnisse angepasst werden kann.

Ein wesentlicher Aspekt der Hardwareentwicklung für ein drohnengetragenes multikohärentes Radarnetzwerk ist die Synchronisierung der Sendesysteme im Millimeterwellenbereich. Um das Gesamtsystem möglichst klein und leicht zu halten, wird der Frequenzbereich von etwa 94 GHz gewählt. Die Wahl einer frequenzmodulierten Signalform dient der Energieeffizienz. Beides sind notwendige Nebenbedingungen für den Betrieb auf einer Drohne. Die geringe Wellenlänge verursacht dabei besondere Herausforderungen an die Techniken, denn es müssen verschiedene abgesetzte Radarsensoren so phasenstarr synchronisiert werden, dass ein hochauflösender SAR-Betrieb durch die Prozessierung gewährleistet werden kann.

Um hohe Abstraten der Zwischenfrequenz zu vermeiden, müssen diverse Synchronisierungsvorgänge bereits auf Hardwareebene in Echtzeit durchgeführt werden. Damit wird sicher-

gestellt, dass sowohl das durch den sekundären Empfänger empfangene direkte wie auch das vom zu vermessenden Objekt reflektierte indirekte Signal im schmalen Zwischenfrequenzbandbereich zu liegen kommen, um dort abgetastet zu werden. Die Synchronisierung muss kabellos erfolgen, gleichzeitig aber im Millimeterwellenbereich phasenstabil sein. Hierfür ist die Entwicklung neuer Techniken erforderlich.

Für die Bildrekonstruktion bei unterschiedlichen Flugkonstellationen bietet sich die Rekonstruktion im Zeitbereich an. Aufgrund der Nutzung von Drohnen als Sensorträger in Verbindung mit leichten und kostengünstigen Systemen zur Positions- und Lagebestimmung, verbleiben unbekannte Laufzeiten des Radarsignals, die durch die Verwendung geeigneter Verfahren zur Autofokussierung kompensiert werden. Darüber hinaus weist aber auch das direkte Signal, welches als Basis der Synchronisation auf Hardwareebene dient, einen unbekanntes Laufzeitfehler auf, der im Rahmen der Autofokussierung als zusätzlicher Parameter zu ermitteln und zu korrigieren ist.

Für eine operationelle Nutzung sind weitere Fragestellungen zu behandeln. Da der Einsatz von Zeitbereichsverfahren einen hohen Rechenaufwand mit sich bringt, müssen erprobte Verfahren parallelisiert oder schnelle Verfahren implementiert werden, so dass akzeptable Laufzeiten erzielt werden.

Dr. Jessica Schwarz  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation,  
 Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Oliver Witt  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation,  
 Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE  
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

## Technik, die den Soldaten versteht: Das Diagnosewerkzeug „RASMUS“ erfasst und bewertet Nutzerzustände in Echtzeit

**Menschliche Fehler können in sicherheitskritischen Bereichen schwerwiegende Konsequenzen haben. Um sie zu vermeiden, wurde in der Abteilung „Mensch-Maschine-Systeme“ des Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie, FKIE ein Diagnosewerkzeug entwickelt, das den mentalen Zustand des Soldaten bewertet und es technischen Systemen ermöglicht, Soldaten zielgerichtet und bedarfsgerecht bei der Erfüllung ihrer Aufgaben zu unterstützen.**

Durch technische Innovationen und zunehmende Automatisierung und Vernetzung entstehen in der Bundeswehr komplexe Gesamtsysteme, in denen der Soldat und das technische System reibungslos interagieren müssen. Meist wird dabei auf die Fähigkeit der Operateure vertraut, die Leistung und Stabilität des Mensch-Maschine-Systems zu erhalten und sicherzustellen, dass auch bei technischem Versagen keine Gefahr für Mensch und Umwelt entsteht. Problematisch wird es jedoch dann, wenn der Zustand des Soldaten, zum Beispiel aufgrund von Überlastung, Übermüdung oder inadäquatem Situationsbewusstsein, selbst ein Problem für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems darstellt. Idealerweise sollte daher auch die Maschine in der Lage sein, den Soldaten in kritischen Situationen so zu unterstützen, dass menschliches Fehlverhalten möglichst vermieden wird.

Um zu bestimmen, wann der Operateur Unterstützung benötigt und welche Art von Unterstützung geeignet ist, ist es erforderlich, den mentalen Zustand sowie der beeinflussenden Faktoren während der Aufgabenbearbeitung zu diagnostizieren. Am Fraunhofer FKIE wurde mit RASMUS (Real-time Assess-



Abb. 1: Konzept des multidimensionalen Nutzerzustands

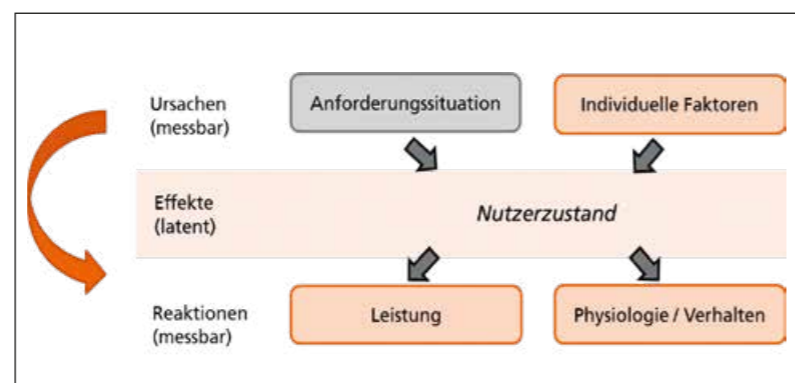


Abb. 2: Komponenten zur multifaktoriellen Bewertung des Nutzerzustands

ment of Multidimensional User State) ein innovatives Diagnosewerkzeug entwickelt, das den aktuellen mentalen Zustand des Operateurs in Echtzeit erfasst und bewertet.

Die Diagnose basiert auf einem ganzheitlichen Nutzerzustandsmodell, das im Unterschied zu bisherigen Diagnoseansätzen eine multidimensionale Betrachtung und eine multifaktorielle Bewertung des Nutzerzustands vorsieht. Konkret werden bei der Bewertung sechs verschiedene Dimensionen des Benutzerszustands unterschieden, die nachweislich Einfluss auf die menschliche Leistungsfähigkeit haben: Beanspruchung, Motivation, Situationsbewusstsein, Aufmerksamkeit, Müdigkeit und der emotionale Zustand (siehe Abb. 1). Die simultane Erfassung unterschiedlicher Zustandsdimensionen bietet die Möglichkeit, auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Nutzerzuständen zu berücksichtigen. Da einzelne Diagnosemaße aufgrund von Störeinflüssen keine ausreichend robuste und valide Erfassung mentaler Zustände zulassen, erfolgt die Bewertung des Nutzerzustands in RASMUS multifaktoriell (siehe Abb. 2). Physiologische und verhaltensbasierte Maße (z. B. Pupillenweite, Herzrate, Gesichtsausdruck) werden dabei mit Merkmalen der Anforderungssituation (z. B. Beschaffenheit der Aufgabe, Umgebungsbedingungen) und individuellen Einflussfaktoren (z. B. Erfahrung, Fähigkeiten) kombiniert. Auf diese Weise sind eine umfassende Diagnose von Nutzerzuständen und eine Analyse potenzieller Ursachen für kritische Zustände möglich, die eine zielgerichtete Auswahl und Anwendung von Unterstützungsstrategien bereit stellt.

Exemplarisch wurde RASMUS für den Anwendungsbereich Anti-Air-Warfare (AAW) bei der Marine und drei ausgewählte Problemzustände (hohe Beanspruchung, passive aufgaben-

bezogene Müdigkeit sowie eine falsche Aufmerksamkeitsverteilung) umgesetzt und validiert (siehe Abb. 3). Das Diagnosekonzept ist jedoch generisch und lässt sich prinzipiell auf unterschiedliche Domänen anwenden.

Die erfolgreiche Umsetzung des Diagnosekonzepts und die bestätigte Validität der Diagnoseergebnisse von RASMUS ermöglichen es, die Echtzeitdiagnose künftig als Grundlage für diverse Anwendungsfelder heranzuziehen. Einsatzmöglichkeiten liegen insbesondere in der dynamischen Auswahl und Konfiguration von Unterstützungsstrategien in adaptiven militärischen Einsatzsystemen, im Bereich der Usability-Bewertung sowie in Training und Ausbildung von Soldaten, z. B. um gewünschte Trainingszustände gezielt hervorzurufen oder den Trainingserfolg zu bewerten.



Abb. 3: Demonstrator mit Brustgurt (links) und Eyetracker (unterhalb des Monitors) zur Nutzerzustandsdiagnose

## Fortschrittliche Analyse von Binärcode

**Betreiber von vernetzten Systemen sehen sich einer ungebrochenen Flut von Angriffen ausgesetzt. Die Angreifer verwenden dabei vielfältige Arten von Schadsoftware. Um die eigenen Systeme vor solcher Schadsoftware schützen zu können, ist es für Analysten essenziell, schnell und zuverlässig Schadsoftware analysieren zu können. Da Schadsoftware üblicherweise nur in einer Binärrepräsentation vorliegt und die Angreifer gezielt versuchen Analysen zu erschweren, stellen sich hier verschiedene interessante Herausforderungen. Um Cyberabwehr-Spezialisten trotz dieser Herausforderungen qualitativ hochwertige und skalierbare Methoden und Werkzeuge an die Hand geben zu können, erforschen Mitarbeiter bei Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie, FKIE das Themenfeld Dekompilierung.**

Seit mehreren Jahren forschen Wissenschaftler beim Fraunhofer FKIE zur Thematik Dekompilierung. Ziel der Arbeiten ist es, nur in Binärrepräsentation vorliegende Softwareproben qualitativ hochwertig, schnell und skalierbar analysieren zu können. Dies ist insbesondere im Kontext von Cyberangriffen durch Malware oder Firmware wichtig, kann aber auch zur Analyse gutartiger Softwareproben eingesetzt werden.

Durch eine niedrige Zugangsschwelle zur Softwareentwicklung werden täglich immer mehr unbekannte Softwareproben identifiziert. Insbesondere im Bereich der Cybersicherheit entsteht damit ein zunehmender Arbeitsaufwand, der mit den Ansprüchen an eine eingehende Softwareanalyse und der wachsenden Anzahl an unbekannter Software steigt. In den meisten Fällen ist der Quellcode dabei nicht zugänglich, wodurch die Analyse nur anhand bestehender Binärdateien erfolgen kann. Grundlage hierbei bildet eine maschinenspezifische Repräsentationsform ohne jegliche Metainformationen, welche den Aufwand eines Analysten stark erhöht. Darüber hinaus unterliegen solche Repräsentationen starken Optimierungen in Hinsicht auf Laufzeit und andere Faktoren.

```

int test(int x)
{
    return x % 10;
}
    
```

mov ecx, edi	sub edx, eax
movsx rax, ecx	mov eax, edx
imul rax, rax, 0x6666667	sal eax, 2
shr rax, 32	add eax, edx
mov edx, eax	add eax, eax
sar edx, 2	sub ecx, eax
mov eax, ecx	mov edx, edx
sar eax, 31	mov eax, edx

Abb. 1: Disassembly eines einfachen Programmes, welches prüft, ob eine Zahl durch 10 teilbar ist

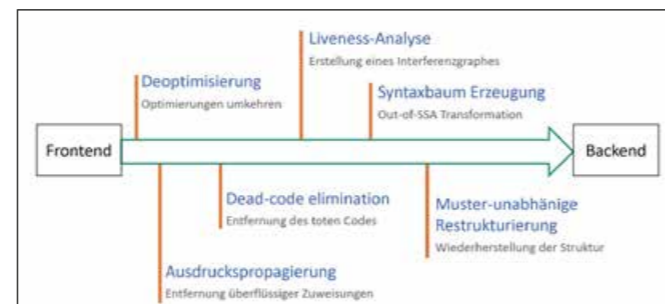


Abb. 2: Verarbeitungsschritte des Forschungsdecompilers

Abbildung 1 zeigt ein einfaches Programm, welches prüft, ob eine Variable durch 10 teilbar ist, in seiner Quellsprache (C) und in Maschinsprache (arm64).

Ein Werkzeug, welches eine quellcodeähnliche Repräsentation aus hardwarenahen Sprachen rekonstruieren kann, wird als Decompiler bezeichnet. Damit ausgestattet sinkt die Zeit, die ein Analyst für die Untersuchung einer einzelnen Funktion aufwenden muss, erheblich. Da diese Werkzeuge jedoch größtenteils auf Heuristiken basieren, funktionieren sie nicht immer zuverlässig oder können ausgenutzt werden, um das Rekonstruieren zu erschweren. Dennoch sind diese Werkzeuge für eine planbare und zeitnahe Analyse unbekannter Binärsoftware unerlässlich.

Aus diesem Grund befasst sich die hier beschriebene Forschungskooperation hauptsächlich mit Verbesserungen von Techniken, die Verwendungen in Decompilern finden. Schwerpunkte hierbei sind unter anderem die musterunabhängige Restrukturierung der wiederhergestellten Quelltext Fragmente und Techniken die es erlauben, die in Compilern gebräuchliche Single-Statement-Assignment (SSA) Notation umzukehren. Zu diesem Zweck wurde ein eigener Decompiler entwickelt. Eine grobe Übersicht der Arbeitsschritte dieses Decompilers ist dargestellt in Abbildung 2.

Da Maschinsprache aus Optimierungsgründen einen hohen Grad an Redundanz aufweisen, kann eine einzelne Zeile Quellcode potenziell auf viele unterschiedliche Arten übersetzt werden. Zusammen mit einer wachsenden Anzahl an Compilern und Konfigurationsmöglichkeiten für diese stellt dies für Decompiler eine wachsende Herausforderung dar, alle

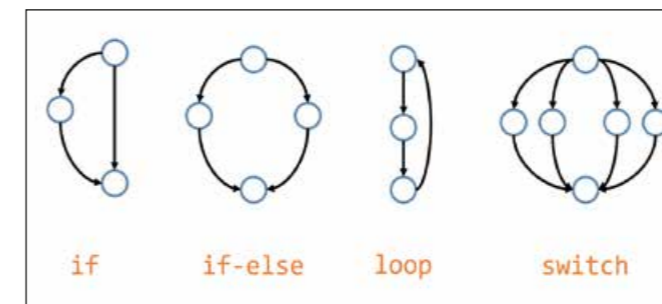


Abb. 3: Muster, welche beliebte Kontrollflussstrukturen darstellen

erzeugbaren Muster zu identifizieren, um diese schließlich umkehren zu können. Abbildung 3 zeigt Schemata einiger in Programmiersprachen beliebter Kontrollstrukturen, welche häufig den grundlegenden Kern dieser Mustererkennung darstellen. Da Optimierungen diese Muster jedoch häufig verzerren oder sogar komplett aufbrechen, ist die zuverlässiger Erkennung aktiver Gegenstand der Forschung.

Techniken wie die musterunabhängige Restrukturierung setzen hier an und versuchen Umstrukturierungsregeln zu erzeugen, die auf den Erreichbarkeitseigenschaften einzelner Codeteile zueinander beruhen und so die Wartung und Aktualisierung von Musterdatenbanken hinfällig machen. Durch die Weiterentwicklung solcher Methoden können so immer zuverlässiger Abstraktionsschichten geschaffen werden, welche den Analyseaufwand erheblich reduzieren.

Die beim Fraunhofer FKIE gewonnenen Erkenntnisse konnten bei hochrangigen wissenschaftlichen Konferenzen publiziert werden und führten zu internationalem Interesse.

Dr. Thorsten Pusch  
 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

## Referenztestaufbau für die HPEM-Normenentwicklung

Wehrtechnisches Gerät sieht sich der Problematik bewusster elektromagnetischer Störversuche ausgesetzt. Die zugehörigen Prüfnormen zur Störfestigkeit werden stetig weiterentwickelt und angepasst. Ein eigens entwickelter kompakter, robuster Referenztestaufbau soll diese Bestrebungen unterstützen und ermöglicht den Vergleich von Testumgebungen und Laboren.

Elektromagnetische Felder hoher Leistung können den Regelbetrieb von elektronischen Gerätschaften empfindlich stören. Aus der militärischen Forschung ist zudem die Entwicklung dedizierter Störeinrichtungen bekannt, teils hochmobil oder sogar per Flugkörper verbringbar. Die Qualifikation wehrtechnischen Geräts bezüglich der Robustheit gegen einschlägige Störversuche steht vor der Herausforderung, einen weiten Raum möglicher Störparameter berücksichtigen zu müssen, bei gleichzeitig eingrenzbarem Testumfang. Auch werden teils neue Testumgebungen eingeführt, so können in Modenverwirbelungskammern die eingebrachten Gerätschaften mit verhältnismäßig geringem Energieaufwand hohen Feldstärken ausgesetzt werden.

Schon früh entstanden militärische und zivile Normenvorschriften, die sowohl den Regelfall von Störungen innerhalb des Rahmens gesetzlicher Immissionsvorschriften adressieren, als auch Hochleistungseinwirkungen außerhalb dieses Schutzrahmens berücksichtigen. Beispielhaft wäre der von den amerikanischen Streitkräften verwendete MIL-Standard (MIL-STD 461G) zu nennen, im zivilen Bereich beschäftigten

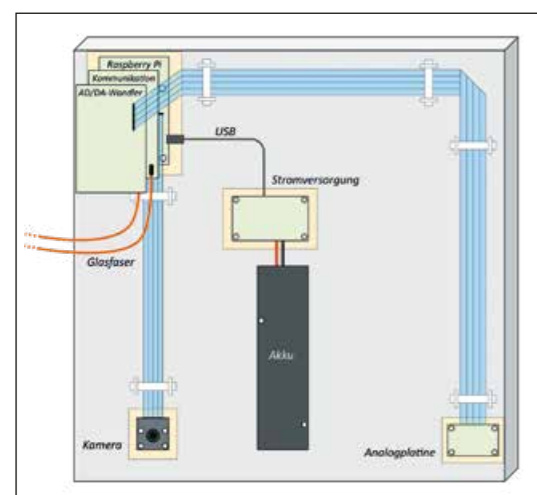


Abb. 1: Schemazeichnung des Referenzaufbaus

Abb.2: Grafische Oberfläche zur Überwachung während der Tests



TRDir Dr. Martin Schaarschmidt  
 Wehrwissenschaftlichen Instituts für Schutztechnologien –  
 ABC-Schutz (WIS)  
 Munster

WISPosteingang@bundeswehr.org

sich IEC-Normen wie die IEC 61000-4-36 oder IEC 61000-5-9 mit dem Phänomen. Auch wegen der Variabilität möglicher Störsignale werden die Normenvorschriften stetig weiterentwickelt. Dabei wird technischen Entwicklungen seitens der Quellen, aber auch neuartigen Testumgebungen Rechnung getragen. Bei diesen Bestrebungen ist ein verlässliches Prüflingsnormal hilfreich, welches mit konsistenten, wohldefinierten Reaktionen zumindest das Verhalten des Testgeräts aus der Unsicherheitsbilanz der Empfindlichkeitstests herausnimmt. Diese wird dann vornehmlich durch die Eigenschaften der jeweiligen Vorrichtung zur Signalgeneration und der Testumgebung wie beispielsweise Freifeld-Testanlage, Absorberkammer, TEM-Wellenleiter oder Modenverwirbelungskammer bestimmt.

Im Rahmen eines bilateralen Abkommens zur Forschungskollaboration mit dem Königreich Schweden wurde unter deutscher Beteiligung durch das WIS Munster und das Fraunhofer INT ein gemeinsames Forschungsprojekt durchgeführt, welches zum Zwecke der Erarbeitung von HPEM-Testmethoden die Entwicklung eines solchen Referenztestaufbaus beinhaltet. Aus marktgängiger Hardware wurde in kompakter Bauform ein generisches IT-System realisiert, welches auf einem batteriebetriebenen Einplatinenrechner der Raspberry Pi-Plattform beruht. Peripheriekomponenten ergänzen die zentrale Rechen-

einheit um Sensorik (Abb. 1), so dass vielseitige Fehlerphänomene im Rahmen von Empfindlichkeitstests induziert und schon während der Feldexposition vom Kontrollstand der jeweiligen Testumgebung aus überwacht werden können (Abb. 2).

In ersten Untersuchungen (Abb. 3) konnte über den Nachweis hoher Wiederholungsgenauigkeit bezüglich der erhobenen Fehlerschwellen die Eignung des Testaufbaus als Referenz gezeigt werden (Abb. 4). Gleichzeitig kann der bei Hochleistungstests übliche Geräteverschleiß über progressive Vorschädigung durch den Einsatz kostengünstiger Ersatzhardware kompensiert werden. Diesbezüglich konnte in Studien ein geringer Einfluss von Serienstreuung auf das Geräteverhalten nachgewiesen werden. Da die einzige Verbindung zum Testsystem in einer faseroptischen Verbindung zur seriellen Kommunikation besteht, kann es bei einer Abmessung von knapp einem halben Meter Kantenlänge in allen branchenüblichen Testumgebungen zum Einsatz kommen.

Zukünftige Ziele sind der ausgiebige Vergleich von Testumgebungen und Laboren sowie die Entwicklung geeigneter Datenbankstrukturen zur Kategorisierung der Forschungsdaten.



Abb. 3: Testaufbau im TEM-Wellenleiter am Fraunhofer INT

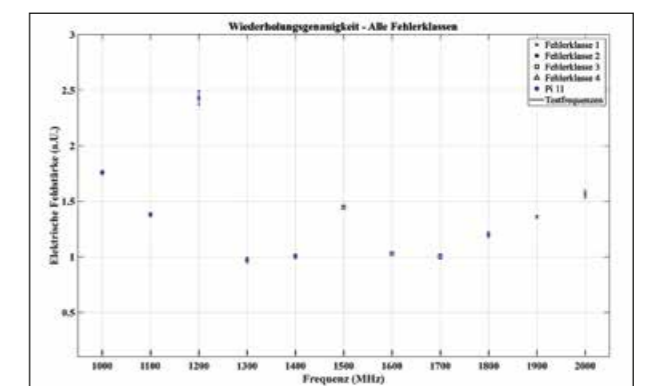


Abb. 4: Ergebnisse zur Wiederholungsgenauigkeit der Messung der Fehlerschwellen

Dr. Britta Pinzger  
 Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
 Trendanalysen INT  
 Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

Dr. Silke Römer  
 Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische  
 Trendanalysen INT  
 Euskirchen

info@int.fraunhofer.de

## Analyse der internationalen wehrtechnischen Forschung und Technologie zur Unterstützung langfristiger F&T-Planung

Im Auftrag von BMVg und BAAINBw betrachtet das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT die allgemeinen naturwissenschaftlich-technischen Entwicklungen im In- und Ausland sowie internationale F&T-Planungsprozesse und -strategien, um diese bezüglich ihrer Relevanz für die nationale Verteidigungsplanung zu analysieren.

Internationale Forschungskooperation ist für die wehrtechnische Forschung & Technologie (F&T) der Bundeswehr ein wichtiger Baustein zur Ausplanung des Forschungsprogramms. Für eine geeignete Positionierung der Kooperationsaktivitäten sind Kenntnisse der F&T-Prozesse und -Programme internationaler Organisationen sowie der Partnernationen unerlässlich.

Zur Unterstützung des BMVg erarbeitet sich die Abteilung Technologieanalysen und Strategische Planung des Fraunhofer INT einen kontinuierlichen Überblick der wehrtechnisch-relevanten F&T-Aktivitäten sowie der F&T-Planungsprozesse von Partnernationen Deutschlands, der NATO Science and Technology Organization (STO), der Europäischen Verteidigungsagentur (EDA) und der Europäischen Kommission inklusive der Vorhaben letzterer hinsichtlich des zukünftigen „EU Defence Research Programme“. Darauf aufbauend wird halbjährlich ein Länderbericht zur wehrtechnischen Forschung und Technologie in einem mit dem Auftraggeber abgestimmten Land erstellt, um das Kooperationspotential des Landes besser abschätzen zu können.

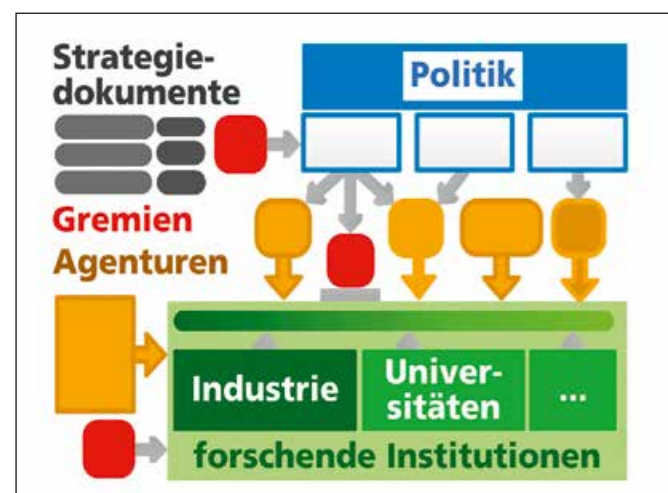


Abb. 1: Übersicht über Akteure und Strategiedokumente zur wehrtechnischen FuT/FuE eines Landes (Schema)

Um eine solche länderspezifische Perspektive über die wehr-technisch-relevanten F&T-Aktivitäten sowie F&T-Planungen eines Landes zu erlangen, werden öffentlich zugängliche Quellen wie Strategie-papiere, Jahresberichte, Publikationen, Internetpräsenzen von Ministerien, Forschungsinstitutionen, Unternehmen und Universitäten sowie die öffentliche Bericht-erstattung und Sekundärliteratur durchforstet, zusammenge-fasst und analysiert. Diese qualitative Recherche wird sowohl durch zeitgemäße Verfahren der IT-Unterstützung als auch durch quantitative Analysen ergänzt. Dies geschieht z. B. durch den Einsatz des am Fraunhofer INT in die Anwendung ge-brachten Tools KATI (Knowledge Analytics for Technology and Innovation), mit dessen Hilfe unter anderem Publikations-daten zu naturwissenschaftlich-technischer Forschung zur Identifikation von relevanten Forschungsakteuren und ggf. Forschungskooperationen/-netzwerken analysiert werden. Des Weiteren werden länderübergreifende und landesspezifi-sche Kenndaten, Indikatoren und Statistiken berücksichtigt, etwa Daten zu F&E (Forschung und Entwicklung) und F&T, zu Rüstungs- und exporten sowie Verteidigungsbudgets.

Ein Länderbericht stellt die Informationen zu wehrtechnischer F&T eingebettet in einen größeren Kontext dar. Hierzu zählt eine allgemeine länderspezifische Einführung, die neben Infor-mationen zur Wirtschaftskraft, zur militärischen Stärke und der außenpolitischen Prioritäten auch Informationen über die Einbindung des Landes in internationale Bündnisse, Organi-sationen und Verbände enthält.

Auf dieser Basis folgt im Länderbericht eine Beschreibung der im Verteidigungsministerium des jeweiligen Landes für die Koordinierung und Verwaltung von F&T verantwortlichen

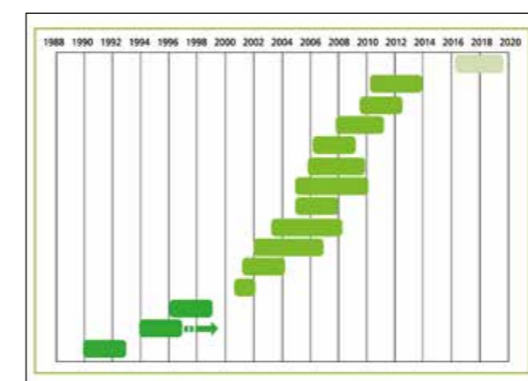


Abb. 2: Auswahl bilateraler Vereinbarung eines Landes (Schema)

Stellen. Im Folgenden wird sowohl wehrtechnische F&E als auch zivile Sicherheitsforschung des jeweiligen Landes über-blicksartig dargestellt, inklusive ggf. vorhandener Schnitt-stellen. Institute, die wehrtechnisch-relevante F&T betreiben, werden einschließlich ihrer technologischen Schwerpunkte porträtiert, ebenso wie relevante Unternehmen aus der Ver-teidigungsindustrie. Die F&E / F&T-Akteurslandschaft wird typischerweise in einer Überblicksgrafik dargestellt (Schema vgl. Abb. 1), die landesspezifische Strategiedokumente, politische Akteure, Agenturen und Förderinstitutionen sowie Unterneh-men mit eigener F&T, öffentliche und sonstige Forschungsein-richtungen umfasst. Abschließend werden bestehende bi- und multilaterale internationale Forschungskooperationen dar-gestellt (Schema vgl. Abb.2). Anhand der oben genannten Informationen werden auch die Forschungsprioritäten des jeweiligen Landes eingeordnet.

Im Jahr 2019 wurden Länderberichte über die Schweiz und über Polen erstellt. Abbildung 3 zeigt die Flaggen der Länder, zu denen in den vergangenen Jahren Berichte erstellt wurden.

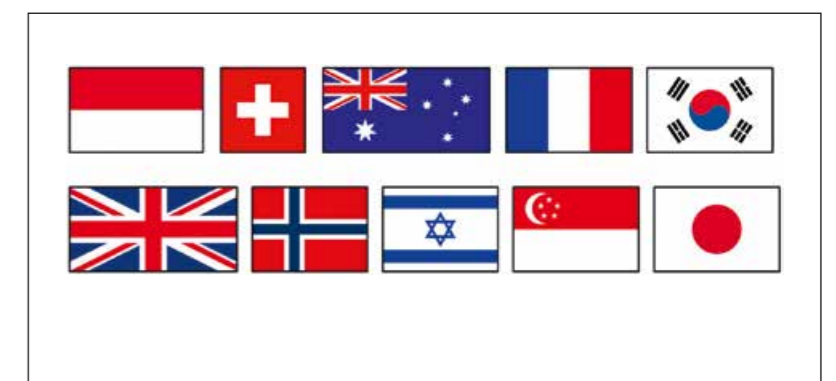


Abb. 3: Flaggen der Länder, zu denen in den vergangenen Jahren Berichte erstellt wurden

Axel Tessmann  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

Thomas Merkle  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

## Millimeterwellen-Komponenten für neuartige militärische Kommunikationssysteme und taktische Datenlinks

**Funkstrecken im Frequenzbereich der Millimeterwellen besitzen ein großes Potenzial für zukünftige militärische Datenverbindungen zwischen Boden-, Luft-, See- und Weltraum gestützten Plattformen mit hohen Übertragungsraten, wie sie für die gesteigerten Fähigkeiten der Streitkräfte benötigt werden. Am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF entwickelte Komponenten und Subsysteme können hier vorteilhaft Einsatz finden.**

Moderne Militärische Hochfrequenz-Systeme für Radar, Kommunikation, Sensorik und EloKa erfordern enorme Bandbreiten bei gleichzeitig hoher Sendeleistung zur Erfüllung der heute geforderten Fähigkeiten, welche von zukünftigen Systemen wie beispielsweise MGCS oder FCAS erbracht werden müssen. Die zunehmende Vernetzung dieser Systeme (Abb. 1) und das gleichzeitig immens steigende Aufkommen von Sensordaten erfordert grundsätzlich neue Konzepte im Bereich der Verarbeitung und Übertragung von Einsatzdaten. So benötigt beispielsweise ein einzelnes UAV vom Typ Global Hawk eine Übertragungskapazität von 500 Mbit/s. Dies entspricht in etwa dem 5-fachen der Bandbreite, die den US-Streitkräften beim Einsatz während der Operation Desert Storm zur Verfügung stand. Der breite Frequenzbereich der Millimeterwellen zwischen 30 und 300 GHz bietet eine hohe verfügbare Bandbreite und damit Übertragungskapazität bei gleichzeitig, im Vergleich zum optischen Spektralbereich, deutlich vorteilhafteren Ausbreitungseigenschaften. So besteht eine weitgehende Unempfindlichkeit sowohl gegenüber Witterung (Nebel, Regen, Schnee) als auch Umweltbedingungen (Staub, Sand). Zudem sind die Abmessungen der Hochfrequenz-Bauelemente,

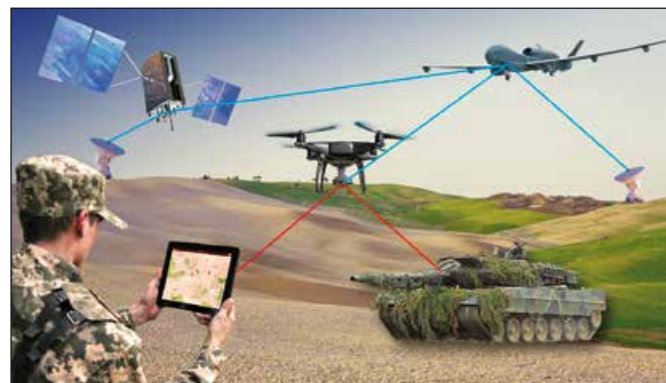


Abb. 1: Taktische Datenlinks in vernetzten Systemen



Abb. 2: Kleinflugzeug mit Tragevorrichtung (POD) zur Durchführung von Messkampagnen

Michael Schlechtweg  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF  
Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

insbesondere der Antennen, im Vergleich zur klassischen Mikrowellentechnik im X-Band (8 bis 12 GHz) deutlich kompakter.

Am Fraunhofer IAF werden ITAR-freie Mikrowellen- und Millimeterwellenkomponenten für militärische Anwendungen entwickelt (ITAR: International Traffic in Arms Regulations), deren Leistungsdaten den weltweiten Stand der Technik repräsentieren. Die am Fraunhofer IAF verfügbare Technologie ermöglicht die Integration einer Vielzahl von Hochfrequenz-Schaltungselementen wie Verstärker, Mischer und Frequenz-Vervielfacher auf einem einzigen Mikrochip. Diese gebündelten Kompetenzen ermöglichen kompakte, energieeffiziente und leichte Systemlösungen, wie sie im mobilen Einsatz und für Anwendungen in UAV gefordert werden. Unter Verwendung dieser Komponenten wurden Feldversuche (bodengebunden, Punkt zu Punkt) im Millimeterwellenbereich erfolgreich durchgeführt. So konnte bei 73,5 GHz eine Entfernung von 37 km bei einer Datenrate von 6 Gbit/s drahtlos überbrückt werden.

In enger Kooperation mit Fraunhofer FHR wurde im Frequenzbereich zwischen 71 und 76 GHz bei einer Bandbreite von 5 GHz und einer Sendeleistung von 1 Watt eine stabile Luft-zu-Boden-Datenverbindung mit bis zu 9,6 Gbit/s Übertragungsgeschwindigkeit demonstriert. Die Flughöhe des Kleinflugzeuges (Abb. 2) betrug hierbei 1 km, die überbrückte Entfernung lag zwischen 5 und



Abb. 3: Sende/Empfangs-Station für Datenübertragung bei 300 GHz

Sebastian Teich  
Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie und Elektronik (WTD 81)  
Greding

wtd81posteingang@bundeswehr.org

12 km. Bei diesem Experiment kam ein vollautomatisches mechanisches Trackingsystem mit Drehstand und Gimbal zum Einsatz.

Im noch höheren Frequenzbereich um 300 GHz (Abb. 3) konnte ein 4-Kanal Sende / Empfangs-Frontend mit elektronischer Strahlenschwenkung realisiert werden. Die verwendeten Hochfrequenzmodule wurden auf Basis einer fortschrittlichen Leiterplattentechnik unter Verwendung von hochfrequenztauglichen Kunststoffsubstraten hergestellt (Abb. 4). Diese Aufbautechnik zeichnet sich gegenüber der bisher üblichen Hohlleitertechnik mit gefrästen Metallblöcken durch ein wesentlich geringeres Gewicht, geringere Kosten und eine kleinere Baugröße aus. Für diese Übertragungsversuche wurden höherwertige Modulationsverfahren bis hin zu einer 16-Quadrat-Amplituden-Modulation verwendet. Hierbei wird für den Einzelkanal eine Datenrate von bis zu 128 Gbit/s erreicht, ein im weltweiten Maßstab hervorragendes Ergebnis. Diese Ergebnisse zeigen das enorm hohe Potenzial der Millimeterwellen-Technik für zukünftige echtzeitfähige militärische Datenverbindungen mit bisher nicht realisierbaren Übertragungsraten zwischen Boden-, Luft-, See- sowie Weltraum gestützten Plattformen auf.

Das Vorhaben wird im Rahmen der wehrwissenschaftlichen Forschung durch die Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie und Elektronik (WTD 81) betreut.

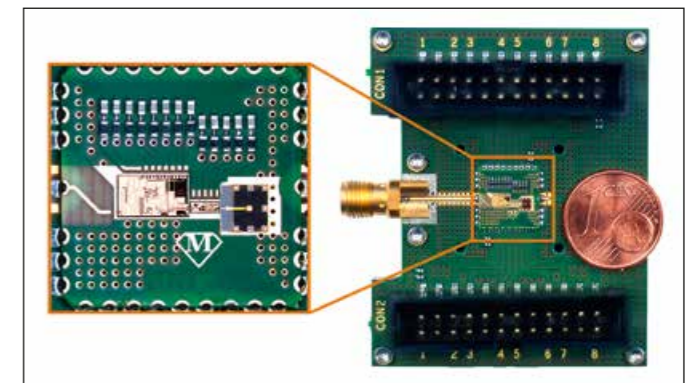


Abb. 4: Aufbautechnik auf Basis von Hybrid-Leiterplatten für 300 GHz-MMICs



Andreas Imiolek  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

Volker Weiser  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

## Neue Methoden der Abbrandcharakterisierung zur Entwicklung leistungsfähiger Raketentreibstoffe

Festtreibstoffe sind ein unverzichtbarer Bestandteil von leistungsfähigen Raketenantrieben, welche aufgrund ihrer hohen Flexibilität und Zuverlässigkeit in zahlreichen Waffensystemen der Bundeswehr zum Einsatz kommen. Aktuelle Entwicklungen am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT zeigen das Potential von leistungsgesteigerten und signaturarmen Formulierungen auf. Experimentelle Untersuchungen und theoretische Modellierungsansätze tragen dabei nicht nur zum Verständnis des Abbrandes und der Voraussage von Leistungsparametern bei, sondern liefern wichtige Impulse für Abbrandmodifikatoren in neuen Formulierungen.

Eingeführte Feststoffraketenmotoren mit hohen Leistungsdaten basieren derzeit auf kunststoffgebundenen Ammoniumperchlorat-Komposittreibstoffen (Abb. 1). Allerdings ist AP als krebserregend eingestuft und beim Abbrand entsteht Chlorwasserstoff (HCl), der die Abschusseinheit korrodiert. Zudem wirkt HCl als Kondensationskeim für eine weithin sichtbare Abgasstrahlensignatur und ist umweltschädlich. Deshalb wird angestrebt, AP durch das ähnlich leistungsfähige Ammoniumdinitramid (ADN) zu ersetzen. ADN verspricht leistungsstarke, chlorfreie und damit umweltverträgliche Formulierungen und signaturarme Raketenantriebe.

Die Anpassung der treibstoffspezifischen Kenndaten neuer Treibstoffformulierungen auf spezielle Einsatzzwecke stellt jedoch eine Herausforderung dar. Die Anwendung von bekannten Abbrandmodifikatoren erweist sich in den meisten Fällen als unwirksam oder erzeugt eine unerwünschte Druckempfindlichkeit des Abbrandes. Die Ursache für diese Phänomene liegt im deutlich unterschiedlichen Abbrandverhalten von ADN- zu AP-Festtreibstoffen.

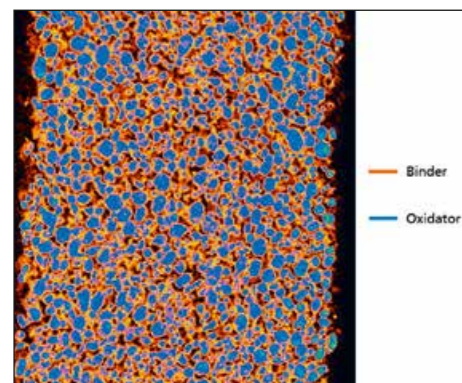


Abb. 1: Computer tomographischer Querschnitt eines Festtreibstoffs mit Hervorhebung der beiden Hauptkomponenten: Binder (orange) und Oxidator (blau)



Abb. 2: Hochdruckautoklav (Crawford-Bombe) zur Ermittlung der druck- und temperaturabhängigen Abbrandgeschwindigkeit von Festtreibstoffen

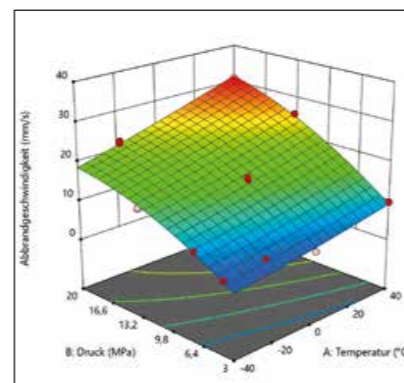


Abb. 3: Aus dem empirischen Modell abgeleiteter „Response Surface“ Graph (Abbrandgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Druckes und der Temperatur). Die durchgeführten Messungen sind als Punkte dargestellt

Um das Abbrandverhalten neuer ADN basierten Formulierungen besser zu verstehen, werden die Methoden zur Abbrandcharakterisierung am ICT stetig erweitert und den aktuellen Anforderungen angepasst. Ein wichtiger Leistungsparameter für militärische Raketentreibstoffe ist die temperatur- und druckabhängige Abbrandgeschwindigkeit im Bereich von  $-45\text{ °C}$  bis  $100\text{ °C}$  bzw.  $1\text{ MPa}$  bis  $30\text{ MPa}$ . Hierfür wurde ein vollautomatisierter, temperierbarer Hochdruckautoklav (Crawford-Bombe) unter Einhaltung der aktuellen Sicherheitsauflagen konzipiert und in Betrieb genommen (Abb. 2). Die Verwendung einer statistischen DoE-Versuchsplanung (Design of Experiments) reduziert die Anzahl der durchzuführenden Versuche deutlich. Im Vergleich zur konventionellen Messmethode lassen sich mehr als 50 % Probenaufkommen und Zeitaufwand einsparen. Mit den damit generierten empirischen Modellen, lassen sich temperatur- und druckabhängige Abbrandgeschwindigkeiten für die getestete Formulierung mit hoher Genauigkeit in einem weiten Parameterbereich voraussagen (Abb. 3).

Als Grundlage für die Modellierung und für ein besseres Verständnis des Abbrand- und Zersetzungsverhaltens neuer Formulierungen, besonders von ADN-Treibstoffen, ist zudem eine Betrachtung der chemischen und physikalischen Vorgänge in der festen Phase während des Abbrandes unabdingbar. Die Einführung einer neuen Messmethodik ermöglicht die Bestimmung der Temperaturprofile im Festtreibstoff während des Abbrandes unter Druck (Abb. 4). Dabei werden während des Aushärtprozesses mikro-skalige Thermoelemente in der Treibstoffprobe platziert. Der erforderliche Messsignalaufnehmer wurde an einen bestehenden Hochdruckautoklaven mit optischen Zugängen adaptiert. Dies ermöglicht neben der

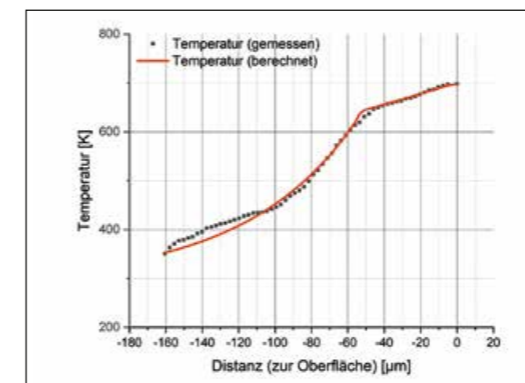


Abb. 4: Bestimmung des Temperaturprofils (in der festen Phase) eines Raketentreibstoffes während des Abbrandes

Bestimmung des Temperaturprofils eine gleichzeitige Beobachtung des Abbrandes mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, woraus auch die Abbrandgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Die Ergebnisse erweisen sich als gut reproduzierbar. Neuartig ist auch die Untersuchung des Zersetzungsverhaltens der Treibstoffe. Der Abbrand wird dazu durch schnelles Abkühlen in flüssigen Stickstoff unterbrochen und die Abbrandoberfläche anschließend mittels Konfokal-Raman Spektroskopie analysiert (Abb. 5).

Die kombinierte Anwendung der beschriebenen Messmethoden ermöglichte in den letzten Jahren den Aufbau eines tiefgreifenden Verständnisses der physikalischen und chemischen Vorgänge während des ADN Abbrandes. Unter anderem lassen sich die chemischen Reaktionsmechanismen in der kondensierten und gasförmigen Phase ableiten. Dies ist die Basis für die Simulation der chemischen und physikalischen Prozesse des ADN-Abbrandes und damit der Prognose der druckabhängigen Abbrandgeschwindigkeit, die in künftigen Arbeiten unter Zuhilfenahme chemoinformatischer Methoden berechnet werden soll.

Das Zusammenspiel solcher empirischen und theoretischen Untersuchungen des Abbrandes unterstützt am Fraunhofer ICT die Entwicklung neuer ADN-Treibstoffe und hilft bei der Erforschung neuer Abbrandmodifikatoren.

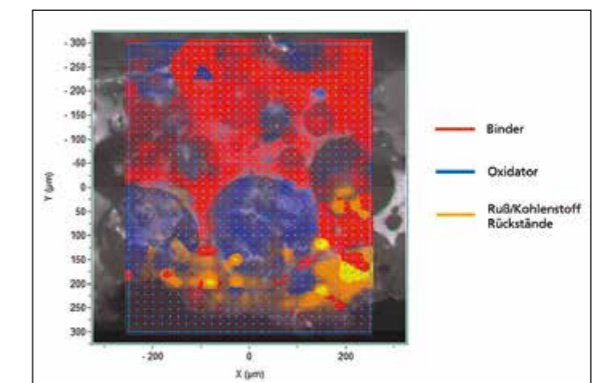


Abb. 5: Konfokal Raman Mapping der Abbrandoberfläche einer Festtreibstoffformulierung

Prof. Dr. Karsten Pinkwart  
 Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
 Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Willi Eckl  
 Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
 Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

## Alternative Energieversorgung für stationäre und mobile Anwendungen im Einsatz

**Eine sichere und durchhaltefähige Energieversorgung für Einsatzkräfte ist von essentieller Bedeutung. Die Implementierung alternativer Antriebsarten sowie Energiewandler- und Speichersysteme können hierzu einen wesentlichen Beitrag liefern. Der ständige Abgleich mit dem aktuellen Stand der Technik sowie F&T Entwicklungen sind hierfür unabdingbar.**

Wie könnten neue Technologien zu einem energieeffizienten und versorgungssicheren Betrieb einer Liegenschaft im Einsatz beitragen? Vor diesem Hintergrund führte das Fachreferat IUD I 2 des BMVg gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT im Jahr 2019 einen Workshop durch. In einer fachlich fundierten Kommunikation wurden erste Ideen und Ansätze für eine energieautarkere Liegenschaft im Einsatz gemeinsam entwickelt. Ausgehend von den Erfahrungen aus vergangenen und aktuellen Einsätzen der Bundeswehr, dass eine sichere und durchhaltefähige Energieversorgung von essentieller Bedeutung ist (siehe Abb. 2), wurden Möglichkeiten der Umsetzung, aber auch Grenzen der Realisierbarkeit analysiert, bewertet und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Experten aus der Forschung, Fachexperten aus dem wehrtechnisch orientierten Amtsbereich sowie Endanwender der Streitkräfte tauschten sich zu Batterien, Brennstoffzellen und thermischen Speichern aus. Vertreter aus dem „D-A-CH“-Verband im Sicherheits- und Verteidigungsbereich gaben einen Einblick in ihre energiebezogenen Projekte.



Abb. 1: Camp Castor (Quelle: 2017 Bundeswehr, Weber)



Abb. 2: Soldat mit verschiedenen elektrischen Verbrauchern (Quelle: 2017 Bundeswehr, Schmidt)

Ulrich Springsguth  
 Abteilung Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen (IUD)  
 Bundesministerium der Verteidigung  
 Berlin

BMVgIUDI2@bmv.bund.de

Victoria Mathesie  
 Abteilung Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen (IUD)  
 Bundesministerium der Verteidigung  
 Berlin

BMVgIUDI2@bmv.bund.de

Eine der größten Herausforderungen ist es, eine ausfallsichere Energieversorgung unter den Rahmenbedingungen des Einsatzes bereitzustellen. Neben der ohnehin schon begrenzten Verfügbarkeit von fossilen Rohstoffen, ergeben sich auch Einschränkungen durch die zunehmende Importabhängigkeit des Energiemarktes von Energieressourcen (Materialien und Komponenten) aus „instabilen“ Regionen (siehe Abb. 3). Gerade dieser Aspekt spielt im Falle der Batterien eine entscheidende Rolle. Die bereits im zivilen Markt fest etablierte „Größe“ Lithium-Ionen ist hält Einzug in militärische Systeme. So ist neben dem mobilen Einsatz auch die „Strompufferung“ beim stationären Einsatz von großem Interesse.

Bevor diese Hochenergie- und Hochleistungssysteme eingesetzt werden können, zeigen sich vielschichtige militärisch spezifische Fragestellungen hinsichtlich der Sicherheit und der Technik. So gilt es beispielsweise zu untersuchen, inwieweit die Lithium-Ionen-Technologie eine wirtschaftliche Alternative zu den umfänglich eingeführten Blei-Batterien darstellt und welche militärischen Anforderungen diese erfüllen müssen. Auch die Frage, wie die Bundeswehr zu einer allgemein dauerhaft gültigen Bestell- und Abnahmespezifikation gelangt, die auf erarbeiteten „militärischen“ Standards beruht und qualitative und quantitative Abnahmen ermöglicht, muss beantwortet werden. In diesem Kontext ist darüber hinaus zu prüfen, wie

wahrscheinlich die Realisierbarkeit und die damit verbundene Verfügbarkeit einer militarisierten Lithium-Ionen-Technologie im nationalen, europäischen und oder NATO- Rahmen ist. Die Brennstoffzelle ist aufgrund der erschwerten Aufklärbarkeit durch geringe Emissionen an IR- und elektromagnetischer Strahlung sowie Lärm aus einsatzstrategischen Sicht von besonderem Interesse. Bei der Verwendung von Wasserstoff als Energieträger, der höhere Leistungsdichten als andere Kraftstoffe ermöglicht, stellt die logistische Versorgung der Einsatzkräfte eine Herausforderung dar. Dabei könnte die Elektrolyse Vorort einen Lösungsansatz bieten.

Die Teilnehmer des Workshops waren sich einig, dass die Anwendung der vorgestellten Technologien hohes Potential zur Steigerung der Energieeffizienz und Versorgungssicherheit von Infrastruktur im Einsatz bietet, aber eben auch, dass die zivil verfügbaren Technologien den militärischen Besonderheiten angepasst werden müssen. Hier besteht Bedarf für F&T.

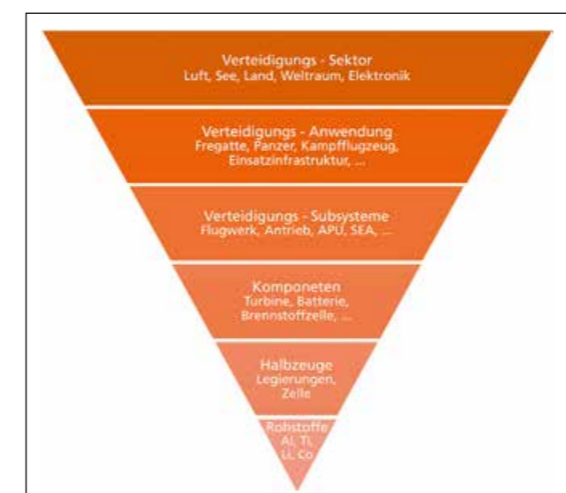


Abb. 3: Abhängigkeitspyramide

Saad Esquelli  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Flugsystemtechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

Dr. Kai Richter  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Göttingen

pks-wtf@dlr.de

## Innovative Methoden in der Zulassung Militärischer Luftfahrzeuge

**Im Prozess der Zulassung von militärischen Luftfahrzeugen ist der Einsatz aerodynamischer Berechnungsverfahren bisher noch nicht weit verbreitet, spielt aber eine zunehmende Rolle in der Nachweisführung als teilweiser Ersatz aufwändiger Windkanal- und Flugtests. Ein höheres Vertrauen in die Vorhersagefähigkeit numerischer Verfahren wäre für die Bundeswehr langfristig jedoch von Vorteil.**

In der zivilen Luftfahrt wird angestrebt, numerische Berechnungsverfahren bereits sehr früh in der Entwicklung von Luftfahrzeugen derart einzusetzen, dass die mit den Verfahren erzeugten Ergebnisse und Daten auch Einzug in die spätere Zertifizierung des Luftfahrzeugs haben. Auch im militärischen Bereich würde die stärkere Einbeziehung aerodynamischer Berechnungsverfahren den Prozess der Nachweisführung begünstigen. Aufgrund der geforderten Anpassungsfähigkeit des militärischen Fluggeräts an verschiedene Missionen, müssen in der militärischen Zulassung nicht nur das Flugzeugmuster an sich sondern auch eine Vielzahl von Konfigurationsmöglichkeiten betrachtet werden. Dies erschwert und verlängert den Zulassungsprozess im Vergleich zur zivilen Anwendung, eröffnet gleichzeitig aber auch ein höheres Potential für die Anwendung von numerischen Methoden.

Eine wesentliche Hürde für den generellen Einsatz numerischer Aerodynamik-Berechnungsverfahren in der Zulassung ist die Frage nach der Verlässlichkeit der generierten Daten für den jeweiligen Anwendungsfall. Es muss sichergestellt sein, dass das ausgewählte numerische Simulationsverfahren die



Abb. 1: Windkanalmodell einer betrachteten experimentellen Geometrie (Quelle: MAKO – EADS, © Airbus Defence & Space)

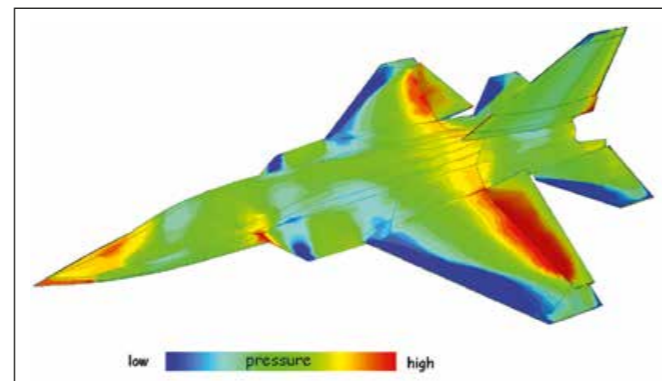


Abb. 2: Darstellung einer Druckverteilung auf einer betrachteten experimentellen Geometrie (Quelle: MAKO – EADS, © Airbus Defence & Space)

Dr. Heiko Freiherr Geyr von Schweppenburg  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

relevanten Strömungsvorgänge des Anwendungsfalls mit der notwendigen physikalischen Korrektheit beschreibt und mit hinreichender Genauigkeit auflöst. Hieraus entsteht essentieller Forschungsbedarf, da für die Auswahl des Berechnungsverfahrens die Grenzen der verwendeten physikalischen Modellierung ermittelt werden müssen, die durch die Modellierung und durch die Diskretisierung verursachte Ergebnisstreuung quantifiziert und die Eignung des Verfahrens durch Validierung nachgewiesen sein müssen.

Ziel dieses neuen Vorhabens ist es, durch wissenschaftliche Untersuchungen zu Einsatzbereich, Vorhersagegüte und Unsicherheitsquantifizierung von etablierten Strömungsberechnungsverfahren, das Vertrauen der Zulassungsbehörden in einen stärkeren Einsatz numerischer Verfahren in der militärischen Luftfahrzeugzulassung zu erhöhen und damit langfristig eine Optimierung des Zulassungsprozesses (Kostenreduktion, schnellere Verfügbarkeit von Fluggerät) zu ermöglichen.

Aus den zusammen mit dem Luftfahrtamt der Bundeswehr und der Industrie identifizierten und für die Zulassung relevanten Themen werden exemplarisch erste Fälle ausgewählt, bei denen besondere aerodynamische Phänomene auftreten und Unklarheit hinsichtlich der Verlässlichkeit der numerischen Strömungsvorhersage besteht. Diese Fälle können z. B.

das aerodynamische Verhalten spezifischer Flugzeuggeometrien, der Einfluss von Außenstrukturmodifikationen, einer Betankungssonde, einer abgehenden Außenlast oder ähnliches umfassen. Da die betrachteten Fälle aerodynamisch hoch komplex sind, wurden als Startpunkte des Vorhabens vorerst zwei Phänomene ausgewählt.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den oben genannten Betrachtungen soll langfristig ein Richtlinienokument erstellt werden, welches den Rahmen für eine stärkere als bisher übliche Verwendung numerischer Berechnungen in der Zulassung ermöglicht. Zu diesem Zweck werden für ausgewählte Fallbeispiele in Bezug zu den entsprechenden Zulassungsanforderungen erste Entwürfe von derartigen Richtlinien erarbeitet. Dabei sind nicht nur die Anwendungsgebiete von Belang, in denen eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse erwartet wird, sondern auch die Fälle, in denen eine eingeschränkte Vorhersagekraft numerischer Berechnungen erwartet wird oder in denen ein ausreichend zuverlässiges Ergebnis kaum erreicht werden kann. Neben der Entwicklung von konkreten Standards für die Durchführung numerischer Aerodynamik-Berechnungen in der Zulassung sollen daher auch diejenigen Anwendungsgebiete identifiziert werden, in denen klassische Nachweismethoden (z. B. Flugtests) zielführender sind.



Abb. 3: Ablaufplan des Vorhabens

Dr.-Ing. Sven Lorenz  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Flugsystemtechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

Simon Schopferer  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Flugsystemtechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

## Automatisierter Lufttransport in niedriger Flughöhe und dessen Technologie-Demonstration

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR untersucht theoretische und praktische Aspekte des automatischen und unbemannten Luftfrachttransports. Mögliche Luftfahrzeugkonfigurationen werden analysiert und bewertet. Zur Demonstration verschiedener Aspekte und Technologien des automatischen Luftfrachttransports werden Flugversuchsträger entworfen, gebaut, ausgerüstet und schließlich im Flug erprobt.

Das Ziel des seit 2016 laufenden Projekts ALAADy ist es, Technologien für den kostengünstigen und schnellen unbemannten Luftfrachttransport zu entwickeln, zu kombinieren und zu erproben. ALAADy ist ein Akronym für „Automated Low Altitude Air Delivery“ und steht für den tieffliegenden unbemannten Luftfrachttransport, wobei Risikominderungen sowie Operationen über dünn besiedelten Gebieten und unterhalb des üblichen Flugverkehrs mit der Herausforderung einer ungewöhnlich großen Drohne kombiniert werden. Verschiedene Luftfahrzeugkonfigurationen wurden im Rahmen des Projekts im Hinblick auf operative, finanzielle und sicherheitstechnische Aspekte hin analysiert und bewertet (vgl. Abb. 1). Die Vision eines unbemannten Frachttransporters mit einer Nutzlastkapazität von 1000 kg zeigt Abb. 2. Einen ersten Schritt in Richtung dieser Vision stellt der ALAADy-Demonstrator dar (Abb. 3). Dieses unbemannte Luftfahrzeug wurde für die Erprobung des vollständig automatisierten Luftfrachttransports über Entfernungen bis zu 300 km entwickelt.

Die Nutzlastkapazität von bis zu 150 kg ermöglicht bereits neben der Durchführung von Fracht- und Versorgungsflügen

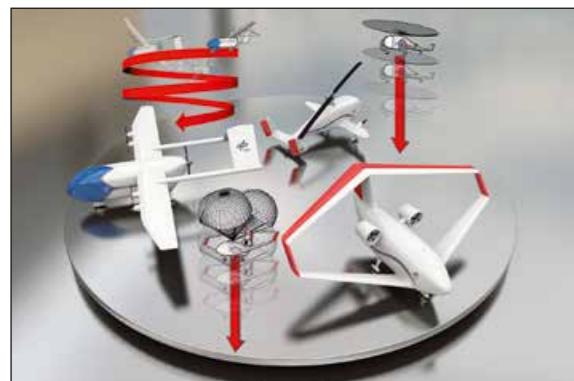


Abb. 1: Die verschiedenen Konfigurationen unterscheiden sich in operativen, finanziellen und sicherheitstechnischen Aspekten



Abb. 2: Eine Nutzlast von 1000 kg ist das Ziel für eine einfach beladbare, kostengünstige Drohne für den unbemannten Frachttransport

Sebastian Benders  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Flugsystemtechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

Johann Dauer  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Flugsystemtechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

auch die Möglichkeit diverse Sensoren, zum Beispiel zur Fernerkundung, mitzuführen. Herausforderungen bei der Entwicklung stellten unter anderem die Auswahl, Entwicklung und Integration von neuartigen Avionikkomponenten dar, z. B. Aktuatoren, Datenlinks, Energiesystem, verschiedene Sensoren und zuverlässige Software zur Steuerung des Luftfahrzeuges. Aufbauend auf dem Basissystem wurde Software zur Überwachung des Systems und für den automatischen Flug einschließlich Regelungsalgorithmen, Bahnplanung und Missionsmanagement entwickelt. In Flugversuchen werden neuartige risikobasierte Betriebskonzepte angewendet, Prozeduren weiterentwickelt und die automatische Flugsteuerung demonstriert. Auf der Basis der Ergebnisse von Simulations- und Flugversuchsstudien werden Betriebskonzepte und Kostenmodelle validiert, die einen sicheren, kosteneffizienten und effektiven Betrieb ermöglichen. Mögliche Sicherheitsrisiken, die sich aus dem Betrieb ergeben, werden identifiziert, bewertet und gemindert.

Das DLR unterstützt die Schaffung eines Sicherheitsrahmens, der im Rahmen der Risikobewertung von den Luftfahrtbehörden genutzt wird. Zusätzlich werden Unternehmen und Betreiber unbemannter Flugzeuge dabei unterstützt, diese neuartigen Konzepte und Technologien des unbemannten Luftfrachttransports weiterzuentwickeln.

Der ALAADy-Demonstrator ermöglicht die praktische Erprobung von zukunftsweisenden Technologien für den automatischen Betrieb. Beispiele sind Verfahren für die risikobasierte und bordseitige Planung von Flugrouten, die Verarbeitung und Fusion großer Datenmengen und die automatische Flugsteuerung und -führung mithilfe künstlicher Intelligenz. Zukünftig werden Algorithmen den aktuellen Systemzustand aus und planen auf Basis digitaler Karten eine optimale Route in Echtzeit und an Bord des Flugzeuges (vgl. Abb. 4). Solche Technologien ermöglichen einen automatisierten Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge mit geringen Anforderungen an Infrastruktur und niedriger Arbeitsbelastung für Bodenpersonal.

Mit der Entwicklung neuartiger Konzepte, Technologien und Prozeduren und deren Demonstration im Flugversuch setzt das DLR Akzente für die Vision eines sicheren und automatisierten unbemannten Luftfrachttransports.



Abb. 3: ALAADy-Demonstrator – Skalierter Prototyp zur Erforschung der Technologien für den unbemannten Frachttransport

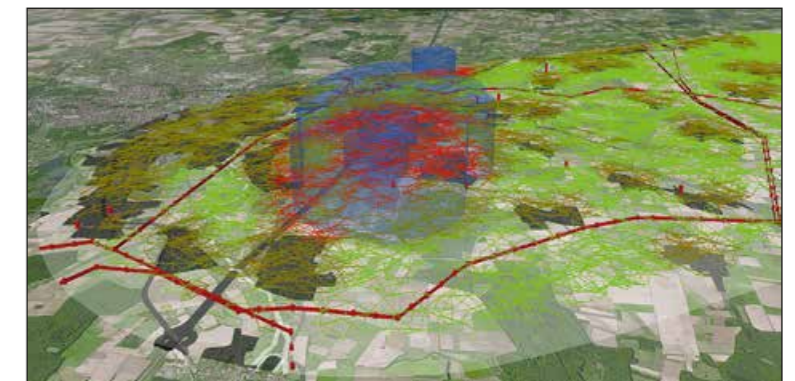


Abb. 4: Visualisierung eines Planungsalgorithmus zur automatischen Berechnung sicherheitsoptimierter Flugbahnen in komplexen Umgebungen

Christian Niermann  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Flugführung  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

Johannes Ernst  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Flugführung  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

## Multimodales Hubschraubercockpit – Flugführung mit Virtual Reality und 3D-Audio

**Zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion in Helikoptern wurde das Konzept „Multimodales Cockpit“ entwickelt. Der Fokus lag auf der Bestimmung der Einsatzfähigkeit von 3D-Audio und Virtual Reality zur Unterstützung der Crew bei hoher Einsatzbelastung sowie umfangreicher Informationslage. Untersucht wurden dabei eine 360° Informationsdarstellung und virtuelle Anzeigen im Hubschraubercockpit.**

Das 3D-Audio-System wurde unter Verwendung von aktuell eingesetzten Headsets im Cockpit entwickelt. Das System positioniert dabei Hinweise und Warntöne virtuell 360 Grad um den Piloten. Informationen können damit auch außerhalb des Sichtfeldes präsentiert und der Blick auf dem Missionsziel gehalten werden. Nachdem in ersten Studien die Leistungsfähigkeit des Systems unter Laborbedingungen nachgewiesen werden konnte, wurde auf internationalen Konferenzen, im Dialog mit Herstellern und sowohl zivil wie auch militärisch fliegenden Besatzungen der Einsatz sowie mögliche Störfaktoren für das System identifiziert. Diese Erkenntnisse zeigen, dass das System im aktuellen Entwicklungsstadium robust gegenüber Störgrößen ist. Die vorausgesagte Präzision der Wahrnehmung von synthetischem 3D-Audio wurde bestätigt.

Nach Abschluss der Labor-Versuchsreihe wurde das System in den DLR Hubschraubersimulator integriert. Verschiedene Assistenzsysteme zur Führung von Hubschraubern unter Bedingungen mit reduzierter Außensicht und schlechtem Wetter wurden in einer umfangreichen Kampagne erprobt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen



Abb. 1: Pilot mit 3D-Audio-System im Hubschrauber-Simulator

wurden im Hubschraubercockpit weiterentwickelt. Piloten konnten 3D-Audio sowohl für die Routenführung als auch bei der Landung unter reduzierten Sichtbedingungen mit Brown-out gewinnbringend und intuitiv nutzen. Alle Piloten der Simulatorstudie äußerten sich ausgesprochen positiv über die 3D-Audio-Assistenz. Auswertungen zeigen eine Verbesserung des Situationsbewusstseins bei gleichzeitiger Verringerung der Arbeitsbelastung. Einstimmig bestätigten die Piloten eine hohe Relevanz von 3D-Audio als zukünftiges Assistenzsystem im Cockpit und empfahlen die Weiterentwicklung des aktuellen Systems zur Produktreife. Insbesondere prognostizierten sie großes Potenzial für zukünftige Anwendungen im Bereich der militärischen Routen- und Landeführung sowie der direkten Gefahrenabwehr für Besatzungen in militärischen Luftfahrzeugen.

Die zweite Kernkomponente im Konzept „Multimodales Cockpit“ stellt der Einsatz von Virtual Reality dar. In einem konventionellen Cockpit ist die Sicht der Crew, insbesondere nach unten und hinten, stark eingeschränkt. Dies stellt für Helikoptereinsätze in Boden- und Hindernisnähe ein großes Risiko dar, und führte bereits zu gefährlichen Situationen und Unfällen. Im „Multimodalen Cockpit“ ist die Idee des entwickelten Konzepts „Virtuelles Cockpit“ die Überwindung von Sichteinschränkungen durch den Einsatz kopfgetragener Anzeigesysteme, auch bekannt als Virtual-Reality-Brillen. In diesen Sichtsystemen werden aufbereitete Umgebungsinformationen dargestellt, die auf fusionierten Datenbank- und Sensorinformationen basieren.

Durch diese neue Freiheit der Darstellung ist es möglich, der Besatzung eine exozentrische Ansicht des Hubschraubers

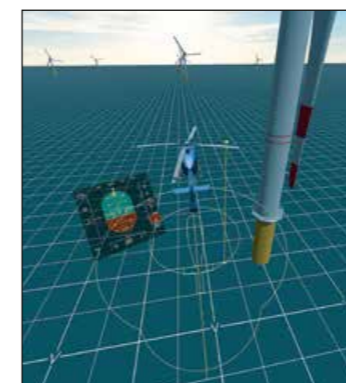


Abb. 2: Exozentrische Ansicht des Helikopters. Diese wird für den Piloten auf der kopfgetragenen Anzeige dargestellt

bereitzustellen. Diese exozentrische Ansicht lässt den Piloten virtuell aus dem Hubschrauber aussteigen, um ihm einen Blick auf die gesamte Umgebung des Luftfahrzeugs zu vermitteln. Durch Studien im Multimodalen Cockpitsimulator des DLR wurde nachgewiesen, dass dieses Assistenzsystem die Wahrnehmung der Umgebung im Nahbereich verbessert und somit die Sicherheit beim Flug in Boden- und Hindernisnähe erhöht. So konnte beobachtet werden, dass die teilnehmenden Piloten eine Schwebeposition in unmittelbarer Hindernisnähe mit dem entwickelten System deutlich schneller einnehmen und stabiler halten konnten als mit aktuellen Cockpitinstrumenten. Basierend auf den Erkenntnissen der bisherigen Studien soll das Anzeigesystem weiter optimiert und anschließend im Flugversuch erprobt werden.

Beide Systeme haben einzeln und zusammen im „Multimodalen Cockpit“ gezeigt, dass sie Hubschrauberpiloten bei herausfordernden Manövern - wie zum Beispiel Operationen bei schlechter Sicht und in Hindernisnähe - effektiv unterstützen können. Sie erhöhen nicht nur die Sicherheit im Flug, sondern schaffen gleichzeitig freie Ressourcen für zukünftiges Missionsmanagement.



Abb. 3: Pilot mit kopfgetragener Anzeige im Multimodalen Cockpit Simulator

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

pks-wtf@dlr.de

Dipl.-Ing. Andreas Walther  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Technische Physik  
Stuttgart

pks-wtf@dlr.de

## TRAILER: Detektion und Abwehr von Bedrohungen aus der Luft

Die Forschungsplattform TRAILER (Tracking, Ranging And Identification using Laser Energy on the Road) ist ein anhängergezogenes Schwenk- und Neigesystem. Neben dem unkomplizierten Austausch optischer Sensorik ist die Integration von leistungsstarken Lasern möglich. Zukünftige Forschungsthemen adressieren die Bereiche laseroptische Aufklärung sowie Ortung und Abwehr von Gefahren aus dem Luftraum.

Treten neue Bedrohungslagen auf, besteht unmittelbar Bedarf an wissenschaftlichen Erkenntnissen zu deren Bewertung und möglichen Abwehrmaßnahmen. Dabei steht immer öfter die praktische Anwendbarkeit der Methoden und Systeme im Rahmen von Feldversuchen im Fokus. Die vom DLR entwickelte zukünftige Forschungsplattform TRAILER bietet einen wesentlichen Beitrag, um zeitnah neu entwickelte optische und optronische Systeme in realistischen Szenarien demonstrieren zu können. TRAILER stellt im Wesentlichen die dazu notwendige Plattform bereit (Abb. 1). Aufbauend auf einer anhängergezogenen Schwenk- und Neigemontierung (PTU) werden wichtige Funktionen für den Einsatz im Feld bereitgestellt.

Leistungsstarke Antriebe ermöglichen die notwendige Agilität um hochdynamischen Objekten folgen zu können. Datenkommunikation und Stromversorgung erfolgt über einen Schleifring in der endlos drehenden Horizontalachse. Angepasst an die Bedürfnisse der Forschung ist auch die sehr flexible und erweiterbare Geräteaufnahme (Abb. 2). Die zunehmenden Datenströme der Sensoren machen eine Vorverarbeitung innerhalb der PTU notwendig. Hierzu sind eigene Rechnerkapazitäten

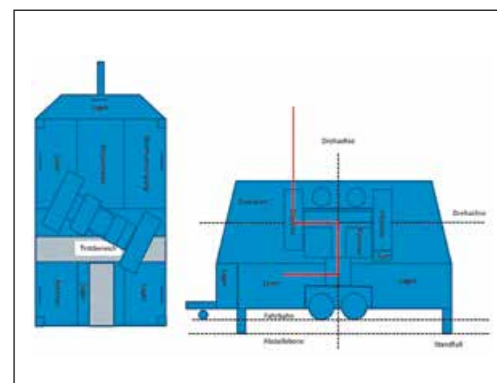


Abb. 1: Skizze in Drauf- und Seitenansicht von der Forschungsplattform TRAILER. Der Coudé Strahlengang ist in rot symbolisiert



Abb. 2: 3D CAD Simulation der Schwenk- und Neigemontierung (PTU) mit Kamerasystemen



Abb. 3: Multispektrale Kameras auf einem Videostativ: v. l. n. r. visuelles Hochgeschwindigkeits-, Wärmebild- und Infrarotkammerasystem

Wolfgang Riede  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Technische Physik  
Stuttgart

pks-wtf@dlr.de

vorgesehen. Der integrierte Coudé Pfad ermöglicht die Nutzung leistungsstarker Lasersysteme, die direkt durch die Hohlräume der Motoren geführt werden. Hochauflösende optische Encoder liefern synchronisiert mit der Bildaufnahme die Winkelpositionen der Zielobjekte. Die untere Basis des TRAILERS stellt den benötigten Platzbedarf für Lasersysteme, Elektronik und Kühlung bereit. Neben einer Niveau Regelung wird Sensorik zur Referenzierung der TRAILER Position eingesetzt.

Als Nutzlast sind optronische Sensoren aus dem sichtbaren und infraroten Spektralbereich vorgesehen: von der visuellen Hochgeschwindigkeitskamera, über hochauflösende Infrarot Detektoren (SWIR) bis hin zur Wärmebildkamera (MWIR) (Abb. 3). Alle Kamerasysteme werden synchronisiert und automatisiert betrieben. Zoom, Blende und Fokuseinstellungen sind elektronisch regelbar. Die Abstandsinformation zu den Flugobjekten wird von einem Laser Ranging System ermittelt. Dies ermöglicht die Nachverfolgbarkeit und Ortung der Zielobjekte im Raum (Abb. 4).

Einer der ersten Anwendungsszenarien bei der das TRAILER System eingesetzt werden soll, ist die Abwehr von unbemannten Flugsystemen (Counter Unmanned Aerial Systems, C-UAS). Militärbasen im In- und Ausland sowie Flughäfen stehen hier vor enormen Herausforderungen. Gerade die Kategorie der

Micro Drohnen (Abb. 5) führt zu hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Ausrichtung sowie die Agilität der Nachverfolgung. Die hohe Auflösung der bildgebenden Sensoren stellt die Grundlage für eine eindeutige Identifizierung und Klassifizierung der Zielobjekte dar. Hierbei werden Methoden des maschinellen Lernens erprobt und verbessert, um den Anwender in seiner Kontrollfunktion zu unterstützen und zu entlasten. Die zuverlässige frühzeitige Warnung und damit die Bereitstellung von Zeit für mögliche Abwehrmaßnahmen sind die Herausforderungen zukünftiger C-UAS Schutzsysteme.

Darüber hinausgehend sind weitere Anwendungsszenarien denkbar, bei denen die präzise Ausrichtung von Laserstrahlung gefordert wird. Hierzu zählt die Laser Stand-off Detektion von Gefahrstoffen über größere Entfernungen. Das TRAILER System ermöglicht die präzise Ausrichtung des Lasertransmitters auch auf bewegte Objekte, sei es zu Land oder in der Luft. Ein Teleskop als Empfänger der Signale wird dabei gleichzeitig mit auf das Zielobjekt ausgerichtet.

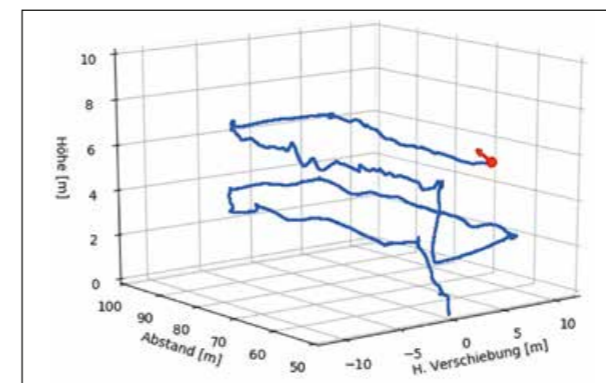


Abb. 4: Flugtrajektorie eines Micro UAS in 50 – 100 m Entfernung durch optisches Tracking und Laser Ranging (Winkel- und Abstandsdaten)



Abb. 5: Fliegendes Micro UAS bei einem Feldversuch auf dem DLR-Standort Lampoldshausen (Quelle: DLR / Frank Eppler)

Timo Kempf  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme  
Oberpfaffenhofen

pks-wtf@dlr.de

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

pks-wtf@dlr.de

## Änderungsdetektion mit großen Synthetic Apertur Radar (SAR)-Bildserien

**Radarbilder werden kaum von atmosphärischen Bedingungen beeinflusst und bieten damit ideale Voraussetzungen für robuste Änderungsinformationen durch Zeitserien. Jedoch gibt es radarspezifische Bildeffekte wie Rauschen, Nebenkeulen oder Überlagerung, die sich bei der Bilderzeugung nachteilig auswirken. Durch die Nutzung multitemporaler Amplituden- und Kohärenzinformation können diese Probleme deutlich reduziert werden.**

Bei einem SAR-System wie TerraSAR-X ist die Verwertbarkeit von Zeitserien eine herausragende Fähigkeit mit einer großen Bandbreite möglicher Anwendungen. Im Vergleich mit elektrooptischen Systemen wird die Radiometrie eines raumgestützten Radarbildes kaum von den atmosphärischen Bedingungen beeinflusst und bietet damit ideale Voraussetzungen für sehr robuste Änderungsinformation innerhalb eines Bildpaares.

Es gibt aber andere radarspezifische Bildeffekte wie Rauschen, Nebenkeulen, Interferenz oder Überlagerung, die sich bei der Bilderzeugung nachteilig auswirken. Speziell im urbanen Umfeld stellt die visuelle Interpretation von Radarsignaturen eine herausfordernde Aufgabe selbst für erfahrene Radarbildauswerter dar.

Die Verarbeitung ausgedehnter Zeitserien ermöglicht eine signifikante Rauschunterdrückung, welche beispielsweise für eine noch robustere Änderungsdetektion verwendet werden kann.

Die Bilder zeigen ein Beispiel für eine Zeitserienauswertung, welche aus TSX-Bildern von München besteht, die im „staring

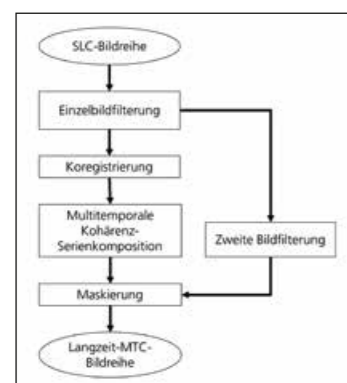


Abb. 1: Prinzipielle Vorgehensweise



Abb. 2: Multi-temporales SAR-Bild von München



Abb. 3: Originales Rohbild

spotlight mode“ aufgenommen wurden. Die Zeitserie besteht aus 50 Bildern, welche über drei Jahre aus immer der gleichen Blickrichtung erzeugt worden sind.

Die prinzipielle Vorgehensweise kann dem Schema entnommen werden. Jede komplexe Einzelaufnahme wurde dabei mit den Werkzeugen aus der DLR-RADIAN-Suite gefiltert, um Nebenkeulen und Rauschen unter Beibehaltung der vollen geometrischen Auflösung zu unterdrücken. Die Basis dieses ersten Filterungsschrittes ist dabei eine komplexe doppelte Apodisation und das Auffüllen der unterdrückten Nebenkeuleninformation mit sinnvollen Werten, welche aus Umgebungsinformationen ermittelt werden. Die so gefilterten Bilder werden koregistriert und unter Darstellung der Amplituden- und Phasenänderung überlagert. In einem weiteren Schritt wird das Überlagerungsergebnis mit den Einzelbildinformationen verglichen, was zu einer Langzeitkohärenz-Zeitreihe (LKZ) führt. Dies bedeutet, dass zwar jedes Bild der Zeitserie ausschließlich die aktuelle Situation darstellt, es jedoch durch Nutzung der gesamten Zeitserieninformation verbessert wurde.

Die Detailbilder zeigen unterschiedliche Stufen im Bildverarbeitungsprozess, in diesem Beispiel das ungefilterte Rohbild und der gleiche Ausschnitt aus der kohärenten Zeitserie. Zum radiometrischen Vergleich ist das Endergebnis des Einzelbildes als LKZ eingefärbtes Produkt und als Graustufenprodukt dargestellt. Dieses Ergebnis ist ein Bild mit voller geometrischer Auflösung aber unterdrücktem Rauschen, in welchem zwischen statischen Objekten (blau), Vegetation (grün) und Änderungen im Vergleich zur Zeitserie unterschieden werden kann.



Abb. 4: Multi-temporales Kohärenzkomposit



Abb. 5: Graustufen-Einzelbild mit Rauschunterdrückung



Abb. 6: LKZ-Einzelbild

Es ist erkennbar, dass diese Methode zu einer signifikanten Verbesserung der Informationsgewinnung aus Synthetic-Apertur-Radar-Bildern führt. Der Grund hierfür liegt in der enormen Rauschunterdrückung bei gleichzeitiger Beibehaltung der vollen geometrischen Auflösung. Dies erlaubt eine bessere und intuitivere Bildsegmentierung und eine wesentlich robustere Änderungsdetektion. Die dafür nötige kohärente Koregistrierung von Zeitserien ist bereits in die RADIAN-Suite integriert und für die Bildauswerter nutzbar.

Dr.-Ing. Robert Kaps  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

Dr.-Ing. Daniel Schmidt  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

## Digitalisierung in MRO – AR-unterstützte Strukturüberwachung und Schadensanalyse

Zukünftige MRO-Prozesse (Maintenance, Repair and Overhaul) werden neben dem realen Bauteil auch seinen virtuellen „Digitalen Zwilling“ sowie Informationen aus SHM-Systemen (Structural Health Monitoring) und automatisierten Strukturanalysen nutzen, um eine individuelle, minimalinvasive Strategie für die Instandsetzung auszuarbeiten. Dabei bieten Augmented-Reality-Systeme (AR) eine echtzeitfähige Kommunikationsschnittstelle und Entscheidungsplattform vor Ort.

Wartungsaufgaben in der Luftfahrt werden aufgrund eines geringen Digitalisierungsgrads durch Altsysteme, papierbasierter Dokumentation und einen schlechten Informationsaustausch zwischen den beteiligten Institutionen behindert. Dies hat negative Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und die Kosten von Luftfahrzeugsystemen.

Ein Schwerpunkt der DLR-Forschungsarbeiten besteht in der Erzeugung und Nutzung eines individuellen „Digitalen Zwillings“ zu jedem real existierenden Bauteil. Zur Bewertung eines Schadens an einem Luftfahrzeug wird zukünftig sein virtueller „Digitaler Zwilling“ und alle dort verfügbaren Daten herangezogen, um eine Entscheidung zur Lufttüchtigkeit zu treffen oder eine individuelle, minimalinvasive Strategie für die Instandsetzung auszuarbeiten.

Mixed-Reality-Systeme bieten dabei eine echtzeitfähige Kommunikations- und Entscheidungsplattform für technisches Personal vor Ort. Über das Mixed-Reality-System können zusätzlich Ergebnisse manuell durchgeführter Analysen (z. B. Ultraschall), Analysen integrierter Sensoren (Structural-

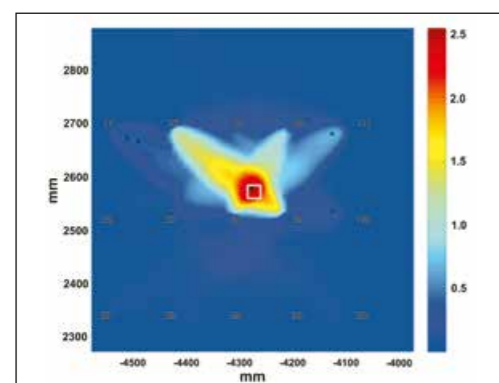


Abb. 1: Detektion einer Delamination in einer CFK-Struktur (Quelle: DLR)

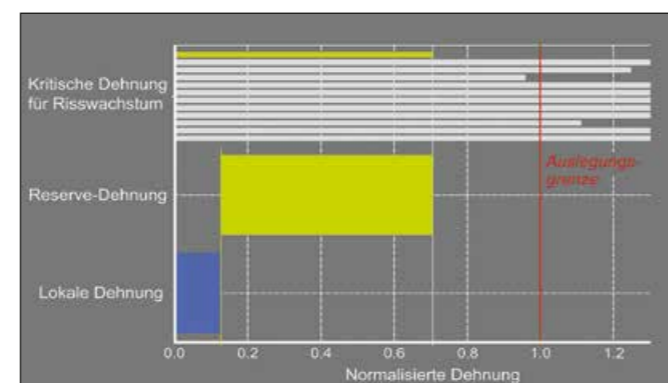


Abb. 2: Bewertung des Schadens unter Berücksichtigung eines semi-analytischen Kriteriums für Delaminationswachstum (Quelle: DLR)

MSc. Marc Garbade  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

Health-Monitoring SHM) und Echtzeit-Schadensanalysen in die Entscheidung einbezogen werden. Diese sind besonders bei der Anwendung auf Strukturbauteile aus Faserverbunden vorteilhaft. Diese Materialien neigen bei Stoßbelastung zu kaum sichtbaren Delaminationen, welche bei einer reinen Sichtkontrolle nicht zuverlässig erkannt werden können.

Eine vielversprechende Methode zur wiederkehrenden Prüfung von Verbundstrukturen ist ein integriertes SHM-System auf Basis von Ultraschall-Wellen (Lamb-Wellen). Mit einem solchen SHM-System können die Strukturelemente eines Luftfahrzeugs auf Schadensereignisse im laufenden Betrieb untersucht werden. Lamb-Wellen können sich in schalenförmigen Strukturen über weite Strecken ausbreiten und sind sehr empfindlich gegenüber einer Vielzahl von Strukturschäden. Das DLR entwickelte verschiedene experimentelle Messverfahren sowie Simulations- und Analysewerkzeuge, um ein detailliertes Verständnis der Ausbreitung von Lambwellen und ihrer Wechselwirkung mit Schäden in Verbundstrukturen zu erhalten. Dieses Verständnis wird genutzt, um SHM-Systeme zu entwerfen und robuste Schadensindikatoren zu entwickeln.

Für die Schadensbewertung wurde ein Restfestigkeitskriterium und eine lineare Beulanalyse verwendet. Vor der Anwendung des Restfestigkeitskriteriums auf die beschädigte Substruktur



Abb. 3: Informationsfluss über die AR-Schnittstelle bei einer Schadensauswertung und Bewertung (Quelle: DLR)

Dipl.-Ing. Michael Hanke  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Braunschweig

pks-wtf@dlr.de

wird die Steifigkeit des Laminats in Abhängigkeit des Schadenszustands reduziert. Eine lineare Beulanalyse nach dem Rayleigh-Ritz-Verfahren wird auf alle Sublamine innerhalb des Laminats angewendet. Der Schaden selbst wird als eine Reihe von Ellipsen beschrieben, was den Prozess der Schadenskartierung vereinfacht und die Gesamtberechnungszeit verringert. Das Ergebnis sind Steifigkeitsabminderungsfaktoren für jedes Sublaminat, welche die anfänglichen Materialeigenschaften jeder Lage innerhalb des beschädigten Bereichs reduzieren.

Die Analyse wird anschließend zur Bestimmung eines Abschlagfaktors herangezogen. Der Faktor bezieht sich auf die reine Druckfestigkeit der ungeschädigten Substruktur und wird als Maß für die Schwere des Schadens verwendet. Diese Informationen können über das AR-System mit allen Beteiligten kommuniziert werden.

Der Nachweis der technischen Umsetzbarkeit wurde an einer Eurofighter-Luftbremse aus Faserverbundmaterial auf der Industriemesse JEC 2019 präsentiert.

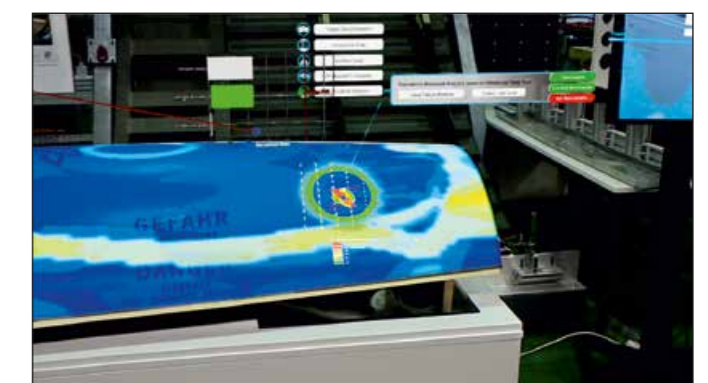


Abb. 4: Perspektive der AR-Brille - Flugzeugkomponente (Eurofighter Airbrake) mit virtueller Bedienung und überlagerter Belastungsverteilung bei maximaler Beanspruchung (Quelle: DLR)



Dr. Barbara Baschung  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)  
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Maxime Chiroti  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)  
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

## Additiver 3D-Druck von Treibladungen

**Durch 3D-Druck-Technologie, eine Bezeichnung für Fertigungsverfahren, bei denen Material schichtweise aufgetragen und so dreidimensionale Objekte erzeugt werden, kann das Leistungsvermögen von pulverbasierten Kanonen erheblich gesteigert werden, da komplex geformte und/oder multi-materielle Treibladungskörner mit optimierten Abbrandcharakteristiken realisiert werden können.**

Additive Herstellungsverfahren wurden erstmals Mitte der 80er Jahre patentiert und erfahren zurzeit einen Aufschwung. Dank der Flexibilität dieser Produktionstechnik können inzwischen verschiedenste Werkstoffe wie Metalllegierungen und Polymere gedruckt werden. Deshalb stoßen additive Herstellungsverfahren auf viel Interesse innerhalb der Verteidigungsindustrie. Für energetische Materialien, wie feste Treibstoffe, wird der 3D-Druck bislang noch nicht verwendet, verspricht jedoch einige fertigungstechnische und leistungssteigernde Vorteile, die weiterer Untersuchungen bedürfen.

Aus diesem Grund lancierte die Europäische Verteidigungsagentur EDA im Jahr 2018 das R&T Projekt „Additive Manufacturing Techniques for Energetic Materials“ (AMTEM) zum Thema 3D-Druck von energetischen Materialien. 7 Länder und 15 Europäische Organisationen arbeiten an diesem Projekt zusammen mit dem Ziel, geeignete 3D-Druckmaterialien und -verfahren für neue, leistungsgesteigerte Treibstoffe zur schnellen und kostengünstigen Herstellung von Prototypen und Kleinserien zu untersuchen.

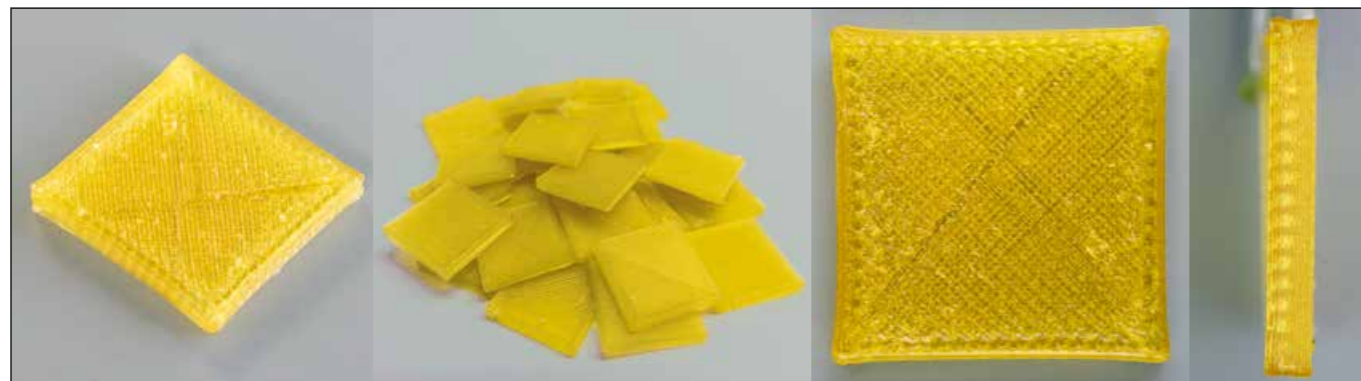


Abb. 1: 3D-gedruckte energetische Blättchen

Das ISL ist dank seines großen Know-hows in der Innenballistik eng in das Projekt eingebunden. In einer früheren Studie konnte an einem experimentellen Waffensystem bereits demonstriert werden, dass durch die Verwendung von multimateriellen Treibladungskörnern die innenballistische Phase optimiert und so die Projektilgeschwindigkeit deutlich gesteigert werden kann. Die Herstellung derartiger Treibladungen war jedoch mit den bisherigen, konventionellen Herstellungsverfahren zu komplex und könnte durch den 3D-Druck vereinfacht werden. Nach einer Literaturstudie der verschiedenen 3D-Drucktechniken wurde entschieden, sich auf die Materialextruder-Technik zu konzentrieren, bei der der ursprüngliche Heißdraht-Extruder durch ein Einspritzsystem ersetzt wird. Dies ermöglicht den Druck viskoser Materialien wie Ladungspasten. Der erste Schritt bestand in der Auswahl der Druckkomposition und der Durchführung von Drucktests und Viskositätsmessungen. Zwei Materialien, eine inerte und eine energetische Paste, mit passenden physikalischen Eigenschaften wurden identifiziert und für weitere Experimente verwendet.

Im zweiten Schritt wurde die inerte Paste, bestehend aus in Aceton gelösten Zelluloseacetat-Partikeln, erfolgreich getestet und wichtige Sicherheitsaspekte des 3D-Drucks untersucht. Es wurden Objekte mit einfacher Formgebung hergestellt, um relevante Parameter, wie Schichtdicke und Druckgeschwindigkeit zu bestimmen und um eine hohe Endqualität sicherzustellen.

Nach den erfolgreichen Experimenten mit dem inerten Material, wurde dieses im dritten Schritt durch die energetische Paste ersetzt. Die Formulierung ist eine gänzlich in Aceton lösliche Paste, deren Viskosität über das Verhältnis zwischen



Abb. 2: Abbrand eines der in Abb. 1 gezeigten Blättchen

Nitrozellulose und Aceton angepasst werden kann. Etwa 100 energetische Körner (Blättchen) wurden gedruckt und eine hohe Reproduzierbarkeit hinsichtlich Form und Dichte konnte ermittelt werden (s. Abb. 1). Die gedruckten Körner werden zurzeit charakterisiert.

Die Untersuchung des Abbrandes 3D-gedruckter Treibladungskörnern ist im Gange (s. Abb. 2). Die Ergebnisse werden mit dem Abbrand traditionell hergestellter Körner verglichen. Die Optimierung der Prozessparameter wird weiter verfolgt, um eine noch höhere Qualität zu erreichen. Dies sollte auch den Druck komplexerer Geometrien für Treibladungen ermöglichen.

Das vorgestellte Verfahren ist vielversprechend und die Arbeit des ISL zeigt deutlich, dass zuverlässig einfache Formen von energetischen Treibladungen mit einem veränderten 3D-Drucker produziert werden können. In den kommenden Monaten werden komplexere Geometrien und die Verwendung verschiedenster Materialien Gegenstand der Forschung sein. Die Untersuchung des Abbrandes von 3D gedruckten reibladungskörnern ist im Gange (s. Abb. 2). Die Ergebnisse werden mit dem Abbrand traditionell hergestellter Körner verglichen. Die Optimierung der Prozessparameter wird weiter verfolgt, um eine noch höhere Qualität zu erreichen. Dies sollte auch den Druck von komplexeren Geometrien für Treibladungen ermöglichen.

Prof. Dr. Ulrike Lechner  
Universität der Bundeswehr München  
Neubiberg

Dipl.-Wirt.-Inf. (FH) Florian Stocker  
Universität der Bundeswehr München  
Neubiberg

Dipl.-Soz. Manfred Hofmeier  
Universität der Bundeswehr München  
Neubiberg

info@unibw.de

info@unibw.de

info@unibw.de

## Resilienz in Produktion und Logistik durch Blockchain

**Wertschöpfungsketten mit Produktion und Logistik sind Risiken ausgesetzt, müssen geschützt werden und bei Unterbrechungen sind Informationen notwendig, um die Versorgung mit Produkten und Dienstleistungen zu sichern. Das Projekt NutriSafe setzt Distributed-Ledger-Technologie – genauer: Blockchain – ein, um Informationsflüsse abzusichern und damit die Resilienz von Wertschöpfungsketten zu erhöhen.**

Leere Lebensmittelregale! – Dieses Szenario mag man sich nicht vorstellen. Die Versorgung mit Lebensmitteln ist essenziell für die Sicherheit der Zivilgesellschaft. Die Wertschöpfungsketten von Lebensmittelproduktion und -logistik gilt es zu schützen, gegenüber menschlichen Fehlern, genau wie vor Cyberangriffen oder angesichts von Naturkatastrophen oder geopolitischen Krisen.

Das Beispiel eines Frühstückbuffets illustriert die Komplexität: Milch, Butter und vielleicht auch das Brot und andere Backwaren kommen aus der Region, andere Produkte aus Europa während Früchte, Tee oder Kaffee aus der ganzen Welt stammen. Die kritische Infrastruktur „Ernährung“ ist eine globale Infrastruktur mit unterschiedlichen Standards in Produktion und Logistik. Kunden oder Händler wollen über Produktionsbedingungen und Transportwege Bescheid wissen. Im Ernstfall müssen Rückrufe oder Rückverfolgungen schnell möglich sein oder Behörden eingreifen können. Verfügbarkeit und Integrität von Informationen ist dafür Voraussetzung. Heute jedoch ist gerade Information unterschiedlichen Cyber Risiken ausgesetzt oder manchmal nicht digital oder nicht in der ganzen Lieferkette



Abb. 1: NutriSafe Impressionen

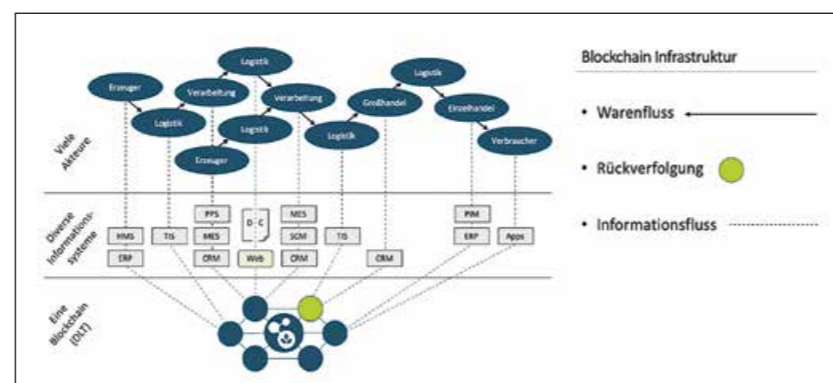


Abb. 2: Architektur

Tim Hoiß, M.Sc.  
Universität der Bundeswehr München  
Neubiberg

info@unibw.de

Andreas Hermann, M.Sc.  
Universität der Bundeswehr München  
Neubiberg

info@unibw.de

verfügbar – eine Situation, die sich in der Digitalisierung als unbefriedigend darstellt. Hier setzt das Forschungsprojekt NutriSafe an und will mit Blockchain-Technologie die durchgängige Verfügbarkeit und Integrität von Informationen sicherstellen.

Blockchain-Technologien sind nicht einfach zu beherrschen und als disruptive Technologie müssen viele Aspekte in Produktion und Logistik neu gestaltet werden. Auf der Basis von Distributed-Ledger-Technologie wird im Projekt eine Blockchain-Infrastruktur entwickelt, mit der zielgerichtet Wertschöpfungsketten mit Produktion und Logistik auf neue Art und Weise aufgebaut werden können. Es werden dafür innovative Geschäftsprozesse, neue Governance-Strukturen und neue Geschäftsmodelle entwickelt. Dabei sollen die neuen Technologien mit tradierten Informationssystemen kompatibel sein und so klassische Datenbanken oder andere betriebliche Informationssysteme integrieren können. Nicht zuletzt soll es ein Spreadsheet-Interface geben – um speziell kleinere Unternehmen an eine Blockchain anschließen zu können. Welche Technologie, welche Menge an Daten, Transaktionen und Anzahl an Partnern in der Praxis in einer Blockchain handhabbar sind, wird durch Simulationen oder Serious Games validiert. Sicherheitsanalysen, Resilienzanalysen und die rechtskonforme Ausgestaltung der Technologie sind weitere Themen in der Forschung von NutriSafe. Die Ergebnisse des Forschungs-

projekts NutriSafe werden als ein Baukasten verfügbar sein. Die Versorgung mit wichtigen Produkten und Dienstleistungen und die dafür notwendigen Informationen sind ein zentrales Thema der Sicherheit. NutriSafe forscht exemplarisch für den Anwendungsbereich Lebensmittelproduktion und -logistik. Die Forschungsergebnisse sind jedoch für andere Anwendungsbereiche anwendbar, in denen viele Informationssysteme verbunden werden, in denen Informationen besonderen Cyber Risiken ausgesetzt sind und in denen Integrität von Informationen wesentlich ist. Die Ergebnisse von NutriSafe helfen, die richtigen Entscheidungen zu treffen und die technische Infrastruktur, die neuen, resilienteren Prozesse und neue Geschäftsmodelle für einen Anwendungsfall zu entwickeln. Nicht zuletzt helfen die Forschungsergebnisse bei der Beurteilung der Verbesserung von Informationssicherheit oder Resilienz durch neue Blockchain-basierte Informationssysteme.

Das Forschungsprojekt NutriSafe ist ein bilaterales deutsch-österreichisches Forschungsvorhaben der zivilen Sicherheit. Das Projekt wird in Deutschland gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Förderprogramm Forschung für die zivile Sicherheit und in Österreich vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie im Förderprogramm für Sicherheitsforschung.



Abb. 3: NutriSafe Partner

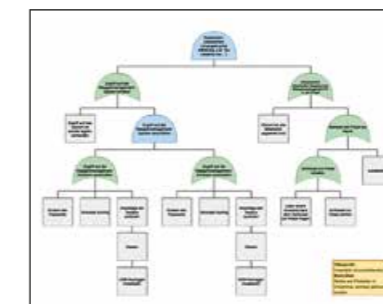


Abb. 4: Attack Tree



Abb. 5: NutriSafe Baukasten

## Shared Information Space Management

**Digitalisierungsaktivitäten wie Sensor2Shooter in MoTIV (Mobile Taktische Informationsverarbeitung) oder das Systemzentrum Digitalisierung Land fordern eine gemeinsame Wissensbasis, den „Shared Information Space“ (SIS). Mit einem verteilten, NetOpFü-fähigen Informationsmanagement entsteht eine transparente Basis für kleinschrittige und steti-**  
**ge Verbesserung im Zusammenwirken aller Akteure über den gesamten Lebenszyklus. So wird Digitalisierung mehr als Technik.**

Auch wenn der Begriff NetOpFü heute vielfach abgegriffen wirkt, haben die Konzepte und Ziele gerade im Licht des Digitalisierungshypes an Aktualität gewonnen. NetOpFü gibt die Richtung der militärischen Digitalisierung vor. Jedoch begeistern sich, wie damals bei NetOpFü, viele Digitalisierungsaktivitäten für technische Lösungsansätze, deren Mehrwert für den Akteur im Einsatz nicht deutlich wird. Der Akteur erwartet nicht nur Technik, sondern eine Aufbereitung aller vom ihm als führungsrelevant erachteten Information, um schneller und präziser auf Basis von Fakten neue Handlungsoptionen zu erkennen, zu selektieren und zu handeln.

Allgemein anerkannt ist, dass heutige der Digitalisierung zugerechnete Techniken wie KI, IoT etc in bekannten Situationen, insbesondere z.B. bei der Reduktion der Datenflut, helfen können. So sind der kreative Vorgang der Führung und eine AdHoc-Fähigkeit in neuen Situationen in Verbindung mit rechtlichen oder ethischen Grundsätzen jedoch Stärken des Menschen. Um die beiden Seiten der Medaille (Datenflut sowie Kreativität) und damit die technischen Ansätze mit dem führenden Akteur zu vereinen, wurden in mehreren F&T-



Abb. 1: UIB – MicroApp als Messenger und Zugang zu Informationsdiensten (Quelle: Bundeswehr)

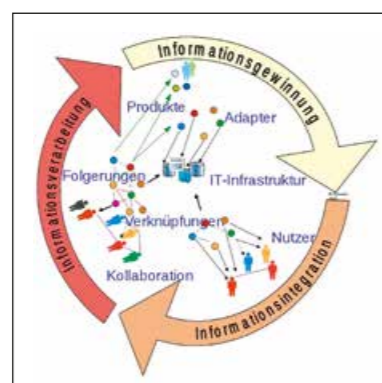


Abb. 2: Informationsmanagement-Kreislauf in den 3 Phasen Informationsgewinnung, Informationsintegration, Informationsverarbeitung (Quelle: Gerhard Schwarz)

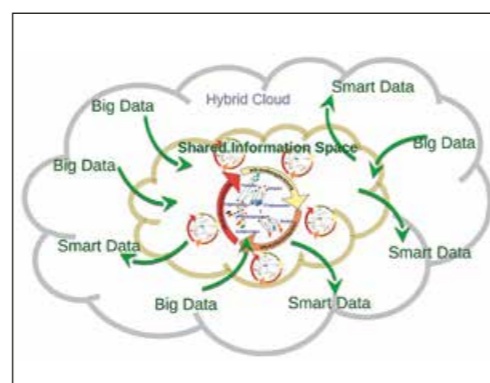


Abb. 3: Mit dem InfoMgmt-Kreislauf im Shared Information Space (SIS) von „big to smart data“! (Quelle: Gerhard Schwarz)

Maßnahmen, zuletzt der „Universellen Informationsbörse I & II (UIB)“ (Abb. 1), prototypisch verschiedene Anwendungsfälle untersucht und ein verteiltes, NetOpFü-fähiges Informationsmanagement (Abb. 2) überprüft.

Neben einer ersten praktischen Implementierung eines Shared Information Space (SIS) lag der Fokus im gleitenden Übergang zwischen Abstraktionsebenen, Kontexten und einer AdHoc-Fähigkeit im Umgang mit neuen Informationsklassen. Diese flexible und dynamische Gestaltung ermöglicht den Paradigmen des Computer Supported Collaborative Work folgend individuelle Lösungen und verwirklicht einen COI-verbindenden, transparenten SIS.

Der Kreislauf (Abb. 2) ist bewusst in Anlehnung an den Führungsprozess generisch gehalten, um allen Abstraktionsebenen von der Datenerfassung über die Analyse bis zum Nutzer offen für eine AdHoc-Gestaltung zu genügen. Der Akteur nutzt den Prozess als Informationsmanager, um die richtigen Informationen und Ressourcen zu verknüpfen, anzustoßen und zeitgerecht die bestmögliche Entscheidung zu treffen. In der technischen Dimension werden Daten aufbereitet, mit unterschiedlichen Informationen, Diensten und Ressourcen verknüpft und verarbeitet (z. B. KI) im Sinne eines „big to smart data“ (Abb. 3). So verteilt und selbstsynchronisierend stellt sich NetOpFü in der Cloud dar.

Die vernetzte Information im Mittelpunkt zeichnet den informationszentrierten Ansatz des SIS als Wissensbasis aus und erlaubt die in MoTIV (Abb. 4) geforderte stufenlos skalierbare Adaption bei der Informationsdichte. Im Prototyp UIB II konnte gezeigt werden, wie Basisdaten einer Kernführungsfähigkeit

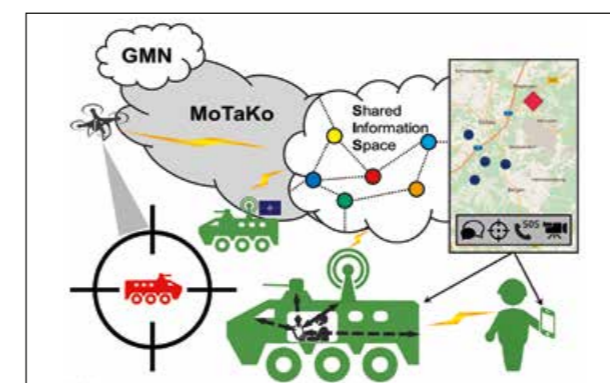


Abb. 4: Der SIS als Informationsdrehscheibe bei MoTIV (Quelle: Bundeswehr)

unter Bedingungen eines „contested environment“ skalieren bis zu multimedialen, informationsdichten Darstellungen unter Breitbandnetzbedingungen.

Auf organisatorischer Ebene hilft der Kreislauf in der Dokumentation gelebter oder neuzuplanender Anwendungen, indem in drei Schritten von der operationellen Ebene NOV-1 (Abb. 5), über die Ableitung NOV-3 als (vereinfachtem) Infomodell mit Informationsaustauschbeziehungen zu einer Systemskizze prototypisch umgesetzt wird. Zum einen eröffnet der Dreiklang flexible Lösungen auf Basis der UIB im Rapid Prototyping als MicroApp – MicroService und zum anderen ist eine Vertiefung mit einer strukturierten Entwicklung jederzeit möglich. Dies stellt einen agil skalierbaren Weg dar, um in der Zukunft „mobil, pervasive, ambient“ zu bestehen.

SIS und zugehöriger InfoMgmt-Kreislauf bilden unter Ausnutzen zeitgemäßer Techniken (Cloud, KI, IoT oder Smart Data) und bewährter Führungsprinzipien mit dem „verteilten = vernetzten“ Akteur eine gemeinsame Wissensbasis. Dann wird Digitalisierung nicht nur ein technisches Erlebnis, sondern den Schritt zu einer auf Informationen und Fakten basierenden Entscheidungsfindung ermöglichen und Entscheidungen „aus dem Bauch heraus“ gehören zur Vergangenheit.

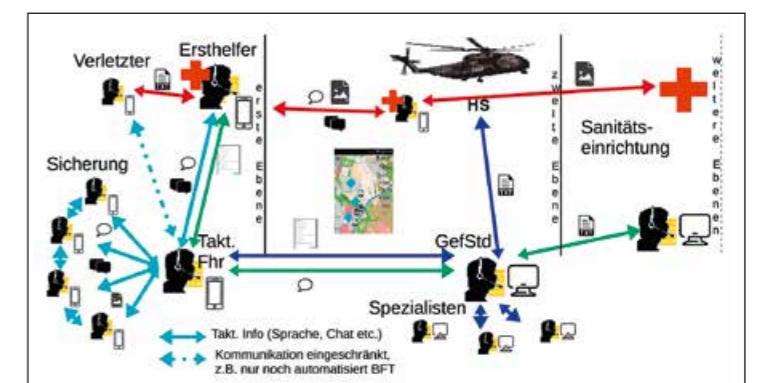


Abb. 5: Informationsmodelle auf operationeller Ebene am Praxisbeispiel MedEvac (Quelle: Gerhard Schwarz)

Artur Blivernitz, M.Sc.  
Universität der Bundeswehr München  
Neubiberg

info@unibw.de

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

info@unibw.de

## Verträglichkeit von Elastomeren mit neuartigen synthetischen Flugturbinenkraftstoffen

**Aufgrund des Bestrebens synthetische Flugkraftstoffe einzusetzen, beschäftigt sich die Universität der Bundeswehr München in Kooperation mit dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) mit der Klärung der Frage, ob bereits eingesetzte Elastomer-Dichtungsmaterialien mit diesen alternativen Energieträgern kompatibel sind. Das übergeordnete Ziel ist die Sicherstellung der Einsatzbereitschaft der Luftfahrzeuge der Bundeswehr.**

Elastomere sind unverzichtbare Werkstoffe für Dichtungen in Luftfahrzeugen jeglicher Art. Die Wahl der richtigen Elastomerart ist dabei essenziell. Aufgrund von Polaritätsunterschieden müssen beispielsweise für Systeme, die Hydraulikflüssigkeiten führen, andere Elastomere verwendet werden als für kraftstoffführende. Wird dies nicht beachtet, kann es zu einer übermäßigen Quellung des Materials, die aus der Sorption des Mediums resultiert, kommen und somit die Funktionalität des entsprechenden Bauteils einschränken oder gar zu dessen Ausfall führen. Die Etablierung synthetischer Flugkraftstoffe als Mischungskomponente für konventionelle Kraftstoffe wirft die Frage auf, ob bereits installierte Elastomerbauteile mit diesen Blends kompatibel sind.

Um diese Frage zu klären, wurden in der Luftfahrt typische Acrylnitril-Butadien-Kautschuke (NBR) sowie ein Fluorsilikonkautschuk in drei unterschiedlichen, alternativen Kraftstoffen sowie einem als Referenz dienenden, konventionellen Jet A-1 bei 20, 50 und 80 °C gelagert. Alle synthetischen Energieträger sind, vergleichbar zu fossilen Brennstoffen, Gemische aus verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen mit variierenden



Abb. 1: Zugversuche an Elastomerproben



Abb. 2: Gaschromatograph/Massenspektrometer (GC/MS) zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Elastomeren.

Prof. Dr. Sebastian Eibl  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe WIWeB  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

Anteilen. Die Kraftstoffe wurden unter dem Gesichtspunkt ausgewählt, dass sie durch etablierte Verfahren gewonnen werden und somit im großen Maßstab verfügbar sind. Einer dieser Herstellungsprozesse umfasst die Kohleverflüssigung mittels Fischer-Tropsch-Synthese. Weitere Verfahren nutzen beispielsweise Speiseölabfälle und andere Triglyceride als Ausgangsstoffe.

Zur Bewertung der Verträglichkeit der Elastomere mit den Kraftstoffen, wurden die Proben nach unterschiedlichen Lagerungsdauern zunächst auf Änderungen in ihren physikalisch-mechanischen Eigenschaften untersucht. Neben der Bestimmung der Dichte- sowie Härte-Werte erfolgte die Durchführung von Zugversuchen (Abb. 1), die Parameter wie Reißfestigkeit und Reißdehnung liefern. Durch die anschließende Analyse mit einem Gaschromatographen/Massenspektrometer (GC/MS, Abb. 2) lässt sich die genaue Zusammensetzung des Elastomers zum jeweiligen Entnahmezeitpunkt bestimmen. Dies ist ein wichtiger Aspekt, da einsatzrelevante physikalisch-mechanische Parameter mit dieser weitestgehend korrelieren. Neben der Kraftstoffaufnahme wird auch die Extraktion der Additive wie beispielsweise der Weichmacher zeitlich verfolgt (Abb. 3).

Die GC/MS-Analyse zeigt, dass Proben einer bestimmten Elastomerart vergleichbar große Aufnahmen der untersuch-

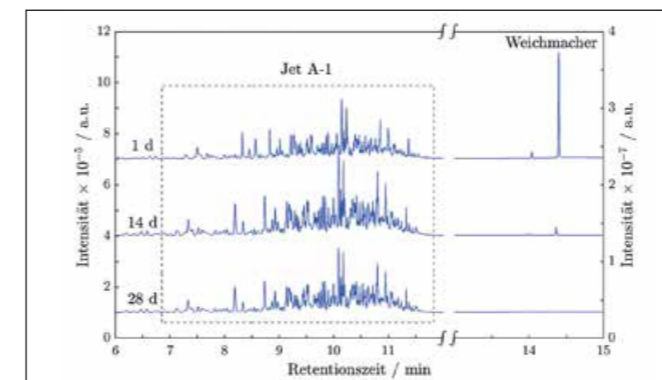


Abb. 3: Chromatogramme einer Elastomerart, die bei 20 °C unterschiedlich lang in Jet A-1 gelagert wurde

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

wiweb@bundeswehr.org

ten alternativen Kraftstoffe sowie des konventionellen Jet A-1 aufweisen. Dies beruht auf der chemischen Ähnlichkeit der synthetischen und fossilen Flugkraftstoffe. Entsprechend ergibt sich eine nahezu identisch ablaufende Extraktion der Additive aus den Materialien (Abb. 4 (A) und (B)). Das Resultat sind annähernd gleiche Quellungsgrade sowie Änderungen der mechanisch-physikalischen Eigenschaften. In der Regel sinken sowohl die Härte als auch die Dichte der Materialien. Gleiches gilt für die Reißfestigkeit und -dehnung (Abb. 4 (C)). Dennoch bestimmt die Art des Polymers wie viel Kraftstoff aufgenommen wird und somit auch den Grad der Eigenschaftsänderungen. Eine Erhöhung der Temperatur beschleunigt im Allgemeinen alle beschriebenen Prozesse.

Die durchgeführten Untersuchungen liefern einen tiefen Einblick in die ablaufenden Diffusionsprozesse und erlauben somit eine zuverlässige Bewertung der Verträglichkeit. Unter Verwendung geeigneter mathematischer Modelle werden die gewonnenen Erkenntnisse dazu genutzt, um die Kompatibilität zwischen Elastomeren und Flugturbinenkraftstoffen vorherzusagen, wobei lediglich die Kraftstoffzusammensetzung bekannt sein muss. Insgesamt trägt die vorgestellte Arbeit dazu bei, den sicheren und zuverlässigen Betrieb von Luftfahrzeugen der Bundeswehr auch weiterhin zu gewährleisten.

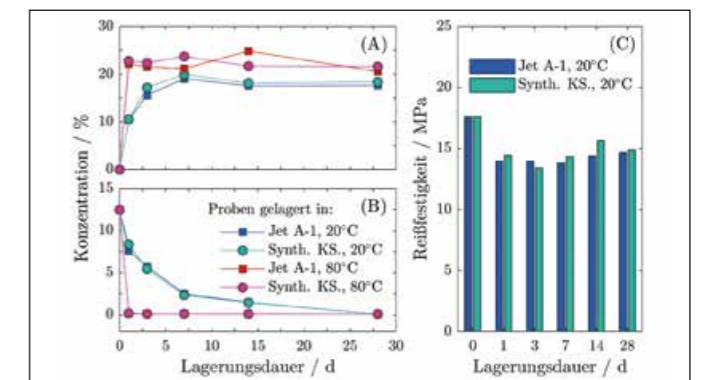


Abb. 4: (A) Kraftstoffaufnahme, (B) Weichmacherextraktion sowie (C) die Reißfestigkeiten von Proben einer Elastomerart, die in Jet A-1 bzw. einem synthetischen Kraftstoff (Synth. KS.) unterschiedlich lang gelagert wurden

Philipp Max, M.Sc.  
Universität der Bundeswehr München,  
Institut für Strahltriebwerke  
Neubiberg

isa@unibw.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Niehuis  
Universität der Bundeswehr München,  
Institut für Strahltriebwerke  
Neubiberg

isa@unibw.de

## Herausforderungen für die nächste Generation Kampfflugzeuge – aktive Strömungsstabilisierung in einem stark konturierten Triebwerkseinlauf

An die Entwicklung moderner militärischer Luftfahrzeuge werden erhebliche Anforderungen in Bezug auf die Reduktion des Systemgewichts und dadurch des Bauraums sowie die Verringerung der Radarsignatur gestellt. Daher müssen militärische Fluggeräte zukünftig noch intensiver als in der Vergangenheit als in sich geschlossenes Gesamtkonzept ausgelegt werden. Um dies zu realisieren, werden u. a. stark konturierte Einlaufsysteme verwendet. Diese bringen jedoch Strömungsstörungen für das Triebwerk mit sich, die durch geeignete Maßnahmen abgeschwächt werden können. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen sowie deren mögliche Einbindung in ein Gesamtsystem wird am Institut für Strahltriebwerke intensiv erforscht.

Typischerweise entstehen in solchen Einlaufkonfigurationen komplexe Wirbelsysteme und Strömungsablösungen, die zu kombinierten Druck- und Drallstörungen in der Austrittsebene des Einlaufsystems führen. Für das Verdichtersystem bedeuten diese Strömungsstörungen eine Verschlechterung des Wirkungsgrades, sowie Einschränkungen im sicheren Betriebsbereich und somit Leistungseinbußen. Mit Hilfe von aktiven strömungsverbessernden Maßnahmen kann diesen unerwünschten Strömungsphänomenen entgegengewirkt werden.

Die Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgeräte der Bundeswehr (WTD61) hat in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strahltriebwerke der Universität der Bundeswehr München in mehreren Forschungsprojekten vielfältige Strömungsuntersuchungen in kompakten, stark konturierten Einlaufsystemen erfolgreich abgeschlossen und weitere Forschungsprojekte initiiert. U. a. wurde ein Forschungseinlauf (MEIRD – Military Engine Intake Research Duct) entwickelt und gefertigt, welcher eine kombinierte Druck- und Drallstörung hervorruft (siehe Abb. 1 und Abb. 2). Um zeit- und kosten-

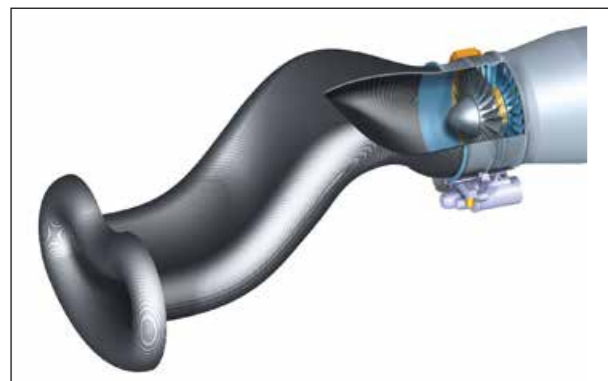


Abb. 1: CAD-Modell des MEIRD Einlaufsystems mit gekoppeltem Larzac 04 Niederdruckverdichter

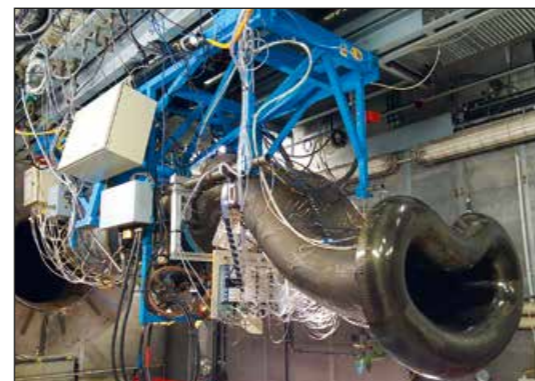


Abb. 2: Experimenteller Versuchsaufbau mit installiertem MEIRD Einlaufsystem und Larzac 04 Versuchstriebwerk in der Triebwerkversuchsanlage des Instituts für Strahltriebwerke

TRDir Dipl.-Ing. (univ.) Michael Krummenauer  
Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgeräte  
der Bundeswehr (WTD61)  
Manching

WTD61AntriebFuT@bundeswehr.org

effektiv eine große Vielzahl von strömungsstabilisierenden Maßnahmen experimentell untersuchen zu können, wurde der MEIRD geometrisch auf einem Modellmaßstab skaliert. So konnten für parametrische Studien mehrere Varianten des skalierten miniMEIRD auf den 3D-Drucksystemen des WIWeB (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe) schnell und kostengünstig gefertigt werden (siehe Abb. 3).

Bei aktiver Strömungsstabilisierung unterscheidet man vornehmlich zwischen Einblasung von zusätzlicher Luft zur Energetisierung der Wandströmung und Absaugung von energiearmen Fluid aus dem Strömungspfad zur Verhinderung von Ablösungserscheinungen. Beide Methoden müssen jedoch sinnvoll eingesetzt werden, weil im ungünstigsten Fall sogar die Gefahr besteht, dass sich das Strömungsfeld weiter verschlechtert. Zur Einschränkung einer geeigneten Auswahl an Auslegungsparametern, wie zum Beispiel Anzahl und Form der Einblase- und Absaugstellen, wurden zunächst Untersuchungen mit CFD-Simulationen durchgeführt. Im zweiten Schritt wurden die entsprechend der CFD festgelegten Parameter im Experiment umgesetzt und im skalierten Maßstab untersucht. Die experimentell gewonnenen Ergebnisse wurden wiederum mit der CFD abgeglichen und das numerische Setup validiert.

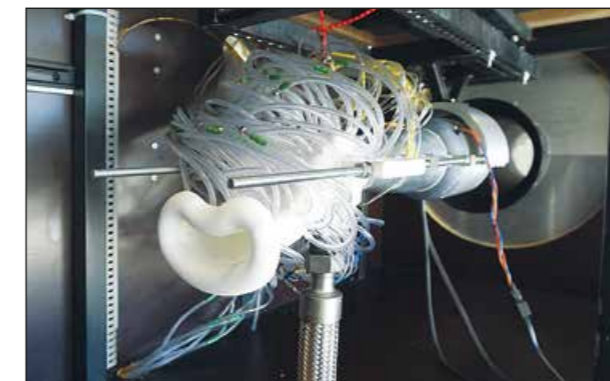


Abb. 3: Experimenteller Versuchsaufbau mit installiertem miniMEIRD Einlaufsystem an der Kleintriebwerksversuchsanlage des Instituts für Strahltriebwerke

Um die Parameter im Experiment einstellen zu können, wurde in den miniMEIRD ein austauschbarer Einsatz konstruiert. Für jeden variierten Parameter der Einblasung bzw. der Absaugung gibt es einen separaten Einsatz. Die Wirksamkeit der einzelnen eingestellten Parameter wurde, wie in Abb. 4 gezeigt, anhand einer Betrachtung des Totaldrucks an der Austrittsfläche des Einlaufes, sowie des sogenannten DC60-Störparameters, bewertet. Ein geringer DC60-Wert steht dabei für eine geringe Störung der Druckverteilung im Einlauf und weniger negative Beeinflussung des Triebwerks. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass sich bei einem Einblasemassenstrom von 3 %, bezogen auf den Triebwerksmassenstrom, der niedrigste DC60-Störparameter einstellt.

Die Simulationsergebnisse zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Weiterhin konnte mittels der Parameterstudie ein effektives Konzept zur aktiven Strömungsstabilisierung konturierter Einläufe entwickelt werden, welches im nächsten Schritt im Originalmaßstab in Kombination mit dem Triebwerk Larzac 04 getestet werden soll.

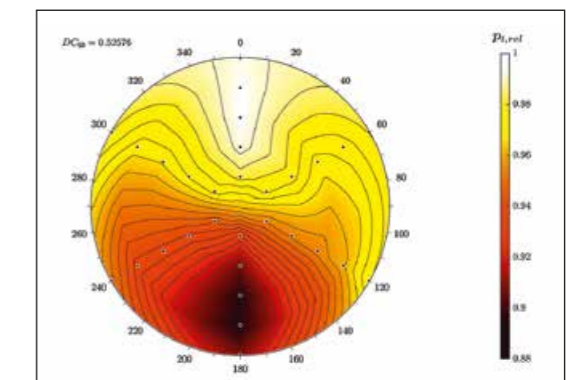


Abb. 4: Auswertung der Totaldruckmessungen am Austritt des miniMEIRD

Dr.-Ing. Marina Plöckl  
HPS GmbH  
München

info@hps-gmbh.com

Dr.-Ing. Ernst K. Pfeiffer  
HPS GmbH  
München

info@hps-gmbh.com

## Sichere Führung durch ad-hoc-Kommunikation mit der Kleinen Entfaltbaren Antenne (KEAN)

Die Entwicklung einer „Kleinen Entfaltbaren Antenne“ hat das Potenzial den Markt für Satellitenkommunikationsterminals zu revolutionieren. Die mit 12 kg extrem leichte Antenne erreicht bei 1,20 m Durchmesser bereits im Prototypenstatus sehr gute Leistungswerte. Im Rucksackgestell transportabel und einsetzbar in jedem Gelände ist diese Antenne prädestiniert für den Einsatz in hochmobilen Trupps.

Kommunikation ist ein entscheidendes Führungsmittel im Einsatz. Für Weitverkehrsverbindungen ist die Satellitenkommunikation unerlässlich. Neben strategischen und taktischen Verbindungen zu festen Bodenstationen spielen in einem dynamischen und hochmobilen Einsatzumfeld zunehmend sehr schnell verlegfähige Terminals eine entscheidende Rolle. Die Terminalklasse bis 1,20 m Durchmesser bieten Datenraten von mehreren Mbit/s und unterstützen gängige Frequenzbänder vom militärischen X-Band über das Ku-Band bis hin zum Ka-Band. Ein großer Nachteil aller heute marktverfügbaren Systeme ist ihr vergleichsweise hohes Gewicht. Zudem müssen die einzelnen Komponenten eines kompletten Systems in teils mehreren Koffern für den Transport verstaut werden, so dass für Transport, Aufbau und Betrieb mehrere Personen notwendig sind.

Hier setzt die Entwicklung der „Kleinen Entfaltbaren Antenne“ (KEAN) der Firma HPS GmbH aus München an. In einem Fördervorhaben des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. entwickelte der Spezialist für entfaltbare Satellitenantennen einen völlig neuen Antennenreflektor (Abb. 1).



Abb. 1: KEAN Antenne im Einsatz im bergigen Gelände (Quelle: HPS GmbH)



Abb. 2: Rucksacksystem der KEAN Antenne zum einfachen Transport (Quelle: HPS GmbH)



Abb. 3: Satellitenkommunikation mit der KEAN Antenne in unwegsamem Gelände (Quelle: HPS GmbH)

Dr.-Ing. Robert Schwarz  
Universität der Bundeswehr München,  
Institut für Informationstechnik  
Neubiberg

office.sp@unibw.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Knopp, MBA  
Universität der Bundeswehr München,  
Institut für Informationstechnik  
Neubiberg

office.sp@unibw.de

Der Reflektor besteht aus insgesamt 12 kohlefaserverstärkten Kunststoffsegmenten (CFK), welche für den Transport auf ein handhabbares Maß zusammengeklappt und auf einem Rucksack-Tragegestell verstaut werden können (Abb. 2 und Abb. 4). 12 Rippen aus CFK dienen als stabile Strukturstütze für die Segmente. Das Dreibein-Stativ mit Teleskoprohren ermöglicht den sicheren Aufbau auch in sehr unebenem Gelände (Abb. 1, 3 und 5).

Besonders beeindruckend ist das äußerst geringe Gewicht des Reflektors von gerade einmal 12 kg. Selbst das Gesamtgewicht des Terminals (Antenne mit Rucksack und Stativ, Low-Noise-Blockdownconverter und Block-Upconverter) liegt derzeit bei lediglich 24 kg. Ist der Reflektor erst auf dem Stativ montiert, entfalten sich die Segmente in nur 15 Sekunden. Rund 15 Minuten später ist das komplette Terminal in Betrieb genommen, d. h. die Antenne ist auf den Satelliten ausgerichtet und eine Verbindung hergestellt. Das Feed-System eines ersten Prototyps wurde für das Ku-Band ausgelegt. Zukünftig sollen auch andere Frequenzbänder wie das X-Band und das militärische Ka-Band unterstützt werden können.

Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des neuartigen Reflektors wurden am Munich Center for Space Communication, einer Referenz- und Testanlage für Satellitenkommunikation

an der Universität der Bundeswehr München, durchgeführt (Abb. 6). In einem Ende-zu-Ende Satellitentest wurde die erreichbare Datenrate über den geostationären Satelliten IS35e von Intelsat ermittelt. Die Ergebnisse konnten die Erwartungen erfüllen. Mit einem 8 W Block-Upconverter erreicht die Antenne eine maximale Sendeleistung von rund 50 dBW. Mit einer Empfangsgüte von knapp 20 dB/K sind somit Datenraten von rund 8 Mbit/s möglich.

HPS arbeitet bereits an einer Weiterentwicklung der KEAN Antenne. Auf der Entwicklungs-Roadmap stehen neben der Verbesserung der Stabilität des Reflektors und des Stativs sowie der Optimierung der Fertigungsprozesse der Segmente und der Mechanik zur vereinfachten und noch schnelleren Ausrichtung der Antenne auch eine praktische Integration der Verstärkerelektronik an den Reflektor. Die Ingenieure von HPS sehen zudem noch Potenzial der Größen- und Gewichtsreduktion. Ein noch geringeres Packmaß und ein Gesamtgewicht von maximal 20 kg ist ihr Ziel. Außerdem soll das Design der Antenne auch für größere Modelle mit Durchmessern von 2,40 m und 3,60 m skaliert werden können. In 2021/2022 soll die Weiterentwicklung abgeschlossen sein.



Abb. 4: Rucksacksystem der KEAN Antenne zum einfachen Transport in steilem und unwegsamem Gelände (Quelle: HPS GmbH)



Abb. 5: KEAN Antenne auf der Kampenwand im Einsatz (Quelle: HPS GmbH)



Abb. 6: Satellitenkommunikation zwischen der KEAN Antenne im Feld und der Referenzanlage an der Universität der Bundeswehr München (Quelle: Universität der Bundeswehr München)

Dan Nussbaum  
Naval Postgraduate School  
Monterey, USA

research@nps.edu

Arnie Dupuy  
Virginia Polytechnic Institute and State University  
Blacksburg, USA

adssupport@vt.edu

## Datenbasierte Optimierung innerhalb von Hybriden Szenarien zur Energiesicherheit – integriertes Reachback Informations System IRIS

Der Analyse und dem Verständnis von Hybrid Threats im Kontext von vernetzten Energiesystemen kommen zukünftig eine große Bedeutung zu. Das interdisziplinäre Forschungsvorhaben widmet sich diesem herausfordernden Kontext. Ziel ist es, Lösungsstrategien mithilfe von Datadriven-Optimization Techniken für verschiedene aktuelle Szenarien zu entwickeln, und diese Konzepte weitreichend in Reachbackprozesse einzubetten. Dazu wird ein integrierter Ansatz gewählt, der es auch zukünftig ermöglichen wird, VR-Visualisierungs-Techniken (VR: Virtual Reality) zu berücksichtigen.

Im Rahmen einer internationalen Forschungskooperation mit der Energy Academic Group (EAG) der Naval Postgraduate School NPS in Monterey und der Arbeitsgruppe COMTESSA der Universität der Bundeswehr München widmet man sich in dem Themenfeld „Datadriven Optimization“ insbesondere der Modellierung von „hybrid threats“ und der Optimierung der „Energieversorgungssicherheit“.

Nicht erst seit Erscheinen des Buches „Blackout“ wurde deutlich, wie verletzlich kritische Infrastrukturen sind und welche weitreichende Auswirkungen allein einzelne Ausfälle als Kaskadeneffekte haben können. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Stefan Pickl hat das Ziel, derartige komplexe Netzwerke zu untersuchen, Kritikalität zu beschreiben und frühzeitig Störungen zu erkennen und auch Verfahren zu entwickeln, um entsprechend darauf reagieren zu können. Im Rahmen des Vorhabens kommt neben allgemeinen Threats auch den sogenannten Cyber Threats eine besondere Bedeutung zu.

In dem Projekt, das als Vorstufe eines Exploratory Teams der NATO angesehen werden kann, werden zunächst verschiedene



Abb. 1: Einsatz von VR-Brillen zur Analyse

Maximilian Moll  
Universität der Bundeswehr München,  
Neubiberg

info@unibw.de

Sorin Nistor  
Universität der Bundeswehr München,  
Neubiberg

info@unibw.de

Son Pham  
Universität der Bundeswehr München,  
Neubiberg

info@unibw.de

Stefan Pickl  
Universität der Bundeswehr München,  
Neubiberg

info@unibw.de

Szenarien durch ein internationales Konsortium definiert. Die verschiedenen beteiligten Partner liefern teilweise national geprägte Szenarien und stellen diese Szenarien in einen allgemeinen Problemzusammenhang. Der Arbeitsgruppe COMTESSA kommt die Aufgabe zu, diese Szenarien als komplexe Graphen und auch als System Dynamics (SD) Modell abzubilden. Anhand eines sektorbasierten Ansatzes sollen Wirkungsbeziehungen schnell erfasst, analysiert und dann auch genutzt werden, um auf diese Bedrohungen entsprechend „optimal“ reagieren zu können. Die betrachteten Szenarien sollen dabei die aktuellen Bedrohungslagen abbilden, und reichen von gewöhnlichen einfachen Anschlagsszenarien bis hin zu aktuell beobachtbaren Multipolar Threats.

Könnte man in der Vergangenheit davon ausgehen, dass es ausreicht, die kritischste Stelle eines Netzwerkes zu identifizieren und diese dann entsprechend zu schützen, so ist heute davon auszugehen, dass auch potentielle Angreifer genau dieser Aspekt bewusst ist. Der Angreifer stellt sich darauf ein, und wird daher eine andere Strategie wählen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es nun, genau solches spieltheoretisches Verhalten als komplexes Defender Attacker Modell zu simulieren und das Verhalten darauf ausgerichtet datenbasiert zu optimieren.

Da bei bestimmten Szenarien die Netzwerke und dadurch auch die möglichen Verhaltensalternativen sehr groß werden, besitzen derartige Probleme eine hohe Komplexität. Aus diesem Grund werden für einzelne Szenarien erstmals auch selektiv quantenbasierte Ansätze im Kontext von Datadriven Optimization angewendet, um zu untersuchen, inwiefern dadurch Verfahren des Operations Research sehr viel schneller angewendet werden könnten. Durch die beschriebenen Ansätze wird es möglich sein, auch „ferne“ Szenarien zu untersuchen. Hierfür werden bestimmte Management Cockpits entwickelt, die ein schnelles übersichtliches Beurteilen ermöglichen. Diese eignen sich anschließend für die Implementierung in einem intelligenten Reachback-Betrieb.

Indem versucht wird eine stark interdisziplinäre Perspektive zu entwickeln, reicht das Forschungsvorhaben über gewöhnliche System-of-Systems Ansätze hinaus. Um dem möglichen Exploratory Team bzw. den Nutzern im Reachbackbetrieb zukünftig eine komfortable Bedienoberfläche zur Verfügung zu stellen, wird man versuchen, die Szenare auch durch den Einsatz von VR-Techniken erfassbar zu machen. Hierzu wird eine Laborumgebung entwickelt, die ein schnelles Beurteilen ermöglicht und erstmals erlaubt, effizient „durch ein solches Netzwerk zu gehen“.

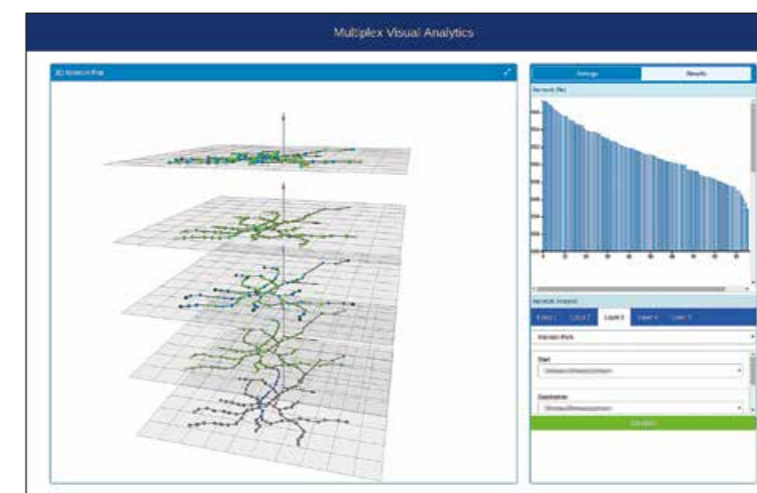


Abb. 2: Visualisierung von mehrschichtigen Netzen

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

pressestelle@hsu-hh.de

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

pressestelle@hsu-hh.de

Kapitänleutnant Sascha Hartig M.Sc.  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

pressestelle@hsu-hh.de

## Effiziente Nutzung der additiven Fertigung zur Ersatzteilversorgung der Streitkräfte

Ersatzteile und deren Fehlen sind Problematiken, die seit der Industrialisierung und der damit einhergehenden Standardisierung eine Herausforderung für Industrieunternehmen wie auch für die Streitkräfte bildet. Das Technologiefeld der additiven Fertigung könnte hier einen Beitrag leisten, um die Verfügbarkeit von Gerät und Einheiten zu erhöhen.

Durch Fortschritte innerhalb der additiven Fertigungstechnologien, konnten über die letzten Jahre hinweg immer größere Prozessstabilitäten und Prozess-Wiederholgenauigkeiten erzielt werden. Durch den Wegfall vieler (auch planerischer) Randbedingungen der konventionellen Fertigungsverfahren sind mit der additiven Fertigung Auftrags-Durchlaufzeiten erreichbar, die durch die konventionelle Fertigung technisch nicht möglich und nicht wirtschaftlich umsetzbar sind. Einsparmöglichkeiten ergeben sich etwa bei der Auswahl und Beschaffung bauteilspezifischer Zerspanungswerkzeuge, dem entfallenden Umspannen (Zeit/Kosten) bei Zerspanungsprozessen und dem Wegfall von Werkzeugen und Formen (Zeit/Kosten) beim Gießen. Weiterhin sind konventionell nicht zu fertigende Designs bis hin zu bionischen Bauweisen, Funktionsgestaltung von Bauteilen, z. B. Performance, thermische und elektrische Eigenschaften in einem Bauteil, möglich. Diese Vorteile können bei der bedarfsgerechten Fertigung von Einzelteilen und kleinen Stückzahlen, wie etwa bei der Ersatzteilproduktion genutzt werden.

Die Ersatzteilherausforderung für die Marine grenzt sich von der der anderen Teilstreitkräfte in dem Sinne ab, als dass durch

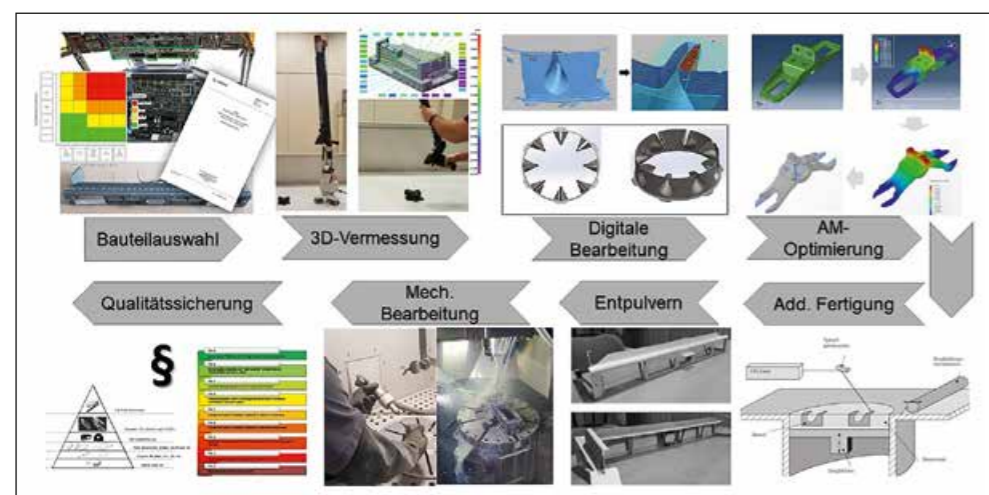


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Reverse-Engineering-Prozesses für den 3D-Druck mit den Teilschritten: Bauteilwahl und Spezifikationsanalyse, 3D-Vermessung und Bearbeitung, AM-gerechte Bauteilauslegung, additive Fertigung, Entpulvern, Wärmebehandlung, Strahlen, mechanische Bearbeitung, Qualitätssicherung.

Tobias Meyer M.Sc.  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Hamburg

pressestelle@hsu-hh.de

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

pressestelle@hsu-hh.de

die Seefahrt eine Versorgung, über den eigenen Vorrat hinaus, nur im jeweils nächsten Hafen möglich ist. Entsprechend per additiver Verfahren hergestellte Ersatzteile könnten hier vorerst für eine Behelfsinstandsetzung auf See genutzt werden, bis die regulären Ersatzteile nachversorgt werden können. Hierdurch könnte die Zeit zwischen Auftreten des Defekts und der Wiederherstellung der Funktionsbereitschaft der Anlage bzw. der Einheit erheblich verkürzt werden.

Die digitale Grundlage der additiven Nachfertigung, das 3D-Modell, kann je nach Komplexität des defekten Bauteils mit einfachen Mitteln, wie z. B. einem Messschieber, und einem Konstruktionsprogramm direkt vor Ort erstellt werden. Alternativ kann eine digitale Vorlage mittels Reverse Engineering (logische Rückanalyse technischer Details, Funktionsweisen und Konstruktionselementen z. B. mit Scanverfahren und anschließender digitaler Aufbereitung) durch das 3D-Druckzentrum der Bundeswehr am Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) erzeugt und hergestellt werden. Technisch simple, nicht kritische Bauteile aus Kunststoff können auch am Ort der Instandsetzung hergestellt werden.

Um sich dem Thema der Ersatzteilversorgung unter Nutzung additiver Fertigungsverfahren anzunähern, wird im Projekte

„Wege zur effizienten Nutzung additiver Fertigung für bestehende Bauteile aus Metallen und Kunststoffen in der Bundeswehr“ (AddiMuK), einem Kooperationsprojekt des WIWeB (Projekträger) und dem Laboratorium Fertigungstechnik der Universität der Bundeswehr in Hamburg, die Eignung additiver Fertigungstechnologien zum Zwecke der anteiligen Reduzierung von Ersatzteilengpässen innerhalb der gesamten Bundeswehr untersucht.

Ein Fallbeispiel für die Marine ist der Filtereinsatz der Proviantkälteanlage aus dem Seekühlwasserkreis der Korvette K130. Dieser Einsatz kann derzeit nur in Kombination mit dem Filtergehäuse als Satz beschafft werden. Aufgrund der einfachen Geometrie wurden die Funktionsmaße mittels eines Messschiebers aufgenommen und ein für die Fertigung, mittels additiver Verfahren, optimiertes digitales Modell erstellt.

Die Filtereinsätze wurden im Verlauf der laufenden Studie in unterschiedlichen Materialien, sowie verschiedenen additiven Herstellungsverfahren hergestellt. Dabei soll geprüft werden, ob eine Fertigung an Bord mit technisch simplen Verfahren, wie z. B. Fused Filament Fabrication (FFF)-Drucker in verschiedenen Ausführungen, möglich ist. Eine erste Erprobung additiver Fertigung an Bord von Einheiten der deutschen Marine ist für Mitte 2020 unter Leitung des WIWeB beabsichtigt.



Abb. 2: Originaler Seefiltereinsatz für Proviantkälteanlage Korvette K130 mit Korrosionserscheinungen



Abb. 3: Im FFF-Verfahren hergestellter Seefiltereinsatz für Korvette K130 aus Thermoplastischem Polyurethan (TPU) 98A



Dr.-Ing. Lars Ole Fichte  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Fakultät für Elektrotechnik  
Hamburg

forschung@hsu-hh.de

Prof. Dr. rer. nat Marcus Stierner  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Fakultät für Elektrotechnik  
Hamburg

forschung@hsu-hh.de

## Kontaktfreie Bestimmung der kritischen Einkoppelfrequenzen von elektrischen Geräten

**Standard-EMV-Tests (EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit) erfüllen nicht die Anforderungen einer schnellen, einfachen und billigen Messmethode, die im Idealfall zuverlässige Informationen zu den kritischen Frequenzen liefert, bei denen externe Signale ein elektronisches Gerät stören können. Ein spektrographischer Ansatz wäre also zu sehr begrüßen. Folglich wenden wir die Idee der Mikrowellen-spektroskopie an, um mögliche Resonanzen elektronischer Geräte zu erfassen.**

Die Charakterisierung der Störanfälligkeit elektronischer Systeme bleibt eine Herausforderung, da die Exposition gegenüber parasitären Feldern vorhergesagt werden muss. Vorbehaltlich zufälliger Variablen erfordert die Beschreibung einer stochastischen Exposition die Modellierung physikalischer Phänomene im Zusammenhang mit der elektromagnetischen Quelle und den physikalischen Eigenschaften des Prüflings. Eine der Testumgebungen, die die Simulation eines stochastischen Prozesses ermöglicht, ist die elektromagnetische Modenverwirbelungskammer (MVK).

Bei übermodierten Hohlraumresonatoren, die mit einem Modenrührer ausgestattet sind, hat sich gezeigt, dass die Statistik der Feldamplitude im Arbeitsvolumen gleichverteilt ist. Hauptziel ist es, mit einem Modenrührer ein statistisch gleichverteiltes elektromagnetisches Feld im Sinne von Homogenität (Gleichmäßigkeit hinsichtlich des Ortes) und Isotropie (Gleichmäßigkeit hinsichtlich der Polarisation) des Feldes zu erzeugen. Diese Eigenschaften hängen direkt mit der Anzahl der signifikant angeregten Moden und der Güte der Kammer zusammen.



Abb. 1: Elektromagnetische Modenverwirbelungskammer mit Modenrührer und Antennen zur Ein- und Auskopplung elektrischer Leistung

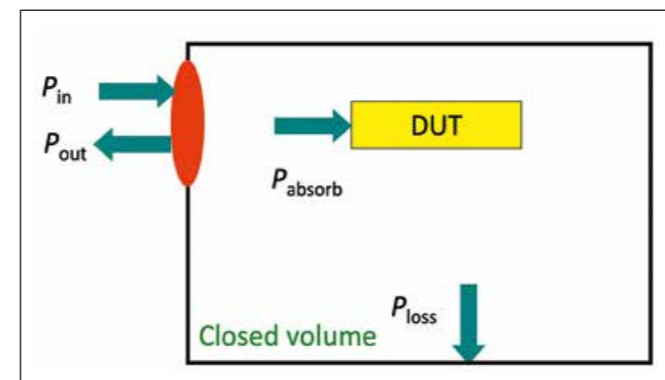


Abb. 2: Leistungsbilanz der Modenverwirbelungskammer. Die verbrauchte Leistung der leeren Kammer (ohne DUT) wird von der der beladenen Kammer subtrahiert. Die Differenz entspricht der vom im Prüfling aufgenommenen Leistung

Dr. Martin Schaarschmidt  
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologie –  
ABC-Schutz (WIS)  
Munster

WISposteingang@bundeswehr.org

Bei Planung und Bau einer Modenverwirbelungskammer wird die Größe des Testraums so festgelegt, dass die niedrigste nutzbare Frequenz (LUF) das für die Suszeptibilitätsbewertung relevante Frequenzband abdeckt und das Arbeitsvolumen das zu testende Gerät unter Berücksichtigung aufnehmen kann. Der minimaler Abstand zwischen dem Prüfling und den Wänden liegt bei einem Viertel der längsten Wellenlänge. Der Einfachheit halber besteht eine MVK aus einem abgeschirmten Metallgehäuse (also einem elektromagnetischem Hohlraumresonator) mit einer Art Modenrührsystem.

Die hier angewandte Leistungsspektroskopie ist eine Messmethode, mit der diejenigen Kopplungsfrequenzen identifiziert werden können, bei denen elektromagnetische Felder in ein unbekanntes elektronisches Gerät einkoppeln. Das Verfahren bestimmt zerstörungsfrei die vom Prüfling als Funktion der Frequenz aufgenommene Leistung über die Differenz zwischen der in einer beladenen elektromagnetischen und der in einer unbeladenen MVK verbrauchten Leistung.

Zur Messung von Leistungsspektren werden in die MVK zwei Antennen eingebracht (eine Sende- und eine Empfangsantenne), die an einen Vector Network Analyzer (VNA) angeschlossen sind. Der VNA wird als Hochfrequenzgenerator erwendet, um in der MVK ein E-Feld zu erzeugen und Streuparameter (S-Parameter)

zu messen. Die Kammer muss die Anforderungen der Norm IEC61000-4-21 in Bezug auf Rührwirkungsgrad, Größe, Kalibrierung und DUT-Position (Device Under Test) erfüllen, um ordnungsgemäße Messungen zu ermöglichen. Im Idealfall wird sichergestellt, dass die Größe aller Komponenten des elektrischen Feldvektors eine Rayleigh-Verteilung besitzt.

Die Signifikanz der Ergebnisse wird durch Anwenden eines statistischen Wiederherstellungsverfahrens von Resonanzen erhöht, anstatt direkt nach Absorptionsmaxima zu suchen, d. h. durch Anpassen eines relevanten parametrischen Modells an die gemessenen Daten. Um alle Resonanzmoden des Prüflings zu erfassen, muss ein allgemeineres parametrisches Modell eingeführt werden. Hier wurde ein physikalisches Modell für einen zur Validierung verwendeten unimodalen Resonator abgeleitet und die gemessenen Daten mit dem CF-Tool von Matlab an die resultierende Lorentz-Kurve angepasst. Die Ergebnisse zeigen, dass Resonanzfrequenzen mit diesem Verfahren mit einer Abweichung von weniger als 2 % in Bezug auf die ursprünglichen Daten, identifiziert werden können.

Damit existiert eine Methode, mit der Koppelfrequenzen präzise und sicher, berührungslos und bei sehr geringen Feldstärken ermittelt werden können. Anwendungsgebiete sind z. B. die EMV oder Munitionstests.

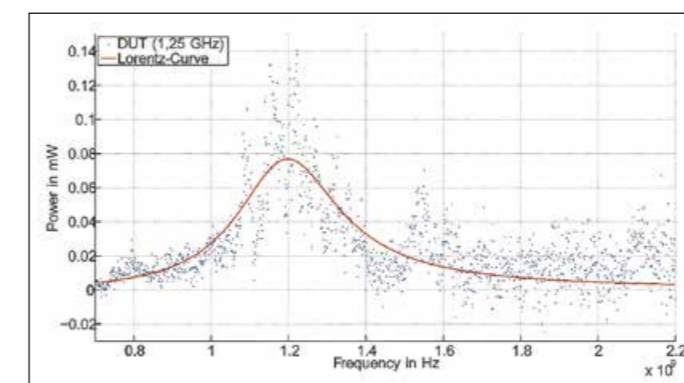


Abb. 3: Messergebnis für einen generischen Prüfling mit einer bekannten Koppelfrequenz von 1,25 GHz. Jeder blaue Punkt repräsentiert eine einzelne Messung. Die rote Kurve ist dein mit dem CF-Tool von MatLab gefittete Kurve mit einer Mittenfrequenz von 1,27 GHz

M.Eng. Tobias Bauerochs  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Fakultät für Elektrotechnik  
Hamburg

forschung@hsu-hh.de

Dr.-Ing. Stephan Ulrich  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Fakultät für Elektrotechnik  
Hamburg

forschung@hsu-hh.de

## Visualisierung elektrorheologischer Fluide

**Wenn sich eine elektrorheologische Flüssigkeit zwischen zwei Elektroden befindet und eine elektrische Spannung an diese angelegt wird, bewegen sich die Partikel in der Flüssigkeit und bilden Ketten entlang der elektrischen Feldlinien. Dieses Phänomen wird als elektrorheologischer Effekt bezeichnet. Das genaue Verhalten der Partikel ist noch nicht vollständig verstanden und wurde daher untersucht.**

Elektrorheologische (ER) Suspensionen bestehen z. B. aus Silikonöl und Polyurethanpartikeln. Bei diesen Flüssigkeiten sind Änderungen des Fließverhaltens durch elektrische Felder schnell und reversibel möglich, was als ER-Effekt bezeichnet wird. Dieser kann durch das Anlegen eines elektrischen Feldes erzeugt werden und aufgrund der Polarität der Partikel entstehen Ketten entlang der elektrischen Feldlinien, welche zu einer Viskositätserhöhung führen. Nutzbar ist diese z. B. bei Ventilen oder Dämpfern, um damit Fließkanäle zu sperren und Druckdifferenzen zu generieren.

Der ER-Effekt, der in einer Suspension mit einem angelegten elektrischen Feld entsteht, ist noch nicht komplett erforscht. Es ist jedoch wichtig zu wissen, wie die Viskositätserhöhung erfolgt und damit wie der Effekt funktioniert, um Applikationen optimal zu gestalten. Der Effekt und seine Reaktion auf verschiedene elektrische Spannungsformen mit unterschiedlichen Frequenzen in einem Miniatur-Ventil wurden untersucht und mit Hilfe eines Mikroskops visualisiert. Zusätzlich fand eine Untersuchung mittels hochdynamischer Bildgebung statt, um das Partikelverhalten innerhalb der

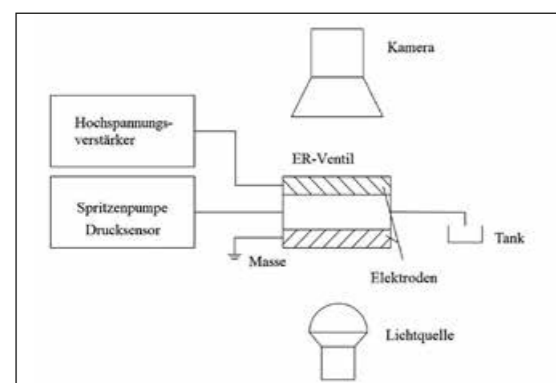


Abb. 1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus

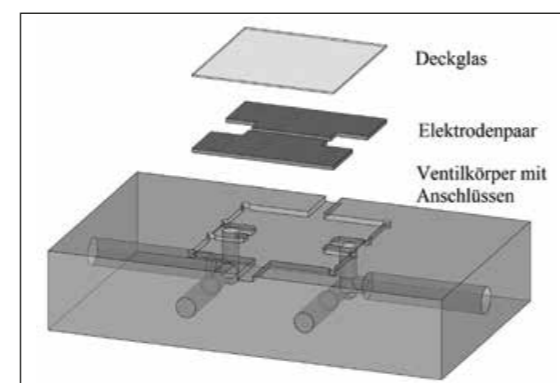


Abb. 2: Elektrorheologisches Ventil in Explosionsansicht

Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Fakultät für Elektrotechnik  
Hamburg

forschung@hsu-hh.de

Dr.-Ing. Steffen Schneider  
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe WIWeB  
Erding

wiweb@bundeswehr.org

ersten Millisekunden nach Anlegen eines elektrischen Feldes zu visualisieren.

Diese hochdynamischen Aufnahmen wurden in der Forschung bisher nicht hinlänglich untersucht. Ein Grund dafür ist, dass die bildgebende Technik noch nicht ausreichend entwickelt war, um Aufnahmen mit ausreichend hoher Qualität bei gleichzeitig sehr hoher Bildrate herzustellen. Es wurden optische Untersuchungen der Partikelbewegung oder des Verhaltens durchgeführt, wobei der hochdynamische Bereich direkt nach Anlegen eines elektrischen Feldes nicht berücksichtigt wurde. Diese Untersuchungen sollen helfen zu erklären, wie sich die Partikel verhalten, wenn sie auf ein elektrisches Feld treffen und versuchen, sich entlang dessen auszurichten. Es wurde untersucht, wie sich diese Ketten in einem Mikrokanal innerhalb von Millisekunden entwickeln. Eine Hochgeschwindigkeitskamera nimmt dabei das Anlegen eines elektrischen Feldes in den ersten Millisekunden mit 3000 Bildern pro Sekunde auf. Die Ergebnisse liefern ein besseres Verständnis der Kettenbildung und des Partikelverhaltens des elektrorheologischen Effekts im hochdynamischen Bereich und können sowohl für die Auslegung elektrorheologischer Anwendungen als auch für Simulationen der Partikelbewegung genutzt werden. In den unten dargestellten Grafiken zeigen zwei Bilder Aufnahmen der Kettenbildung bei einer elektrischen Feldstärke

von 2 kV/mm und nach einer Zeit von 750 ms. Die erste Aufnahme wurde ohne Volumenstrom der elektrorheologischen Flüssigkeit aufgenommen, das zweite Bild zeigt die Kettenbildung bei 500 µl/min.

In militärischen Anwendungen können diese Systeme kleine und hochdynamische Geräte oder Flugkörper steuern. Gewichts- und Raumvorteile entstehen durch eine hohe Kraftdichte und eine zentrale Leistungsversorgung. Regelungs- und Steuerungsmöglichkeiten sind mit elektrorheologischen Mikroventilen verbesserbar, da hohe Stellfrequenzen für das Folgen vorgesehener Flugbahnen notwendig sind. Leichte und kompakte Multiaktorsysteme können Einsatz in Exoskeletten finden, um Unterstützung bei alltäglichen oder komplexen Aufgaben zu bieten. Des Weiteren können solche elektrorheologischen Systeme in kleineren Robotern oder unbemannten Fahrzeugen eingesetzt werden.

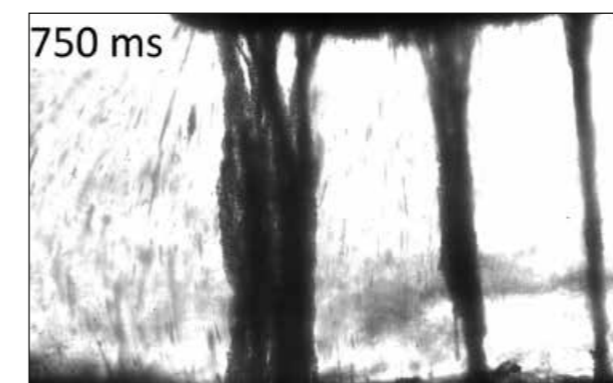


Abb. 3: Kettenbildung bei 0 µl pro Minute und 2 kV pro mm nach 750 ms

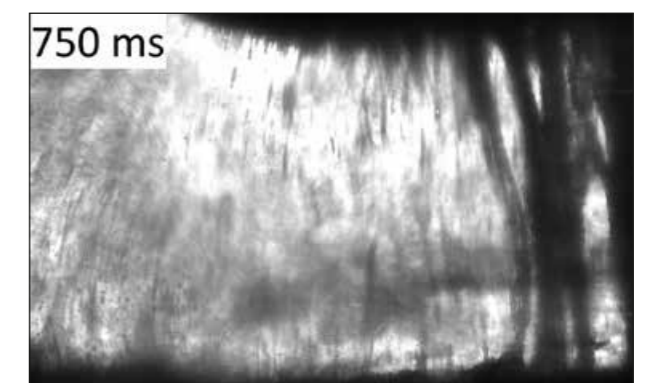


Abb. 4: Kettenbildung bei 500 µl pro Minute und 2 kV pro mm nach 750 ms

ORR'in Dr. Katharina Schmidt  
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien –  
ABC-Schutz (WIS)  
Munster

RDir Berthold Römer  
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien –  
ABC-Schutz (WIS)  
Munster

WISposteingang@bundeswehr.org

WISposteingang@bundeswehr.org

## Aufbau einer Prüfumgebung zur Strahlungsqualifizierung von Wehrmaterial

**Im Rahmen eines ausgewogenen Nuklearschutzes muss Wehrmaterial eine angemessene Funktionsfähigkeit während und nach hoher Exposition durch ionisierende Strahlung gewährleisten. Um die Fähigkeiten zur Analyse und Bewertung von Härungsmaßnahmen weiter zu entwickeln und an die aktuellen Bedrohungen durch geänderte Nuklearstrategien anzupassen, wurde am WIS ein hochmoderner Neutronengenerator installiert und seine Leistungsfähigkeit nachgewiesen.**

Besonders durch den Einsatz von nicht-strategischen Kernwaffen kann Wehrmaterial einer hohen Exposition durch ionisierende Strahlung ausgesetzt sein. Dies kann, insbesondere in elektronischen Bauteilen, zum Auftreten von Funktionsfehlern bis hin zum Ausfall führen. Um die Eignung der verwendeten Materialien zu verifizieren und die Härte von Wehrmaterial zu verbessern, müssen die Strahlungsanteile einer Kernwaffe experimentell mit geeigneten Versuchsanlagen simuliert und die Fehlermechanismen analysiert werden. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf gepulster und kontinuierlicher Gamma- und Neutronenstrahlung.

Seit mehreren Jahren fehlte am WIS die Möglichkeit zur Erzeugung von Neutronenstrahlung in entsprechender Qualität und Stärke. Grund dafür war, dass der Betrieb des damaligen Neutronengenerators Anfang der 2010er Jahre altersbedingt eingestellt wurde. Dieses Gerät erzeugte monoenergetische Neutronen mit einer Energie von ca. 14 MeV durch die Fusion von Deuterium-Atomen mit Tritium-Atomen (DT-Reaktion). Auf der Suche nach einem geeigneten leistungsstarken Ersatz bot der Markt zunächst keine akzeptable Lösung. Schließlich

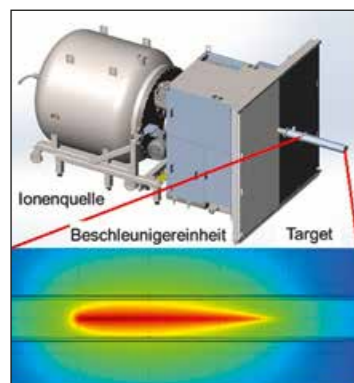


Abb. 1: Schematische Darstellung des Neutronengenerators und der Verteilung des Neutronenflusses am Target (Quelle: Phoenix Wisconsin/WIS Munster)



Abb. 2: Aufbau des Neutronengenerators am WIS (Quelle: WIS Munster)

LRDir Dr. Ronald Rambousky  
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien –  
ABC-Schutz (WIS)  
Munster

WISposteingang@bundeswehr.org

wurde auf ein neu entwickeltes innovatives Konzept zurückgegriffen, das durch die Herstellerfirma individuell an die speziellen Anforderungen der Betriebsumgebung und der zu erfüllenden Aufgaben angepasst wurde.

Die Anforderungen an die Neutronenstrahlung ergeben sich aus den betrachteten nuklearen Szenarien. Sie unterscheiden sich insbesondere durch die Energiespektren, die Zeitverläufe und die Fluenzen (Strahlungsteilchen pro Fläche). Bei der eingesetzten Anlage werden die Neutronen durch die Fusion zweier Deuterium-Atome erzeugt (DD-Reaktion) und entlang eines ausgedehnten Targets emittiert. Durch den Verzicht auf ein Tritium-Target ist keine permanente radioaktive Quelle vorhanden. Das bringt unter Strahlenschutzaspekten deutliche Vorteile für den Betrieb der Anlage auf einer Dienststelle. Da allerdings der Wirkungsquerschnitt der DD-Fusionsreaktion deutlich unter dem der DT-Fusionsreaktion liegt, musste dies in der Vergangenheit mit Einbußen im Neutronenfluss erkauft werden. Dank einer durch den Hersteller neu entwickelten Target-Technologie, kann trotz des Wechsels zur DD-Reaktion ein mit dem alten Generator vergleichbarer Neutronenfluss erreicht werden.

Nach umfangreichen Vorbereitungen am WIS um die technischen und administrativen Voraussetzungen zu schaffen,

konnte diese neue Anlage 2019 aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Im Anschluss wurde seine Leistungsfähigkeit demonstriert. Die Bestimmung des Neutronenflusses erfolgte durch die Auswertung von zuvor aktivierten Metallfolien in Kombination mit numerischen Monte-Carlo Methoden. Außerdem wurden mit verschiedenen Detektortechnologien Messungen des Neutronenflusses und der Gamma- und Neutronendosisleistung direkt am Target und an verschiedenen Orten im Gebäude und im umliegenden Außenbereich durchgeführt.

Damit stehen zukünftig bis zu 3 mal 10<sup>11</sup> Neutronen pro Sekunde für Prüfungen von Wehrmaterial und zu Forschungszwecken zur Verfügung. Die Energien der erzeugten Neutronen von etwa 2 MeV in der DD-Reaktion entsprechen, im Vergleich zu 14 MeV Neutronen, deutlich besser der Neutronenumgebung einer Kernwaffenexplosion in für den ausgewogenen Nuklearschutz relevanten Entfernungen zum Bodennullpunkt.

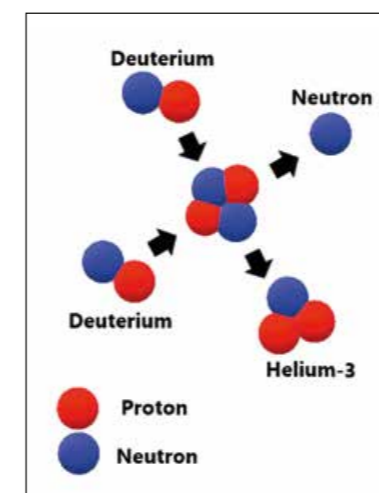


Abb. 3: Deuterium – Deuterium Fusionsreaktion (Quelle: WIS Munster)

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

wiweb@bundeswehr.org

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

wiweb@bundeswehr.org

## Hydrierende Entschwefelung von Dieselkraftstoff

**Dieseldieselkraftstoff ist der wichtigste Energieträger für Land-systeme, kann aber in einigen Einsatzgebieten eine stark verminderte Qualität aufweisen. Experimente zur katalyti-schen Hydrierung von Dieseldieselkraftstoff aus Afrika und dem Irak zeigen, dass sich neben der signifikanten Reduktion des Schwefelgehalts weitere Eigenschaften verbessern lassen.**

In den Einsatzgebieten der Bundeswehr weist der lokal er-hältliche Dieseldieselkraftstoff oft eine deutlich beeinträchtigte Qualität auf, die sich unter anderem in stark erhöhten Schwe-felgehalten und schlechten Verbrennungseigenschaften zeigt. Dies führt zur Entstehung korrosiver Abgase und in der Folge zu Materialschäden. Auch kommt es zu einer vermehrten Rußbildung, was sich unter anderem auf die optische Signatur der Fahrzeuge auswirkt.

Es gilt daher, Möglichkeiten zur Aufbereitung solch qualitativ minderwertiger Kraftstoffe unter militärischen Rahmenbe-dingungen zu erforschen. Als potentieller geeigneter Prozess wurde die hydrierende Entschwefelung identifiziert (Abb. 1). Dabei soll zum einen das eigentlich großtechnisch genutzte Verfahren auf eine mobile, containerbasierte Variante herunter-skaliert werden. Zum anderen muss gezeigt werden, dass ein entsprechend hydrierter Kraftstoff in seiner chemisch-physika-lischen Beschaffenheit den Anforderungen militärischer Systeme genügt.

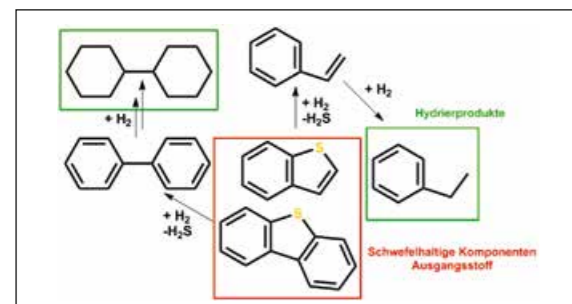


Abb. 1: Exemplarische Abbaupfade für typischerweise in Dieseldieselkraftstoff enthaltene schwefelhaltige Komponenten



Abb. 2: Rieselbettreaktor (links) als Teil einer ersten Versuchsanlage an der TU Bergakademie Freiberg (rechts)

Dr.-Ing. Thomas Kuchling  
TU Bergakademie Freiberg  
Freiberg

presse@zuv.tu-freiberg.de

Um zunächst Erkenntnisse über den Einfluss der hydrieren-den Entschwefelung auf die Qualität von bereits raffinierten Dieseldieselkraftstoff zu gewinnen, wurde Dieseldieselkraftstoff aus Einsatzgebieten der Bundeswehr in einem Rieselbettreaktor (Abb. 2) unter Nutzung eines NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Katalysators hydriert. Hierbei optimierte man die Parameter Temperatur, Druck und H<sub>2</sub>/Kraftstoff-Verhältnis hinsichtlich einer hohen Entschwefelungseffizienz und eines gleichzeitig geringen Reaktandenverbrauchs. Die effiziente Entfernung des bei der Hydrierung gebildeten hochgiftigen Schwefelwasserstoffs konnte durch Stripping mit Stickstoff erreicht werden.

Die anschließende chemisch-physikalische und gaschroma-tographisch-massenspektrometrische Analyse (Abb. 3) der hydrierten Kraftstoffe zeigte neben einer signifikanten Reduk-tion des Schwefelgehalts (Abb. 4) eine wesentliche Verbesserung weiterer Kraftstoffeigenschaften. Die Senkung des Gehalts an polyzyklischen Aromaten z. B. begünstigt wiederum eine rußärmere Verbrennung. Des Weiteren konnte eine Anhebung der Zündwilligkeit (Cetanzahl) beobachtet werden. Letzteres lässt sich auf die Sättigung aromatischer Kohlenwasserstoffe zurückführen. Hierbei entsteht im Hinblick auf die Entschwe-felung zwar ein erhöhter Wasserstoffverbrauch, dieser stellte sich jedoch als gewinnbringend dar.

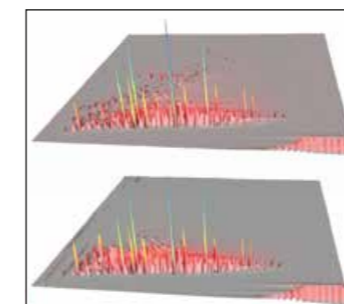


Abb. 3: 3D-Darstellung der GCxGC-MS Untersuchungen an Ausgangsprodukt (oben) und Hydrierprodukt (unten)

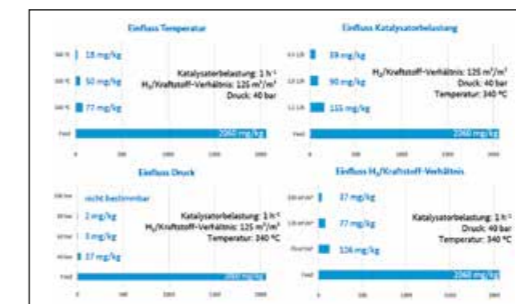


Abb. 4: Schwefelgehalt der Hydrierprodukte in Abhängig-keit der Prozessbedingungen



Abb. 5: Dieseldieselkraftstoff aus Mali (links), Produkt nach hydrierender Entschwefelung bei unterschiedlichen Drücken (Mitte und rechts)

Die hydrierende Entschwefelung stellt somit ein geeignetes Verfahren für eine effiziente Qualitätsverbesserung minderwertiger Dieseldieselkraftstoffe dar (Abb. 5). Der erhaltene Kraftstoff kann auch in technisch anspruchsvollsten Systemen genutzt werden, ohne diese zu schädigen.

Im nächsten Schritt soll nun ein Demonstrator konzipiert werden, um das Verfahren in eine feldtaugliche (container-basierte) und unter militärischen Rahmenbedingungen nutz-bare Lösung zu übertragen.

TRDir Horst Zils  
 Wehrtechnische Dienststelle für landgebundene Fahrzeugsysteme,  
 Pionier- und Truppentechnik WTD 41  
 Trier

WTD41posteingang@bundeswehr.org

## Bundeswehr-Liegenschaften energieeffizient betreiben durch automatisierte Analyse von Betriebsdaten

Die Forschung und Anwendung von Verfahren der Datenanalyse zur Fehlererkennung und Diagnose sowie zur Optimierung des energieeffizienten Betriebes von Gebäuden und Liegenschaften ist eine relativ junge Disziplin. Für das von der European Defence Organisation (EDA) ausgerichtete Consultation Forum for Sustainable Energy in Defence und Security Sector Phase II (CF SEDSS II) wurde durch das BMVg ein – durch die WTD 41 erarbeitetes – Project Proposal zu „ENERGY DATA ANALYSIS Technologies in a military context“ eingereicht. Mehrere Staaten haben Interesse gezeigt, das Thema gemeinsam weiter zu erforschen.

Die Aufgabenstellung verfolgt einen Ansatz, bei dem ein einheitlicher Mindestdatensatz definiert wird, der sowohl Energie- und Leistungsdaten in Liegenschaftsgebäuden als auch Gebäuden in einer Einsatzinfrastruktur in einer hohen zeitlichen Auflösung (< 1 h) erfasst. Es werden standardisierte Analysen entwickelt, um den Energieverbrauch zu optimieren. Die praxisnahen Datenanalysemethoden eignen sich für eine weitgehende Automatisierung.

Einige dieser Methoden werden nachfolgend kurz vorgestellt: Aktuell bleiben Fehlfunktionen und Ineffizienzen im Gebäude- und Anlagenbetrieb oftmals unerkannt. Diese können, wenn überhaupt, nur mit hohem manuellem Aufwand aus den verfügbaren Messdaten herausgearbeitet werden. Für die Analyse gebäudetechnischer Messdaten haben sich u. a. Scatter- und Carpetplots, in manchen Fällen auch einfache Zeitreihenplots, als hilfreich erwiesen. Hierdurch wird die visuelle Erkennung von Fehlern bzw. Unstimmigkeiten im Betriebsablauf ermöglicht. Beispielhaft sei die durch unsymmetrische Belastung (s. Abb. 1) des Netzes verursachte Blindleistung angesprochen.

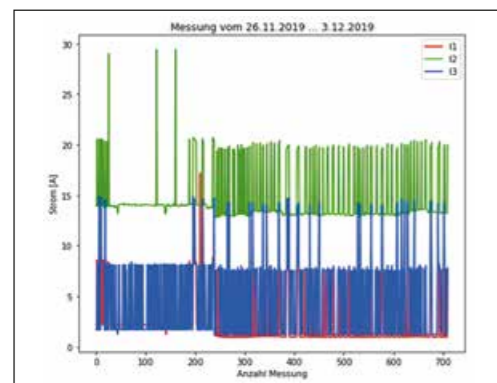


Abb. 1: Unsymmetrische Belastung im elektrischen Leitungsnetz



Abb. 2: Dezentrale Messstation im Feldlager Putlos

Die Implementierung regelbasierter Messdatenüberwachung zur Fehlererkennung basierend auf modellbasierten Verfahren der Betriebsanalyse soll weitestgehend automatisiert mögliche Einsparpotentiale identifizieren sowie den optimierten Betrieb überwachen. Die hier zu entwickelnden Methoden zur automatisierbaren Fehlererkennung setzen voraus, dass die zu detektierenden Fehler definiert und deren wesentliche Merkmale bekannt sind. Die angestrebten Methoden sollen mit möglichst wenigen Informationen und Daten auskommen.

Zur Auslegung der Kapazitäten für die Energieerzeugung und des Leitungsnetzes werden derzeit die spezifischen Lastfälle rein statisch betrachtet, ohne dabei schwankenden Einflüsse wechselwirkender Randbedingungen zu berücksichtigen. Eine bedarfsorientierte Optimierung der Betriebssteuerung bzw. Anlageneinsatzplanung ist damit derzeit nicht möglich. Voraussetzung für den optimierten Betrieb ist eine möglichst genaue Kenntnis des Zeitpunktes und der Höhe der zu erwartenden Lastspitzen im Netz. Anhand von Methoden der deskriptiven Statistik und des Machine Learnings lassen sich automatisiert Informationen aus Lastgängen ermitteln. Hierfür wird ein neuronales Netz mit zurückliegenden Messdaten trainiert, so dass das trainierte Modell anhand der Eingangsgrößen die abhängige Ausgangsgröße innerhalb einer gewissen Genauigkeit bestimmen kann. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau eines neuronalen Netzes zur Lastprognose. Für das zu entwickelnde Lastprognoseverfahren werden Messdaten in den Zeitraum eines Jahres (beginnend in 2020) in einer viertelstündlichen Auflösung erfasst. Jeder Datensatz umfasst dabei bis zu 20 Parameter, d. h. Messdaten aus dem Leitungsnetz oder Wetterinformationen wie Lufttemperatur, Windrichtung oder Windgeschwindigkeit. Der Zusammenhang einzelner Para-

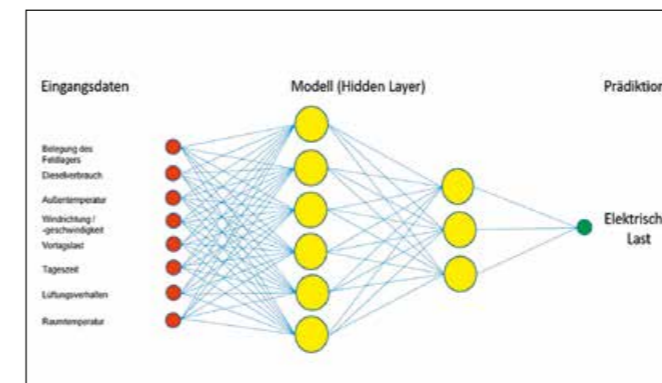


Abb. 3: Beispielhafter Aufbau eines neuronalen Netzes zur Lastprognose

meter und der dazugehörigen elektrischen Last wird anhand einer Korrelationsanalyse überprüft. Optimierung im Sinne des Project Proposal zielt auch auf die Effizienz des Energieeinsatzes für Strom und Heizen im Unterkunftsbereich ab; unter Berücksichtigung der aktuell vorliegenden Randbedingungen Wetter, Komfortanforderungen, Anwesenheit etc. Energie beim Heizen und Klimatisieren im Unterkunftsbereich (siehe Abb. 4) zu sparen ohne auf Komfort zu verzichten ist eine Herausforderung, die ebenfalls mit Hilfe der Datenaufzeichnung und Auswertung beantwortet werden soll

Die zu entwickelnden Methoden werden in der „Pilot-Liegenschaft“ des Feldlagers Putlos umgesetzt und demonstriert. Das Feldlager bietet aufgrund der vorhandenen Infrastruktur und der – unter Mitwirkung von Mitarbeitern der WTD 41 – durchgeführten Installation von Messstationen (siehe Abb. 2) beste Voraussetzungen, um die im Project Proposal beschriebenen Methoden und Verfahren der Datenanalyse unmittelbar in einem realen Szenario erproben und testen zu können.

Die Einbindung des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme ISE mit seiner umfangreichen Fachexpertise im Bereich der Betriebsführung von Gebäuden ist in 2020 geplant.

Die Ergebnisse und die Ableitung von Handlungsempfehlungen werden mit einem zusammenfassenden Abschlussbericht vorgelegt.



Abb. 4: Unterkunftscontainer im Feldlager Putlos

Dipl.-Ing. Ulrich Siller  
AeroDesignWorks GmbH  
Köln

post@aerodesignworks.com

Dr.-Ing. Georg Kröger  
AeroDesignWorks GmbH  
Köln

post@aerodesignworks.com

## Auslegung eines modernen Turbostrahltriebwerks

**Ziel des Entwicklungsprojekts ist die Auslegung und Vermessung eines modernen Turbostrahltriebwerks für kleine, unbemannte Luftfahrzeuge. Die Integration eines leistungsfähigen Diagonalverdichters mit Brennkammer und Turbinenstufe in einem sehr kompakten Bauraum ist das Spannungsfeld der Auslegung. Lagersystem, Starter-Generator sowie die Nebenaggregate sind weiterhin auszulegen und in das Gesamtsystem zu integrieren. Die Auslegung erfolgt in allen Komponenten mittels moderner numerischer Methoden. Ziel des Projekts ist die Verifikation der Auslegung im Prototypenversuch.**

Die Auslegung fordert für das Triebwerk einen spezifischen Verbrauch, welcher ca. 20 % unter dem marktüblichen Stand in der Schubklasse 1 kN liegt. Dazu ist der Bauraum im Durchmesser sehr ambitioniert, was insbesondere die Verdichter- und Brennkammerauslegung erschwert. Neben diesen Randbedingungen sind niedrige Kosten, gute Einlagerungsmöglichkeiten sowie eine hohe Widerstandsfähigkeit bei großen Trägheitslasten zu berücksichtigen.

Aufgrund eines immer weiter steigenden Elektrifizierungsgrads bei modernen Luftfahrzeugen ist ein integrierter Starter-Generator vorgesehen, der einerseits das Fluggerät mit Strom versorgt und zudem als Motor für den Triebwerksstart dient.

Um den ambitionierten SFC (Specific Fuel Consumption) bei relativ niedrigen Kosten zu erreichen, wird ein reduzierter Komplexitätsgrad bei den Turbokomponenten mit serienreifer Technologie verfolgt. Die strömungsführenden Geometrien werden hierbei jedoch mit modernen Methoden ausoptimiert. So wird beim Verdichter auf einen einstufigen Diagonalverdichter mit Tandembeschaukelung im Leitgitter gesetzt, welcher

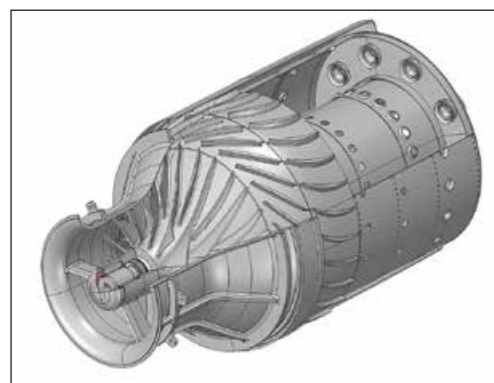


Abb. 1: Konzept eines effizienten Turbostrahltriebwerks in der Schubklasse 1000N

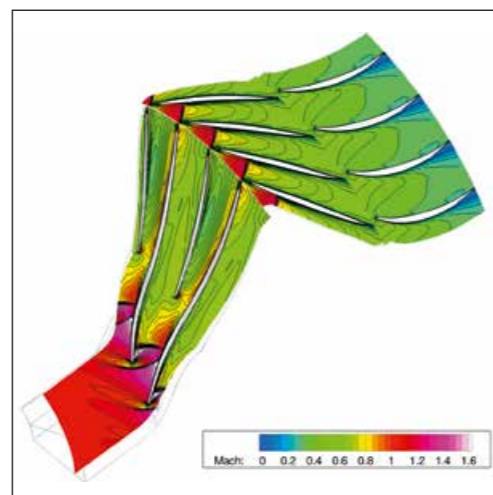


Abb. 2: Machzahlkonturen auf dem Mittelschnitt der Diagonalverdichterstufe

Michael Woopen, M.Sc.  
AeroDesignWorks GmbH  
Köln

post@aerodesignworks.com

im Vergleich mit Radialverdichtern vergleichbare Druckverhältnisse bei höheren Wirkungsgraden und kompakteren Abmessungen realisiert. Ein komplexer, mehrstufiger Axialverdichter kann so umgangen werden. Dagegen steht eine anspruchsvolle mechanische und rotordynamische Auslegung, da im Vergleich mit einem Radialverdichter die Masse der Rotorscheibe deutlich höher liegt und sorgfältig einbezogen werden muss.

Die Turbine wird aufgrund des hohen Druckverhältnisses als Radialturbine und mit einem beschaukelten Turbinenleitgitter ausgeführt, welches im kurzen radialen Kanal nach der Umlenkung des Heissgases aus der Brennkammer positioniert ist. Vorteilhaft ist, dass nach der Turbine das Heissgas durch einen Vollkreisquerschnitt mit variabler Fläche zur Schubdüse geführt werden kann, ohne dass versperrende und verlustbehaftete Einbauten oder Verstrebenungen zu berücksichtigen sind.

Die Brennkammer des Turbojets wird neu und gemäß dem Stand der Technik konzipiert. Das Flammrohr ist ringförmig um die Heissgasführung angeordnet. Die Brennertechnologie orientiert sich am Prinzip einer drallstabilisierten Primärzone mit Druckzerstäuberdüsen. Der erforderliche Pumpendruck und die Brennstoffregulation werden mit einer digital geregelten, elektrischen Hochdruckzahnradpumpe geleistet. Für die Zündung kommt ein eigens entwickeltes Hochvoltzündsystem

zum Einsatz. Das Brennkammerdesign wird in 2020 finalisiert und im Rahmen eines atmosphärischen Brennkammertests untersucht und verifiziert.

An wichtigen Nebenaggregaten sind die Triebwerkssteuerung mit gängigen Bus-Systemen, der Motorregler für den Startvorgang sowie das Zündsystem im Projekt zu definieren, umzusetzen und zu testen. Der Starter-Generator ist fest mit der Hauptwelle gekoppelt und kann für den motorischen Startvorgang als auch zur Abnahme generatorischer Leistung genutzt werden. Das für einen schnellen und robusten Start erforderliche Moment übersteigt bei weitem jenes für die generatorische Leistung, sodass hier hohe Leistungsreserven für künftige Verbraucher oder Nutzlasten mit höherer Leistungsaufnahme bestehen.

Die Projektplanung sieht Ende 2020 die Vermessung der ersten Prototypen vor. Die Ergebnisse und Erkenntnisse werden im Anschluss in verbesserte Prototypen einfließen.

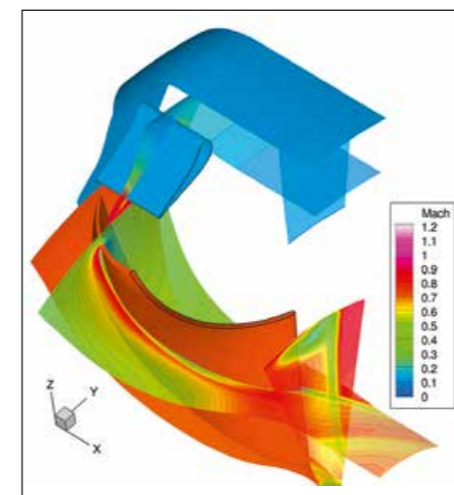


Abb. 3: Machzahlkonturen in der Turbinenstufe

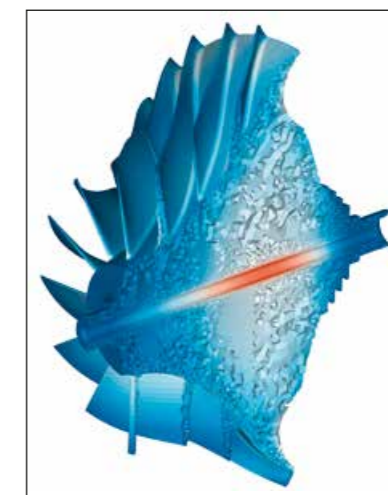


Abb. 4: Spannungsverteilung in der Scheibe des Verdichterlaufrades

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

WTD71posteingang@bundeswehr.org

Dominik Ascher  
Universität der Bundeswehr München  
Professur für Softwarewerkzeuge und Methoden  
für Integrierte Anwendungen  
Neubiberg

info@unibw.de

## Automatische Zielerkennung in der unbemannten Minenjagd

**Seeminen sind gefährlich. Ihr Einsatz ist effizient und hat potentiell gravierende Auswirkungen auf die Durchführbarkeit von Einsätzen und auf operationelle Prozeduren. Je automatisierter, und daher mit weniger Personal, gegen Seeminen vorgegangen werden kann, desto besser. Einer automatischen Zielerkennung kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Diese Rolle muss im Systemkontext untersucht werden.**

Ziel der Untersuchung ist, die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Erstellung der Algorithmen zur automatischen Zielerkennung (ATR) zu schaffen. Dabei sollen vorgegebene Werte für Effektivität, Robustheit und Effizienz erreicht werden, trotz hochvariabler Anwendungsdetails und trotz logistischer Randbedingungen auch bezüglich der Vernetzbarkeit von mehreren Minenjagdplattformen. Küstennahe Flachwasserbereiche zeichnen sich nämlich durch eine außerordentlich hohe Variabilität sowohl räumlich als auch zeitlich aus, wodurch insbesondere Seeminen mit modernem Design nicht einfach zu entdecken sind. Ein leistungsfähiger und robuster, aber dennoch nicht zu aufwendiger, d. h. zu viel Rechenlast produzierender, Algorithmus zur automatischen Zielerkennung wird benötigt. Dieser Algorithmus muss nicht nur an die verwendete Sensorik und deren Trägerplattform angepasst sein, sondern er muss auch im Rahmen einer Validierung und Verifikation des Gesamtsystems hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit bewertet werden können.

Die Herangehensweise innerhalb der Projektarbeit erstreckt sich über drei Bereiche: Theorie, Anwendung und Implemen-

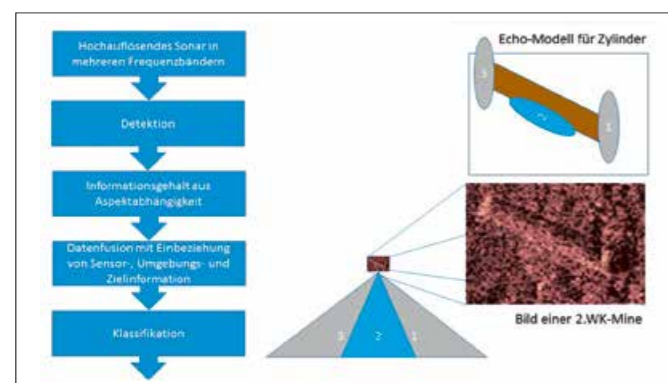


Abb. 1: Um den theoretischen Ansatz durchführen zu können, ist eine konsequente probabilistische Formulierung der Automatischen Zielerkennung notwendig

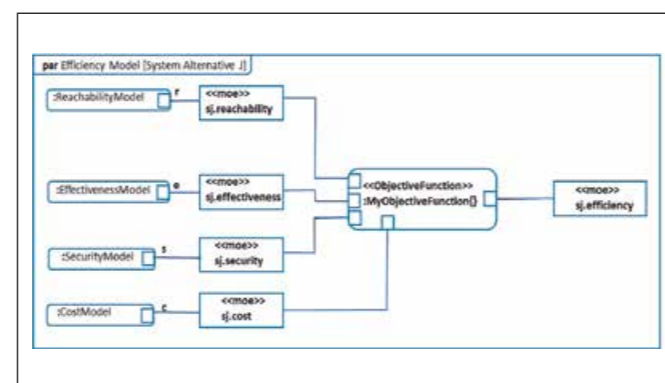


Abb. 2: SysML-Erweiterungen unterstützen die Verbindung zwischen den Details der Anwendung und den Spezifikationen der System-of-Systems-Beschreibung

tionierung. Zu den theoretischen Grundlagen findet eine Zusammenarbeit im Rahmen der NATO STO statt, wobei die Herausforderung darin besteht, die vielen Freiheitsgrade des Systems mathematisch beherrschbar zu formulieren. Die Anwendung „ATR als Service innerhalb des NATO Architecture Framework“ wird im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr in München mit Hilfe des Software-Werkzeuges „Enterprise Architect“ abgebildet. Mit der Implementierung wird aufbauend auf der an der WTD 71 verfügbaren Hardware und Vernetzung begonnen. Dazu sind experimentelle Daten aus nationalen und internationalen Seeversuchen verfügbar, insbesondere für moderne hochauflösend abbildende Sonarverfahren in mehreren Frequenzbändern.

Die bisherigen Ergebnisse aus dem Zusammenspiel der drei Arbeitsbereiche sind aus der Theorie heraus eine Formulierung der ATR als probabilistische zeitliche und räumliche Datenfusion (siehe dazu Abbildung 1), aus der Anwendung heraus die Verwendung der Programmiersprache SysML als Brücke zwischen den abstrakten Sichten der Architektur und den Details der tatsächlichen Realisierung (siehe dazu Abbildung 2), sowie aus der Probeimplementierung heraus eine Rückkopplung der Randbedingungen für mögliche Schnittstellen zwischen ATR und Gesamtsystem, die zur Netzwerktopologie und Ausstattung innerhalb der Bundeswehr passen könnten (siehe dazu Abbildung 3). Die zwei anderen Arbeitsbereiche müssen entsprechend angewendet oder angepasst werden, um mit diesen realistischen Limitierungen umgehen zu können.

Der immensen Bedrohung, die durch Seeminen ausgelöst wird, stehen mittlerweile zahlreiche, in Teilen in See demons-

trierete neue Fähigkeiten unbemannter Systeme gegenüber, mit denen dieser Bedrohung in Zukunft begegnet werden könnte. Das Projekt schlägt eine modellbasierte Herangehensweise vor, um für eine aus Systemen von Systemen zusammengebaute MCM-Prozesskette die Lücke zwischen Demonstration und Einsatzreife zu schließen, und untersucht die Umsetzbarkeit dieses Konzeptes.

Als nächste Projektschritte sollen die neuen theoretischen Ansätze mit aus der Literatur bekannten Verfahren verglichen bzw. taxonomisch eingeordnet werden. In der Anwendung sollen in dem ATR-Service diejenigen Bausteine identifiziert werden, aus denen sich ein Referenzmodell für ATR ableiten lässt. Insbesondere die Ähnlichkeit von SONAR- und RADAR-Systemen soll dabei untersucht werden. Für die Implementierung ist vorgesehen, die möglichst weit innerhalb der Minenjagdprozesskette integrierten ATR-Algorithmen für In-situ-Messungen zu validieren.

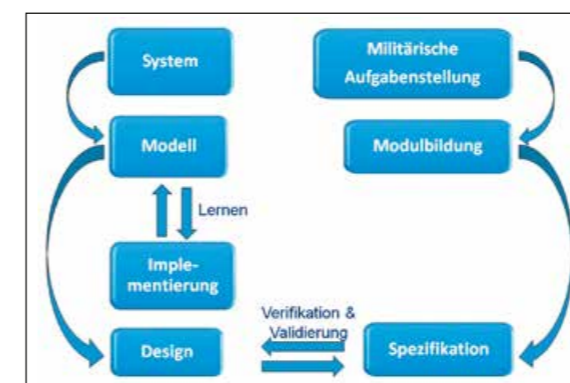


Abb. 3: „Aus Fehlern lernt man“, oder wie Information nach einer durchgeführten Implementierung in den Prozess „Design Space Exploration“ zurückfließt

Christian Biehler  
 Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie  
 und Elektronik (WTD 81)  
 Greiding

wtd81@bundeswehr.org

## KI-Gestützte Bildauswertung für die Bundeswehr

Im Bereich der Bildauswertung steigen die Anforderungen an den Menschen. Dies wird vor allem ausgelöst durch erhöhtes Datenaufkommen, kürzere zur Auswertung zu Verfügung stehende Zeitfenster sowie neuen Anforderungen an die Auswertergebnisse an sich. Für künstliche Intelligenz bzw. das maschinelle Lernen bieten sich eine Vielzahl von Ansatzpunkten, um im Joint-ISR Cycle unterstützend beizutragen.

Der Joint-Intelligence-Surveillance-Reconnaissance Cycle (Abb. 1) beschreibt einen Auswertezyklus, der auf eine möglichst effiziente und schnelle Bereitstellung von Informationen abzielt. Im Wesentlichen besteht er aus fünf Phasen, die möglichst ineinandergreifen sollen. Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens können den Menschen über den gesamten Verlauf unterstützen und entlasten.

In der ersten Phase (Task) erfolgt die Beauftragung zur Datenerfassung an die vorhandenen Aufklärungsmittel. Die zu lösende Aufgabe besteht hier darin eine möglichst ressourcenschonende Sensoreinsatzplanung zu erarbeiten, die eventuelle Ausfallzeiten berücksichtigt, aber dennoch die gewünschten Daten zur gewünschten Zeit liefert. KI-Verfahren können hier die Planung unterstützen und optimale Flugrouten berechnen oder anpassen, um mehrere Anforderungen auf einmal zu erfüllen.

Die nächsten beiden Phasen (Collect und Process) befassen sich mit der eigentlichen Datenerfassung, sowie deren Verarbeitung. Künstliche Intelligenz kann hierbei zur autonomen

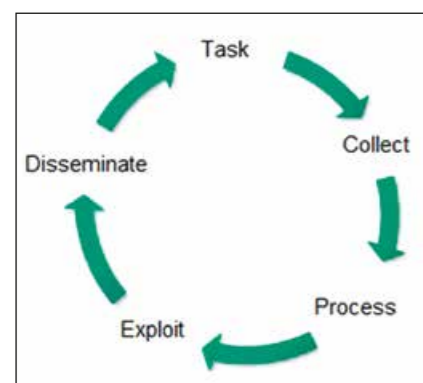


Abb. 1: Der Joint-ISR Cycle

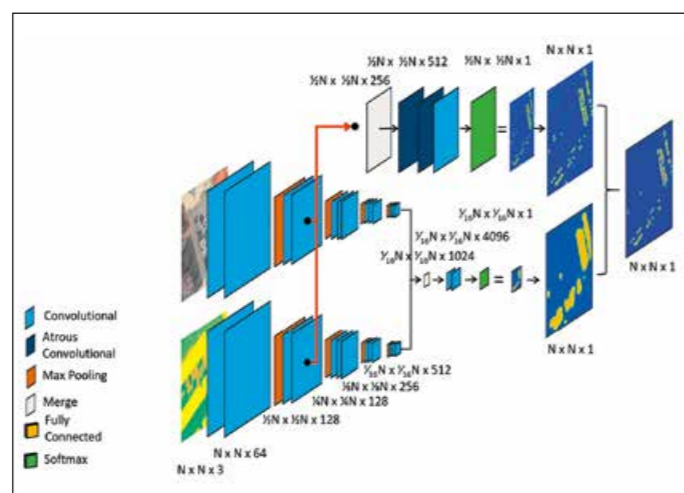


Abb. 2: Aufbau eines neuronalen Netzes zur Fahrzeugdetektion (Quelle: Fraunhofer IOSB)

Steuerung der Aufklärungsmittel genutzt werden. Abgesehen hiervon ergibt sich durch den Leistungssprung bei eingebetteten Systemen die Möglichkeit ein hohes Maß an Rechenleistung direkt am Sensor unterzubringen. Neuronale Netze können dazu genutzt werden die Qualität der gerade aufgenommenen Daten bereits im Sensorträger zu bewerten und daraufhin die Sensorparameter anzupassen. Mit Hilfe einer solchen On board-Vorverarbeitung kann zudem die benötigte Übertragungsbandbreite auch dadurch reduziert werden, indem nur bestimmte Bereiche der Aufnahme übermittelt werden (Region of Interest).

Im Rahmen der eigentlichen Auswertung (Exploitation) bieten sich die umfangreichsten Möglichkeiten für eine Unterstützung durch KI-Verfahren an. Die Grundlage hierfür legen Klassifikationsverfahren basierend auf neuronalen Netzen, die Bild- oder Videoinhalte mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit unterschiedlichen Klassen zuordnen (Abb2). Im Idealfall kann so eine semantische Repräsentation des Bildes erstellt werden, in der jedes Objekt einer Klasse zugeordnet wurde. Auf Wunsch können nun bei der Auswertung alle Fahrzeuge (Abb. 3) oder Häuser hervorgehoben werden, sowie direkt nach Bildinhalten gesucht werden. Über den zeitlichen Verlauf hinweg kann eine Situationsanalyse erfolgen. Zunächst werden hierfür verschiedene Parameter definiert und gewichtet, die auf eine mögliche Gefahrensituation hindeuten können, zum Beispiel „Fahren abseits der Straße“ oder „Fahren im Konvoi“. KI-Verfahren können nun die aktuelle Lage auf Basis dieser Parameter bewerten und gegebenenfalls Alarme auslösen.

Nach Erstellung des Reports besteht die finale Phase des JISR-Cycle's in der Verteilung (Disseminate) der Informationen. Damit ein Auswertergebnis mit anderen Teilstreitkräften

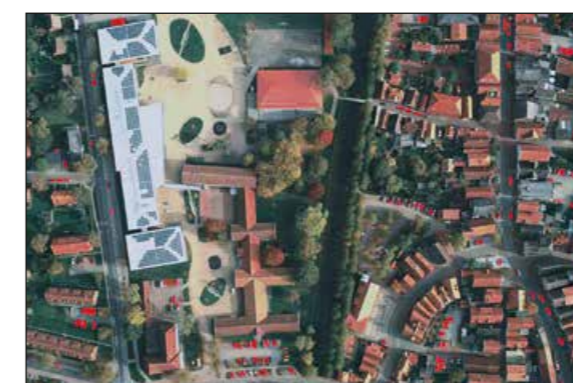


Abb. 3: Fahrzeugdetektion (Quelle: Fraunhofer IOSB)

oder Nationen in einer gemeinsamen Datenbank (CSD) geteilt werden kann, muss jedes Ergebnis mit Metadaten versehen werden. Dies erleichtert das Filtern, sowie den Vergleich von Daten. KI-Verfahren können hierbei einerseits Metadaten aus den Sensor- oder Rohdaten generieren, sowie noch fehlende Informationen aus den handgemachten Reports extrahieren.

Bei den insgesamt vielfältigen Einsatzbereichen ist jedoch zu bedenken, dass ein künstliches neuronales Netz nur ein wahrscheinliches Ergebnis liefert und das genaue Zustandekommen dieses Ergebnisses bis jetzt kaum durch den Nutzer des Systems nachvollzogen werden kann. Der Mensch als Entscheidungsträger muss deshalb weiterhin direkt eingebunden sein. Durch neuronale Netze sollte nur eine Entlastung um die Aufgaben erfolgen, die mit künstlicher Intelligenz schneller oder besser erledigt werden können.

Ein Forschungsschwerpunkt in der nahen Zukunft sollte abgesehen von den Verfahren an sich, die Reduktion der benötigten Trainingsdaten sein, da es gerade im militärischen Bereich oft keine ausreichenden nicht eingestuften Datenbestände gibt.



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

WTD91posteingang@bundeswehr.org

## VR und AR Analyse für die Simulations- und Testumgebung der Bundeswehr (SuTBw)

**Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) sind Technologien, die insbesondere für militärische Anwendungsfälle, enormes Potenzial aufweisen. Die Studie „VR und AR Analyse für die Simulations- und Testumgebung der Bundeswehr (SuTBw)“ beschäftigt sich mit der Analyse dieser Technologien, um effektive und effiziente militärische Anwendungen für die Bundeswehr zu erschließen.**

VR und AR Technologien sind inzwischen leicht verfügbar und ihre Leistungsfähigkeit nimmt beständig zu. Aufgrund ihres enormen Potenzials für viele militärische Anwendungen ist es notwendig, ihre Einsatzmöglichkeiten zu analysieren und zu konkretisieren. Weiterhin müssen aber auch die Einsatzgrenzen festgestellt werden.

Für die Simulations- und Testumgebung der Bundeswehr führt WTD 91 in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut FKIE diese Aufgaben im Rahmen der Forschungsstudie „VR und AR Analyse für die SuTBw“ durch.

Mit Hilfe der ergonomischen Gestaltung einer Anwendung, in deren Mittelpunkt der Soldat steht, soll das maximale Potenzial dieser Technologien analysiert werden.

Als Basis für die Analyse wurden zwei Demonstratoren aufgebaut, mit denen das Einsatzpotential aufgezeichnet und eine wissenschaftliche Bewertung vorgenommen werden kann.



Abb. 1: Systemaufbau VR-Demonstrator

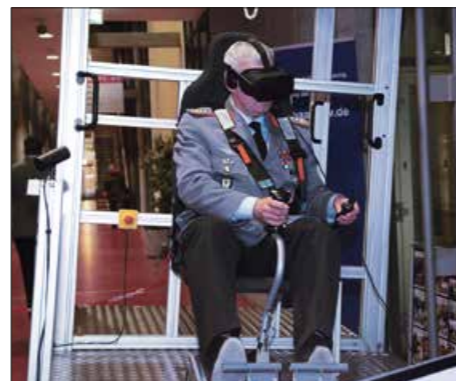


Abb. 2: Inspekteur im virtuellen Flug

Als Demonstrator für Anteil VR wurde ein generischer Hubschraubersimulator mit den Arbeitsplätzen des Piloten und des Bordsicherungssoldaten mit einer Windenbedienung aufgebaut. Für die virtuellen Inhalte kommen handelsübliche Head-Mounted-Displays zum Einsatz, als virtuelle Umgebung wird die in der Bundeswehr stark verbreitete Software Virtual Battlespace genutzt. Zur Steigerung der Immersion wird zusätzlich eine Bewegungsplattform eingesetzt, die in der Lage ist die Bewegung des Hubschraubers nachzuempfinden.

Es wurden zwei aufeinander aufbauende Probandenuntersuchungen mit je 30 Probanden durchgeführt. Im Rahmen des Vorversuchs kamen Non-Professionals, also Menschen ohne Flugenerfahrung, zum Einsatz. Für den eigentlichen Versuch wurde auf 30 flugerfahrene Soldaten zurückgegriffen, die aufgrund ihrer Erfahrung wesentlich sensibler auf veränderte Bewegung, Darstellung und Geräusche reagieren können.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden unter anderem folgende Inhalte mithilfe von standardisierten Fragebögen und halb-strukturierten Interviews untersucht:

- Persönliche Wahrnehmung
- Nutzerakzeptanz
- Präsenzepfinden, Immersion
- Psychische Belastung
- Symptome der Simulatorkrankheit

Die bisherigen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass VR-Technologien für die Ausbildung von Hubschrauberbesatzungen sehr gut geeignet sind.



Abb. 3: VR-Probierenuntersuchung

Zwar können sie nicht die Ausbildung im Full-Flight Simulator und erst recht nicht den Realflug ersetzen, aber insbesondere als Verfahrenstrainer, um z.B. die Kommunikationsprozesse der Akteure an Bord zu trainieren, kann diese Technologie sinnvoll eingesetzt werden.

Für die Analyse des Potentials von Augmented Reality wurde ein Ausbildungssystem für das Erlernen der Funktionen und Eingaben an einem Navigation-Management-System erstellt. Im Gegensatz zur klassischen Lernmethode mit Papierunterlagen, können unter Verwendung des AR-Device Microsoft HoloLens dem Auszubildenden Lerninhalte digital bereitgestellt werden. So werden z.B. die Funktionen von einzelnen Tastern und Schaltern positionsgerecht angezeigt.

Auch für diese Anwendung wurden bislang zwei Probandenuntersuchungen durchgeführt, unter anderem mit dem Ziel, wissenschaftliche Erkenntnisse zu folgenden Inhalten zu erhalten:

- Vorteile und Nachteile der Lernmethode
- Nutzerakzeptanz

Weiterer Inhalt der Studie ist die Frage, ob sich der Lernerfolg durch Verwendung von AR-Technologien steigern lässt. Die ersten Ergebnisse zeigen eine überdurchschnittlich gute Usability und User Experience, allerdings stellte sich heraus, dass die momentan verfügbare Hardware noch nicht frei von Restriktionen ist. Diese Restriktionen sind bei der Umsetzung von Anwendungen zwingend zu berücksichtigen.



Abb. 4: AR-Demonstrator

TRAR Alexander Baumeister  
Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91)  
Meppen

WTD91Oeffentlichkeitsarbeit@bundeswehr.org

TORR Lothar Reich  
Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91)  
Meppen

WTD91Oeffentlichkeitsarbeit@bundeswehr.org

## Entwicklung reaktiver Struktur-Materialien in deutsch-kanadischer Kooperation

**Reaktive Struktur-Materialien (RSM) sind eine vielversprechende Technologie zur Steigerung von Waffenwirkungen. Die WTD 91 kooperiert mit der kanadischen DRDC (Defence Research and Development Canada) in der Untersuchung und Entwicklung leistungsstarker RSM. Die Kooperation umfasst Versuchsreihen auf dem Testgelände der WTD 91.**

Reaktive Struktur-Materialien sind eine neue Technologie mit doppelter Funktion. Zum einen sind sie durch ihre mechanische Festigkeit dazu geeignet strukturgebende Elemente in Gefechtsköpfen zu ersetzen. Zum anderen setzen sie bei der Detonation eines Gefechtskopfes zusätzliche Energie frei. Somit können Komponenten eines Gefechtskopfes, die bisher aus inerten Materialien gefertigt wurden, nun erheblich zur Waffenwirkung beitragen.

Bauteile aus RSM werden aus Metallpulvern durch Press- oder Sinterverfahren hergestellt. Während der Detonation eines Gefechtskopfes zerbrechen diese Bauteile in viele kleine Fragmente. Die Fragmente sind so klein, dass sie sich in den heißen Detonationsgasen entzünden. Diese Reaktion führt zu einer drastischen Verstärkung des Gasschlags. Zusätzlich können Fragmentwolken einen beträchtlichen Impuls auf Ziele übertragen.

Der genaue Effekt eines RSM-Gefechtskopfes hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. Die Qualität der verarbeiteten Metallpulver spielt ebenso eine Rolle wie die genutzten Her-



Abb. 1: Bunker auf dem Testgelände der WTD 91



Abb. 2: Bunkerinnenraum nach Sprengung einer RSM-Ladung

stellungsverfahren oder Umwelteinflüsse im Einsatz. Die RSM-Wirkung ist besonders für MOUT-Szenarien (Military Operations in Urban Terrain) interessant, da hier ein verstärkter Gasschlag taktische Vorteile hat. Allerdings finden MOUT-Missionen in räumlich komplexen Umgebungen statt, die eine Einschätzung der Waffenwirkung erschweren.

Die WTD 91 und die kanadische DRDC kooperieren in der Anwendung von RSM in MOUT-Szenarien. 2019 wurde dazu eine umfassende Messkampagne in einem Bunker der WTD 91 durchgeführt (Abbildung 1). Der Effekt unterschiedlicher RSM-augmentierter Sprengladungen wurde getestet (Abbildung 2). Dazu wurden sowohl Drucksensoren (Abbildung 3) als auch Kammfolien und Deutstrukturen eingesetzt. Simulationen der Ladungsdetonationen unterstützten die Auswertung und Interpretation der experimentellen Messdaten. Die Erkenntnisse aus der Messkampagne werden zur Auslegung optimierter RSM-Gefechtsköpfe für MOUT-Missionen führen.

Weitere Untersuchungen der RSM erfordern auch die Entwicklung neuer Messtechnik. Besonders Größen und Formen sehr kleiner RSM Splitter können zurzeit nicht genau quantifiziert werden. Eine Quantifizierung gäbe weiteren Aufschluss über RSM-Effekte. Neue Methoden zum Auffangen von Splintern, ohne dass diese reagieren werden derzeit konzipiert. Auch neue

Deutstrukturen werden entwickelt. Eine verbesserte Schadensbewertung ist essentiell für die Auslegung leistungsstärkerer RSM.



Abb. 3: Drucksensor in der Bunkerwand

## 2

## Wehrmedizinische und Wehrpsychologische Forschung

Wehrmedizinische Forschung und Entwicklung ist unverzichtbare Voraussetzung für eine zukunftsfähige, leistungsstarke Gesundheitsversorgung der Bundeswehr. Es werden Vorhaben mit hoch innovativen Forschungsansätzen aus dem breit gefächerten Spektrum der Wehrmedizin dargestellt. Erstmals präsentieren neben den wehrmedizinischen Ressortforschungseinrichtungen in diesem Jahr auch die Bundeswehrkrankenhäuser (BwKrhS) ausgewählte Forschungsvorhaben.

BwZKrhS Koblenz beschreibt, wie mittels zirkulierender Mikropartikel nach schweren Verletzungen Art und Ausmaß der Verletzung anhand einer Blutprobe bestimmt und lebensrettende chirurgische Eingriffe zielgerichtet durchgeführt werden können. BwKrhS Westerstede nutzt 3D-Druck-Modelle für die Ausbildung neurochirurgischer Eingriffe, die nach schweren Schädelverletzungen lebensrettend sein können.

Drei Jahre nach dem terroristischen Angriff auf den Weihnachtsmarkt am Berliner Breitscheidplatz stellt das Psychotraumazentrum der Bundeswehr Erkenntnisse zu den psychischen Spätfolgen bei den eingesetzten Polizei- und Rettungskräften vor.

Die Klinik für Unfallchirurgie des BwKrhS Berlin leitet das Konsortial-Vorhaben PhagoFlow, bei dem spezielle Viren, sog. Bakteriophagen, zur Therapie von Infektionen mit hochgradig antibiotika-resistenten Bakterien eingesetzt werden. Auch das Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr befasst sich mit der Phagentherapie und sequenziert Stämme von Phagen, deren Eigenschaften sie für die antibakterielle Therapie besonders geeignet erscheinen lassen.

Modernste molekularbiologische Sequenzier-Verfahren, sog. Next Generation Sequencing (NGS), stehen auch im Mittelpunkt des Beitrags aus dem Institut für Radiobiologie der Bundeswehr. NGS erlaubt hier eine deutlich schnellere Diagnostik strahlen-

induzierter Schäden und somit eine gezielte Therapie in Szenarien, bei denen zahlreiche Patientinnen und Patienten ionisierender Strahlung ausgesetzt waren bzw. eine solche Exposition befürchten.

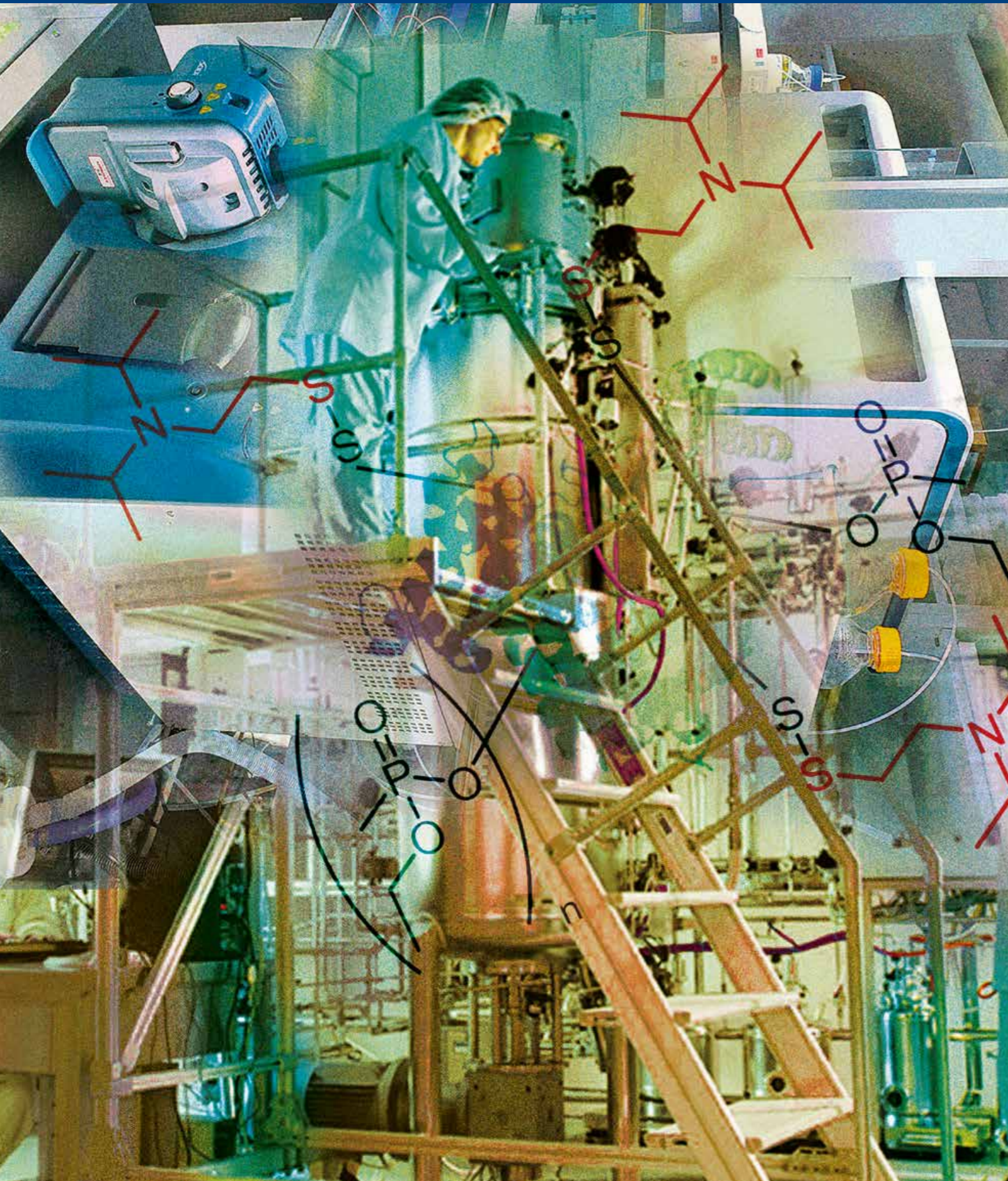
Das Institut für Pharmakologie und Toxikologie beschreibt die Möglichkeiten, die Exposition gegenüber chemischen Kampfstoffen anhand langlebiger Protein-Addukte – falls erforderlich noch lange nach Exposition – nachzuweisen.

Das Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr stellt neue Forschungsarbeiten zum Thema Hitzestress vor, der – nur scheinbar paradox – auch in kalten Umgebungen, z. B. im winterlichen Hochgebirge, auftreten kann und dort bislang wenig untersuchte Risiken, einschließlich einer nachfolgenden Unterkühlung, nach sich ziehen kann.

Das Schiffarztmedizinische Institut der Marine befasst sich mit oxidativem Stress durch wiederholte Beatmung mit hyperbarem Sauerstoff im Dienst bei den tauchenden Einheiten der Marine und den diesbezüglichen Auswirkungen auf das Immunsystem.

Das Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe führt systematische Arbeitsplatz-Analysen des Eurofighter-Cockpits durch, um das Zusammenwirken zwischen Mensch und Technik zu optimieren und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Eurofighter zu steigern.

Wehrpsychologische Forschung verfolgt mit all ihren Facetten das Ziel, die für die Auftragserfüllung notwendige, an die spezifischen Bedingungen der Bundeswehr angepasste psychologische Fachexpertise bereitzustellen. Exemplarisch berichtet das Psychotraumazentrum der Bundeswehr über einen Ansatz, der frühzeitig Angehörige von psychisch einsatzgeschädigten Soldatinnen und Soldaten in den Prozess der Diagnostik und Behandlung einbinden soll.



## Isolierung und Charakterisierung von Bakteriophagen zur Therapie multiantibiotikaresistenter Bakterien

**Wundinfektionen mit multiresistenten Bakterien stellen ein zunehmendes Problem bei der Versorgung von verwundeten Soldatinnen und Soldaten dar. In Fällen, in denen Standard-Breitspektrumantibiotika nicht mehr wirken, können Bakteriophagen, also spezifisch gegen die resistenten Bakterien gerichtete Viren, noch erfolgreich bei der medizinischen Behandlung eingesetzt werden.**

Wundinfektionen mit multiantibiotikaresistenten gramnegativen Bakterien (MRGN), wie zum Beispiel bestimmten Stämmen von *Klebsiella pneumoniae*, sind ein zunehmendes Problem bei der Versorgung von Verwundeten. *Klebsiella pneumoniae* des Typs 4 MRGN können dabei lebensbedrohliche Blutvergiftungen, Lungenentzündung und Wundinfektionen verursachen. Solche Infektionen können oftmals nicht mehr mit Standardantibiotika behandelt werden. Darüber hinaus bildet *Klebsiella pneumoniae* charakteristische Polysaccharidkapseln, die Biofilme produzieren können, und so den Zugang von eigentlich noch wirksamen Antibiotika zu den Bakterien verhindern.

Als Bakteriophagen bezeichnet man verschiedene Viren, die auf Bakterien als Wirtszellen spezialisiert sind. Bestimmte Bakteriophagen sind dabei in der Lage, spezifisch Typ 4 MRGN anzugreifen und können daher auch bei einer Antibiotikaresistenz als eine Ergänzung zur antibiotischen Behandlung und dem chirurgischen Debridement erfolgreich eingesetzt werden. Mischungen mehrerer Phagenstämme in Pulverform oder in Form von Einmalwundverbänden könnten dabei besonders einfach eingesetzt werden. Bakteriophagen in Spülflüssig-



Abb. 1: Elektronenmikroskopie: Phage K5 1/6 wurde in einem ZEISS Libra 120 Instrument im Negativkontrast mit Phosphowolframsäure dargestellt

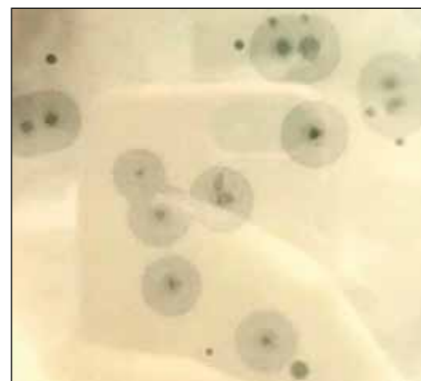


Abb. 2: Typische Plaques von *Klebsiella*-Phagen mit und ohne 'Halo'. Halo-Bildung weist auf die Anwesenheit von Kapsel-Depolymerasen hin

keiten könnten zur Auflösung von Biofilmen eingesetzt werden. Durch die Auflösung dieser Biofilme wird oftmals eine antibiotische Wirkung wiederhergestellt und körpereigene Immuneffektoren erhalten erneut Zugang zum Ort der Infektion.

Im Rahmen von Forschungsarbeiten zur Bekämpfung gefährlicher Infektionskrankheiten werden am Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr in München kapseltypspezifische *Klebsiella*-Phagen für eine zukünftige Herstellung therapeutischer Phagenmischungen isoliert und charakterisiert.

Zur Herstellung solcher Phagenpräparate, die unter variablen Temperaturbedingungen und in einer verunreinigten und exponierten Umgebung zum Einsatz kommen sollen, eignen sich besonders sogenannte strikt lytische, nichtbehüllte, doppelsträngige DNA Phagen. Diese finden sich vor allem in der Familie Caudovirales: T4 ähnliche Myoviren (Myoviridae), P2 ähnliche Siphoviren (Siphoviridae), und T7 ähnliche Podoviren (Podoviridae).

Die bisher am Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr isolierten kapseltypspezifischen *Klebsiella*-Phagen K5 1/6 (Kapseltyp 3; Abb. 1) und KTun1 (Kapseltyp 64) sind in der Lage multiresistente *Klebsiella*-Stämme zu zerstören (Abb. 2).

Mithilfe modernster Methoden der Genomsequenzierung (Next Generation Sequencing) konnte der Bakteriophage K5 1/6 als ein P2 – ähnliches Siphovirus (56.4 Kilobasenpaare (Kbp);) und der Phage KTun1 als ein T7 – ähnliches Podovirus (43.4 Kbp) identifiziert werden. Auf diesem Wege wurden auch sogenannte Depolymerasen, also Enzyme, die in der Lage sind vernetzte

Moleküle der Bakterienkapsel aufzubrechen, als Bestandteile der Phagen gefunden. Das ringförmige Genom des Siphovirus K5 1/6 ist in Abb. 3 dargestellt.

Als Teil der weiteren Forschung werden nun Bakteriophagen für alle bekannten Kapseltypen von *Klebsiella pneumoniae* isoliert und charakterisiert und deren spezifische Depolymerasen im Genom identifiziert. Mit dem Wissen über diese Erbinformation können Bakteriophagen anschließend so verändert werden, dass sie zukünftig in der Lage sind, mehr als einen Kapseltyp aufzulösen. Damit kann die notwendige Zahl verschiedener Phagen in den therapeutischen Phagenmischungen verringert werden. Phagen Genome sollen zukünftig synthetisiert und in zellfreien Systemen verpackt werden, um eine Herstellung von Phagenpräparaten mit den höchsten pharmazeutischen Standards sicherzustellen.

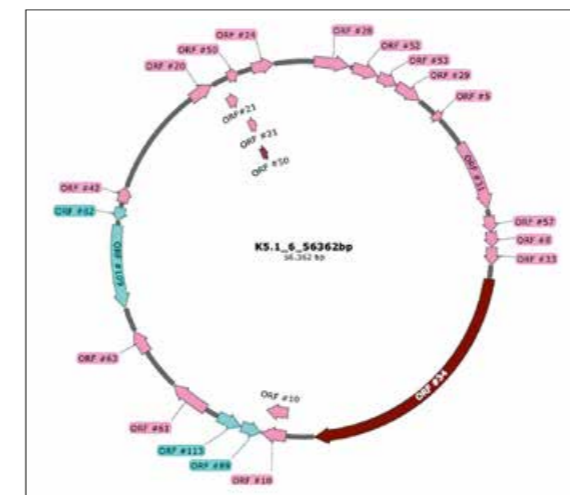


Abb. 3: Genetische Karte des K5 1/6 – Siphovirus (56.4 kbp)

RDir Prof Dr. Harald John  
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr  
München

InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

Major d.R Markus Siegert  
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr  
München

InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

## Identifizierung langlebiger Protein-Biomarker: Neue Methoden zum forensischen Nachweis der Vergiftung mit chemischen Kampfstoffen

**Chemische Kampfstoffe sind in den letzten Jahren wiederholt in kriegerischen Konflikten und für gezielte Attentate eingesetzt worden. Das Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr gehört seit 2016 zu den designierten Laboren der Organisation für das Verbot Chemischer Waffen und hat die Aufgabe, Vergiftungen durch biomedizinische Analytik zu verifizieren. Die Identifizierung von Biomarkern steht daher im Fokus der Forschung.**

Das Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr (InstPharmToxBw) ist das wissenschaftliche Kompetenzzentrum in allen Fragen des medizinischen Schutzes vor chemischen Kampfstoffen (CKS) und vergleichbaren artverwandten Chemikalien. Zu seinen Zuständigkeiten und Kompetenzen gehört auch der Beweis potentieller Vergiftungen mit CKS mittels biomedizinischer Verfahren (Verifikation). Durch instrumentelle chemische Analyse von biologischen Proben wie beispielsweise Blut, Urin und Gewebe können Biomarker detektiert werden, die den eindeutigen Beleg einer Giftinkorporation ermöglichen. Da CKS durch das Chemiewaffenübereinkommen (CWÜ) international gebannt sind, wird die Einhaltung dieses Abkommens durch die Organisation für das Verbot Chemischer Waffen (OVCW, Hauptsitz in Den Haag/NL, Friedensnobelpreisträger von 2013) überwacht. Aus diesem Grunde unterhält die OVCW ein internationales Netzwerk von weltweit nur 17 spezialisierten Laboren, die zur biomedizinischen Verifikation qualifiziert sind.

InstPharmToxBw gehört diesem Netzwerk seit dessen Etablierung im Jahr 2016 an und muss alljährlich neu seine Quali-

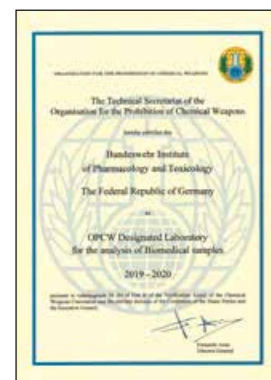


Abb. 1: InstPharmToxBw gehört auch in 2019 zu den designierten Laboren der OVCW



Abb. 2: Humanes Serumalbumin: Reaktionspartner und Biomarker für Chemische Kampfstoffe



Abb. 3: Wichtigste Techniken zur Verifikation: Chromatographie in online-Kopplung mit Massenspektrometrie

fikation durch erfolgreiches Bestehen von Ringversuchen (Biomedical Proficiency Tests) oder Untersuchung von Realproben unter Beweis stellen. Aus diesem Grund gehört die Erweiterung des Methodenspektrums zur forensischen Analytik durch die Suche nach neuen besonders prädestinierten Expositionsmarkern zu einer der Kernaufgaben des Institutes.

Besonders prädestiniert ist ein Biomarker dann, wenn er über eine hohe Stabilität und lange Halbwertszeit auch im überlebenden menschlichen oder tierischen Organismus verfügt und somit noch Wochen bis Monate nach Giftaufnahme nachweisbar ist. Reaktionsprodukte von CKS mit körpereigenen Proteinen (Protein-Addukte) wie beispielsweise mit Albumin können diese Voraussetzung erfüllen. Die Addukte entstehen, indem funktionelle Gruppen der Seitenketten bestimmter Aminosäuren, aus denen die Proteine aufgebaut sind, mit den CKS chemisch reagieren und sich somit stabil an das Protein binden. Für den instrumentell analytischen Nachweis dieser modifizierten Proteine ist meist deren initiale Isolierung aus der komplexen Probe erforderlich, bevor ein Zerschneiden (Proteolyse) in kleine peptidische Abschnitte erfolgt. Diese Peptide tragen noch den gebundenen Rest des CKS und lassen sich mittels Flüssigchromatographie und moderner Massenspektrometrie trennen und als Biomarker detektieren. Das Aufspüren der modifizierten Aminosäuren und Peptide stellt eine der Herausforderungen in der Entwicklung neuer Verfahren und der Entdeckung zusätzlicher Biomarker dar.

InstPharmToxBw konnte in den letzten Jahren einige neue Biomarker identifizieren und für diese Methoden zur Verifikation aufbauen. Für die Nervenkampfstoffe des V-Typs wie beispielsweise VX oder seine chinesischen und russischen

Analoga (CVX und RVX) gelang es sogar, eine gänzliche neue und bislang noch nicht beschriebene Klasse von Addukten vorzustellen. Die erfolgreiche Anwendung der neuen Biomarker und Methoden auf Realproben unterstrich nachhaltig den Nutzen der Entwicklungen.

InstPharmToxBw wird durch die Untersuchung zusätzlicher biologischer Matrices und Testung weiterer CKS und strukturverwandter Pestizide sein Methodenspektrum kontinuierlich erweitern, um auch für die OVCW weiterhin ein kompetenter Partner zu bleiben und sein internationales Renommee auszubauen.

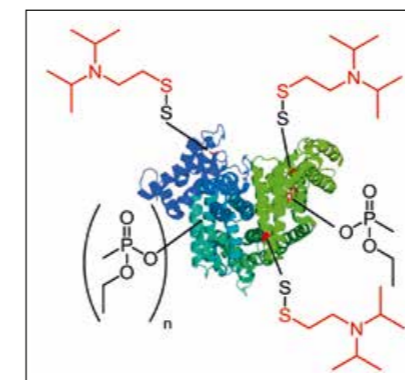


Abb. 4: Addukte des Nervenkampfstoffes VX am humanen Serumalbumin (Quelle: Kranawetvogl et al. Anal. Bioanal. Chem. 410 (2018) 1463-1474)



Abb. 5: Hautläsionen eines Schwefellost-Opfers (Quelle: John et al. Wehrmed. Mschr. 63 (2019) 226-230)

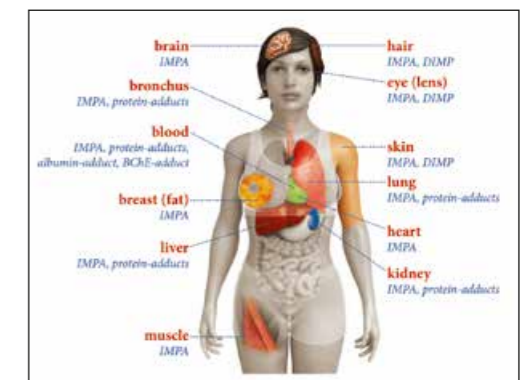


Abb. 6: Untersuchte Gewebe einer Leiche und Biomarker der tödlichen Sarin-Vergiftung (Quelle: John et al. Forensic. Toxicol. 36 (2018) 61-71)

Dr. Maria Richter  
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr  
Koblenz

InstPraevMedA@bundeswehr.org

OStFw Stefan Freitag  
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr  
Koblenz

InstPraevMedA@bundeswehr.org

## Anstrengungsbedingter Hitzestress in Kälte – ein scheinbares Paradoxon mit Auswirkungen auf die Gesundheit und die Leistung

Die gesundheitliche Gefährdung und Leistungsminderung durch Hitzestress in kalten Umgebungen ist bisher nur wenig erforscht. Sie sind jedoch von großer Bedeutung für die Auftrags Erfüllung im militärischen Kontext. Ziel des Projektes ist die Entwicklung standardisierter Tests in der Klimasimulationskammer zur Erfassung der Zusammenhänge/Effekte von Kälte, Bekleidungsisolierung und Leistungsvermögen.

Bei einer ausgeglichenen Temperaturbilanz bewegt sich die Körperkerntemperatur des Menschen zwischen 36,5 und 37,5 °C. Weicht sie um  $\pm 2$  °C ab, kommt es bereits zu physischen und mentalen Leistungsverlusten. Bei Abweichungen von  $\pm 3$  °C und mehr können sich schnell lebensbedrohliche Situationen entwickeln.

Neben individuellen Merkmalen beeinflussen drei Hauptfaktoren maßgeblich das Temperaturgleichgewicht beim gesunden Menschen, die klimatischen Umweltbedingungen (Hitze/ Kälte), eine zu hohe oder zu niedrige Bekleidungsisolierung und die metabolische Wärmeentwicklung bei körperlicher Arbeit (70 – 80 % der von den Muskeln verbrauchten Energie werden in Wärme umgesetzt). Das Zusammenwirken dieser Faktoren kann zu Störungen des Temperaturhaushaltes mit daraus folgenden Leistungseinschränkungen und Gesundheitsgefährdungen führen.

Dies ermöglicht die scheinbar paradoxe Situation, dass auch in sehr kalten Umgebungen Hitzestress entstehen und sogar eine Unterkühlung (Hypothermie) nach sich ziehen kann.



Abb. 1: Die hohe Isolation der Winterbekleidung und starke körperliche Anstrengungen, wie hier ein Bergaufstieg, können trotz einer sehr kalten Umgebung zu Hitzestress führen



Abb. 2: Eine Hypothermie kann sich besonders schnell entwickeln, wenn sich an eine arbeitsintensive Phase eine Tätigkeit mit niedriger Arbeitsintensität und großer Kälteexposition anschließt, wie z. B. beim Bezug eines Alarmpostens

Dr. Karl Jochen Glitz  
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr  
Koblenz

InstPraevMedA@bundeswehr.org

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

InstPraevMedBw@bundeswehr.org

Das folgende Beispiel veranschaulicht die Problematik: Wie in Abbildung 1 zu sehen, müssen Soldaten und Soldatinnen auch bei kalten Umgebungsbedingungen körperlich hochbelastende Tätigkeiten, wie Märsche und Gefechtsübungen ausführen. Die Bekleidung und Ausrüstung soll dabei vor Umwelteinflüssen (Kälte, Wind, Regen und Schnee) und militärischen Bedrohungen schützen. Hierdurch wird jedoch die Schweißverdunstung massiv behindert und damit der Hauptkühlmechanismus bei körperlicher Arbeit erheblich eingeschränkt – es entsteht Hitzestress.

Folgt einer Phase hoher Aktivität eine Phase niedriger Intensität mit fortdauernder Kälteexposition (z. B. Beziehen eines Alarmpostens – siehe Abbildung 2) und ist auftragsbedingt kein Wechsel zu trockener Kleidung möglich, besteht die Gefahr des sogenannten „post-exercise chill“. Hierbei wirken zwei Effekte: Erstens bildet die vom Schweiß durchnässte Bekleidung Kältebrücken, wodurch sich der Isolationsgrad der Bekleidung deutlich verschlechtert. Zweitens kühlt die langsame aber stete Verdunstung der Feuchtigkeit in der Bekleidung den Körper noch über lange Zeiträume, potentiell bis hin zur Hypothermie.

Die Auswirkungen körperlicher Belastungen in Kälte auf den Wärmehaushalt und auf die physische sowie mentale

Leistungsfähigkeit sind im militärischen Kontext bisher kaum erforscht. Diese Kenntnislücke soll mit einem mehrschrittigen Vorhaben geschlossen werden.

Zunächst werden die Belastungen und Beanspruchungen militärischer Tätigkeiten unter realistischen Bedingungen mithilfe exemplarischer Tätigkeitsanalysen erfasst. Hierbei werden leistungsphysiologische (u. a. Herzfrequenzen, Energieumsätze) und thermophysio logische Parameter (Hauttemperatur, Körperkerntemperatur), wie auch umwelt- und tätigkeitsspezifische Kenngrößen (u. a. Klimamessgrößen, Lasten, Bekleidung und Ausrüstung) erhoben. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung standardisierter Tests in der Klimasimulationskammer des Instituts. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel, wie in einer solchen Testumgebung die Einflüsse und Auswirkungen der Faktoren Kälte, körperliche Arbeit sowie Bekleidung und Ausrüstung auf die physische und mentale Leistungsfähigkeit unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden können. Forschungsziele sind die Ableitung von Handlungsempfehlungen für Ausbildungen und Einsätze und die Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten von Bekleidung und Ausrüstung.



Abb. 3: Untersuchung des Einflusses von Kältestress auf das Leistungsvermögen einer Probandin in der Umweltsimulationskammer

Oberstabsarzt Dr. med. Patrick Ostheim  
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr  
München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

Oberstarzt Prof. Dr. med. MSc Michael Abend  
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr  
München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

## Die Hochdurchsatzdiagnostik der Akuten Strahlenkrankheit kann durch Verwendung strahleninduzierter Genexpressionsänderungen entscheidend gesteigert werden

Bei einem radiologischen oder nuklearen Szenar ist eine Früh- und Hochdurchsatzdiagnostik insbesondere zur Identifizierung schwer bestrahlter Individuen innerhalb der ersten Tage erforderlich. Molekularbiologische Verfahren wie „targeted Next Generation Sequencing“ erlauben im Vergleich zu etablierten zytogenetischen Verfahren die Bearbeitung von hundertfach mehr Blutproben in einem Drittel der Zeit.

Nach Freisetzung von Radioaktivität (z. B. schmutzige Bombe) oder direkter ionisierender Strahlung (z.B. improvisierte Atom-bombe) müssen aus klinischer Sicht drei Personengruppen möglichst schnell innerhalb der ersten Tage und damit vor der Manifestation der u.U. tödlich endenden Akuten Strahlenkrankheit (ASK) identifiziert werden. Diese sind wie folgt definiert: (1) unbestrahlte Personen (keine Hospitalisierung erforderlich), (2) leicht bestrahlte Personen (keine Hospitalisierung erforderlich, jedoch engmaschige Überwachung aufgrund Jahre später auftretender Spätschäden wie Tumoren angezeigt), (3) stark bestrahlte Personen (frühe Hospitalisierung und früher Beginn einer Intensivtherapie zur Verbesserung der Prognose erforderlich, da sich eine therapiebedürftige ASK entwickeln wird).

Mittels Dosisabschätzung unter Verwendung zytogenetischer Verfahren (z. B. dizentrische Chromosomenanalyse, DIC) erhalten wir Hinweise, die bei der Zuordnung der drei Gruppen hilfreich sind. Aus vorangegangenen internationalen Studien wissen wir, dass die Dosisabschätzung aus 10 Blutproben mittels DIC ca. 3 – 4 Tage benötigt. Zudem bekräftigten diese Studien das Potential molekularbiologischer Verfahren, wie die Messung



Abb. 1: Darstellung des „Workflows“ der Studie mit den Einzelschritten A bis D

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

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

der Genexpressionsänderung bestimmter im Blut gemessener Gene: Für 10 Blutproben konnte eine Dosisabschätzung bereits innerhalb von 7 h mitgeteilt werden.

Die Frühdiagnostik basierend auf Genexpressionsänderungen im peripheren Blut bestrahlter Personen ist mittlerweile etabliert und in vielen weiteren Studien gezeigt worden. Fraglich ist jedoch die Messung strahleninduzierter Genexpressionsänderungen zur Hochdurchsatzdiagnostik. Ziel unserer Studie war es deshalb herauszufinden, wieviel Zeit benötigt wird, um mittels Auswertung von 1000 Blutproben eine Zuordnung in die o. g. drei klinisch relevanten Gruppen machen zu können.

Der „workflow“ ist in Abb. 1 beschrieben: (A) Peripheres Blut wurde von gesunden Donoren in EDTA-Röhrchen überführt. (B) Die Röhrchen wurden bestrahlt und bei 37 °C über 3 h inkubiert. Nach Bestrahlung mit 0 Gy, 0.5 Gy und 5 Gy wurden Genexpressionsmuster (FDXR, DDB2, WNT3 und POU2AF1) in vitro simuliert, wie wir sie in vorangegangenen Untersuchungen in Tieren und Leukämiepatienten entsprechend den drei klinischen Gruppen identifiziert hatten. Nach der in vitro Kultivierung wurde das Vollblut der EDTA-Röhrchen in PaxGene® Röhrchen überführt und in Aliquots à 0,5 ml aufgeteilt. Durch diesen Schritt wurde die RNA präserviert und es konnten 1000 Proben unter Verwendung von nur 50 statt 1000 Röhrchen

generiert werden. (C) Die automatisierte RNA-Isolation mit entsprechenden Robotern (QIA Symphony®) wurde in Kooperation mit Qiagen innerhalb von 12 h ermöglicht. (D) Mittels „targeted NGS“ fand schließlich die Identifikation der drei o. g. Gruppen innerhalb von 18 h statt. Damit konnten 1000 Blutproben – optimale Bedingungen vorausgesetzt (ausreichend Personal, Material und Geräte) – innerhalb von 30 h den beschriebenen drei klinisch relevanten Gruppen mit einer ca. 90 – 97 % Korrektheit zugeordnet werden.

Zusammenfassend konnte mit dieser Studie das hohe diagnostische Potential früher strahleninduzierter Genexpressionsänderungen zur Prädiktion der später auftretenden ASK demonstriert werden. Unsere Untersuchungen zeigten jedoch auch methodische Schwächen auf. Diese werden unter Verwendung anderer Hochdurchsatztechnologien wie der am InstRadBioBw etablierten 12 k Open Array Technologie in Zukunft beherrscht werden.

RDir Dr. Ulrich Wesemann  
 Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
 Berlin

Oberstarzt Dr. Gerd Willmund  
 Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
 Berlin

psychotraumazentrum@ptzbw.org

psychotraumazentrum@ptzbw.org

## Einbezug Angehöriger zur schnellen Diagnostik und Behandlung von psychisch einsatzgeschädigten Soldatinnen und Soldaten

Die 12-Monats-Prävalenz psychischer Störungen von Einsatzsoldaten liegt bei 25 %, viele bleiben aufgrund von Angst vor Stigmatisierung unbehandelt. Der Einbezug Angehöriger durch einen frei zugänglichen und selbstausswertbaren Fragebogen soll hier Abhilfe schaffen. Damit wird das aktuell größte Problem der klinischen Psychologie und der psychiatrischen Versorgung innerhalb der Bundeswehr angegangen.

Psychische Störungen als Folge von Auslandseinsätzen haben sowohl in der Truppenpsychologie als auch in der klinisch psychologischen und psychiatrischen Versorgung einen hohen Stellenwert. Die Inanspruchnahme professioneller Hilfe ist gering; Angst vor Stigmatisierung gilt als Hauptfaktor dafür. Neben dem persönlichen Leid der Betroffenen und dem ihrer Angehörigen sind die Kosten durch krankheitsbedingte Fehltag, verringerter Produktivität oder Dienstunfähigkeit erheblich. Daher wurden verschiedene Programme zur Einstellungsänderung bzgl. psychischer Störungen entwickelt und vom Psychologischen Dienst, vom Sozialdienst und vom Sanitätsdienst in der Bundeswehr implementiert.

Durch diesen Fokus wurden familiäre Konflikte einsatzbelasteter Soldatinnen und Soldaten besser erkannt. Viele Familienmitglieder wünschten sich mehr Informationen und pragmatische Verhaltensempfehlungen im Umgang mit den Betroffenen. Eine Reihe von Angeboten wurde etabliert, darunter das seit 2011 vom Psychotraumazentrum der Bundeswehr in Kooperation mit dem Evangelischen Kirchenamt durchgeführte psychoedukative Angehörigenseminar „Partnerschaft und PTBS – ein Angehörigenseminar“.

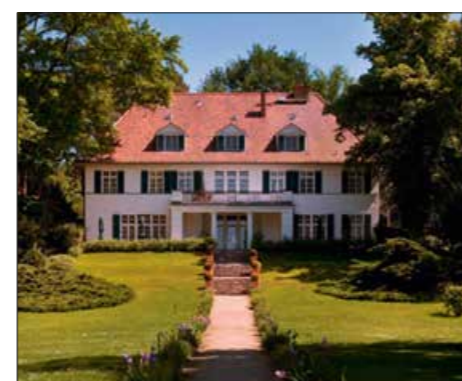


Abb. 1: Ausschnitt Flyer „Partnerschaft und PTBS – ein Angehörigenseminar“ (Quelle: Carolyn Rose, BwKrhs Berlin)

Abb. 2: Durchführungsort für das Angehörigenseminar (Quelle: Carolyn Rose, BwKrhs Berlin)

RDir Dr. Antje Bühler  
 Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
 Berlin

RAmtfr Dipl. Soz. Päd. (FH) Carolyn Rose  
 Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
 Berlin

psychotraumazentrum@ptzbw.org

psychotraumazentrum@ptzbw.org

schaft und PTBS – ein Angehörigenseminar“. Verschiedene Evaluationsstudien konnten die Wirksamkeit des Seminars für die Angehörigen belegen.

Ein Aspekt der Evaluationen bezog sich auf die Einschätzung der Angehörigen zu den einsatzbedingten Veränderungen ihrer Partnerinnen und Partner. Diese Angaben wurden mittels thematischer Analyse in Kategorien eingeteilt. Aus diesen Kategorien wurde ein Fragebogen entwickelt, bei dem die Angehörigen die einsatzbedingten Veränderungen ihrer Partnerinnen und Partner auf einer 5-stufigen Skala einschätzen.

Zur Validierung des Fragebogens sollen in einem Folgeprojekt Angehörige von psychisch erkrankten und nicht erkrankten Einsatzkräften den Fragebogen ausfüllen und miteinander verglichen werden. Der validierte Fragebogen soll nach Freigabe von Angehörigen selbst beschafft, ausgefüllt, ausgewertet und interpretiert werden können. Die Ergebniskategorie wird von nicht belastet über leicht, mittel, schwer belastet bis zu extrem belastet gehen und Handlungsempfehlungen für die Angehörigen enthalten.

Der Fragebogen soll über viele verschiedene niedrigschwellige Einrichtungen und Plattformen erhältlich sein. Neben dem Psychologischen Dienst, dem Sozialdienst und den Familien-

betreuungscentren, die in die Einsatzvorbereitung und die Betreuung der Angehörigen während und nach Einsätzen eingebunden sind, soll der Fragebogen auch über Online-Angebote wie dem Coach-PTBS oder der Homepage „www.ptbs-hilfe.de“ zur Verfügung gestellt werden. Damit soll eine große Reichweite und Anonymität garantiert werden.

Bei auffälligen Ergebnissen können die Betroffenen dann zukünftig von ihren Angehörigen angesprochen und zur Einleitung weiterer Maßnahmen motiviert werden. Dadurch soll die Zeit von Symptombeginn bis Behandlungsaufnahme verkürzt bzw. die Annahme von Hilfsangeboten überhaupt erhöht werden. Da viele Betroffene bisher unbehandelt bleiben, könnte dies eine der aktuell größten Herausforderungen für die Truppenpsychologie, klinische Psychologie, Psychiatrie und Sozialarbeit minimieren und die Effizienz gebündelter multiprofessioneller Methoden zur Verbesserung der mentalen Gesundheit belegen. Dies ist international der erste Ansatz, der die Angehörigen als aktiven Part in diesen frühen Prozess einbezieht. Sollte sich dies bewähren, wäre ein Transfer auch für andere Einsatzkräfte wie Polizei oder Feuerwehr sinnvoll.

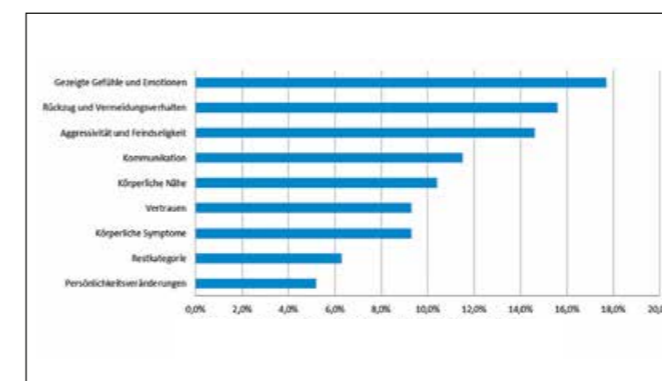


Abb. 3: Einsatzbedingte psychische Veränderungen von Soldatinnen und Soldaten aus Sicht der Angehörigen (Quelle: Grafik: Charlyn Löpke, BwKrhs Berlin; © Wesemann et al., 2019)

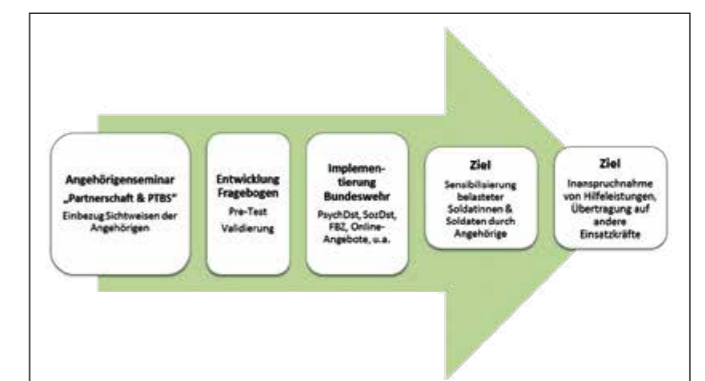


Abb. 4: Integration der Sichtweisen von Angehörigen belasteter Soldatinnen und Soldaten. (Quelle: Grafik: Charlyn Löpke, BwKrhs Berlin; © Wesemann et al., 2019)



RDir Dr. Ulrich Wesemann  
 Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
 Berlin

HFw Manuel Mahnke  
 Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
 Berlin

psychotraumazentrum@ptzbw.org

psychotraumazentrum@ptzbw.org

## Psychische Reaktionen der Rettungskräfte auf den Terroranschlag in Berlin Breitscheidplatz und Optimierung der Einsatzvor- und Einsatznachbereitung

Die psychischen Folgen von Amokläufen, Terroranschlägen oder Feuergefechten sind schwerwiegender als die von Unfällen oder Naturkatastrophen. Eine individualisierte Vor- und Nachbereitung für die Einsatzkräfte ist daher notwendig, um psychische Begleitreaktionen zu minimieren. Eine Differenzierung der psychischen Auswirkungen nach Berufsgruppen, Geschlechtern und Ereignissen ist dafür notwendig.

In Europa gehört Deutschland aktuell neben Frankreich, Großbritannien, Spanien und Belgien zu den Ländern mit der höchsten Terrorgefahr. Die psychischen Folgen, die diese vorsätzlich herbeigeführten Taten bei Einsatzkräften und in der Allgemeinbevölkerung hinterlassen, sind schwerwiegender als bei Unfällen oder Naturkatastrophen. Entsprechend gilt dies auch für Soldatinnen und Soldaten bei Anschlägen und Feuergefechten in militärischen Auslandseinsätzen. Unterschiedliche, individualisierte Vor- und Nachbereitungen solcher Einsätze sind daher notwendig, um psychische Begleitreaktionen zu minimieren.

Vom Psychotraumazentrum des Bundeswehrkrankenhauses Berlin wurden umfangreiche Untersuchungen nach dem Terroranschlag 2016 am Breitscheidplatz in Berlin durchgeführt, um die unterschiedlichen Auswirkungen und die Langzeitfolgen auf die Einsatzkräfte zu erfassen. Es handelt sich dabei deutschlandweit um die erste Studie, die die kurz- und langfristigen psychischen Auswirkungen eines Terroranschlags auf Rettungskräfte analysiert. Dafür wurden die beim Terroranschlag in Berlin Breitscheidplatz vor Ort eingesetzten

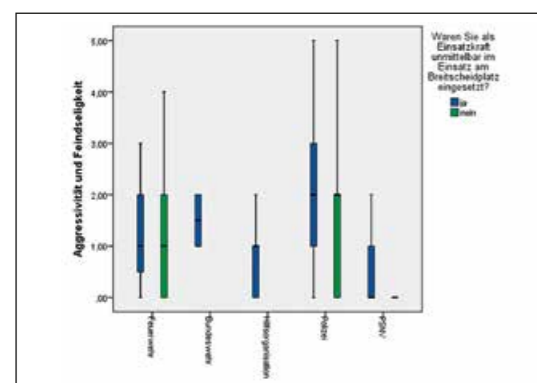


Abb. 1: Signifikant höhere Aggressivität und Feindseligkeit der exponierten Polizeikräfte 3 Monate nach dem Terroranschlag am Breitscheidplatz Berlin 2016

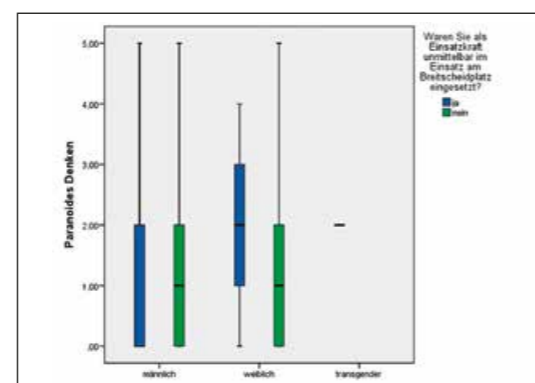


Abb. 2: Signifikant stärker ausgeprägtes paranoides Denken der exponierten transmännlichen und den exponierten weiblichen Einsatzkräften 2 Jahre nach dem Terroranschlag am Breitscheidplatz Berlin 2016

M.Sc. Sarah Polk  
 Max-Planck-Institut für Bildungsforschung  
 Berlin

info@mpib-berlin.mpg.de

Oberstarzt Dr. Gerd Willmund  
 Psychotraumazentrum der Bundeswehr  
 Berlin

psychotraumazentrum@ptzbw.org

Rettungskräfte mit ihren nicht eingesetzten Kolleginnen und Kollegen verglichen. Insgesamt wurden 120 Einsatzkräfte eingeschlossen und über zwei Jahre lang untersucht.

Als Ergebnis zeigte sich, dass die exponierten weiblichen Einsatzkräfte drei Monate nach dem Anschlag signifikant stärker unter Stress und ausgeprägtem Misstrauen litten. Während die Stressbelastung zwei Jahre später nicht mehr beobachtbar war, hatte sich das Misstrauen im Verlauf der Zeit noch weiter verstärkt. Ähnliche Effekte fanden sich bei einer transmännlichen Einsatzkraft. Hier lag das Misstrauen drei Monate nach dem Anschlag sogar noch eine Standardabweichung höher als bei den exponierten weiblichen Einsatzkräften; zwei Jahre später hatte es sich an das erhöhte Niveau der weiblichen Einsatzgruppe angeglichen. Die eingerückten Polizeikräfte hatten über den gesamten Untersuchungszeitraum ein höheres Maß an Feindseligkeit und Aggression. Feuerwehrleute der exponierten Gruppe zeigten über die zwei Jahre signifikante Einbußen in umweltbezogener Lebensqualität.

Die langanhaltenden Unterschiede zwischen den Berufsgruppen und Geschlechtern geben Hinweise für Optimierungsmöglichkeiten der Einsatzvor- und Nachbereitung. Schwächen wurden vor allem bei der Krisenintervention des Critical Incident Stress Management gefunden. Die Teilnahme an diesen

Maßnahmen hatte eine eher schädliche Wirkung. Die Ursachen dafür werden in „negativer Verstärkung“ von Vermeidungsverhalten oder dem Einsatz psychotherapeutischer Elemente von Laien gesehen.

Als Folgeprojekt aus diesen Untersuchungen wurde das Forschungsprojekt CASH (Calamities, Anxiety, Stress & Hostility) konzipiert. In dieser weiterführenden Studie sollen die Symptome von zivilen Einsatzkräften sowie von Soldatinnen und Soldaten nach kritischen Ereignissen im In- und Ausland erfasst werden. Dabei wird nach Berufsgruppen, Truppengattungen, Geschlechtern und Einsatzart differenziert. Diese Ergebnisse könnten bei der Entwicklung von Trainingsmaßnahmen, die speziell auf die einzelnen Berufsgruppen bzw. Truppengattungen zugeschnitten werden, helfen. Für die Einsatzvor- und Einsatznachbereitung könnten eventuell ebenfalls Module daraus abgeleitet werden. Der Vorteil läge darin, dass dann neben der allgemeinen Vor- und Nachbereitung zusätzliche individualisierte Module für die einzelnen Berufsgruppen, Truppengattungen und Geschlechter zur Verfügung stünden.



Abb. 3: In Berlin wird die Gedenkstätte am Breitscheidplatz auch 3 Jahre nach dem Anschlag von Besuchern stark frequentiert (Foto: Frank Eggen, BwKrhS Berlin; © Wesemann et al. 2020)



Abb. 4: Weihnachtsmarkt am Breitscheidplatz an der Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche im Jahr 2019 (Foto: Frank Eggen, BwKrhS Berlin; © Wesemann et al. 2020)

ORR Oliver Daum  
Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe  
Manching

OLt Martin Knaup  
Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe  
Manching

ZentrLuRMedLw@bundeswehr.org

ZentrLuRMedLw@bundeswehr.org

## Arbeitsplatzanalyse im Waffensystem Eurofighter – ein Beitrag zur Human System Optimization

Die Modernisierung bestehender als auch die Einführung neuer Flugzeugmuster verlangt von den Luftfahrzeugführerinnen und Luftfahrzeugführern eine ständige physische als auch psychische Anpassung an Ihren Arbeitsplatz. Dabei sind es vor allem menschliche Leistungsgrenzen (Human Performance Limitations, HPL), welche die Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems als Gesamtsystem begrenzen und zu überwinden sind.

Die Fähigkeiten des Menschen zu steigern ist ein gesamtgesellschaftliches Ziel bei dem vor allem die Streitkräfte ein originäres Interesse an der Steigerung der Leistungs- und Durchhaltefähigkeit ihrer Soldatinnen und Soldaten und Waffensysteme haben, um gegnerischen Streitkräften überlegen zu sein oder in Einsätzen besser bestehen zu können. Für die Luftwaffe als ein System der gesamtstaatlichen Sicherheitsfürsorge bedeutet dies die Weiterentwicklung zu einem luftgestützten Wirkverbund bemannter und unbemannter Systeme im gesamten Fähigkeits- und Intensitätsspektrum des Luftraums.

Auf Ebene eines einzelnen Mensch-Maschine-Systems bedeutet dies die technisch als auch biologisch bedingten Leistungsgrenzen des Systems zu kennen, um mögliche Belastungswiderstände auszuweiten, die Systemintegration zu verbessern und so die Performance des Arbeitssystems als Teil eines größeren Systems (System of Systems) zu verbessern. Um den Erfolg von Trainingsmaßnahmen, wie Human Performance Enhancement (HPE), im Sinne einer auf die biomechanischen und mentalen Anforderungen fokussierten Intervention zielgerichtet anzuwenden (Human-Performance-Optimization,

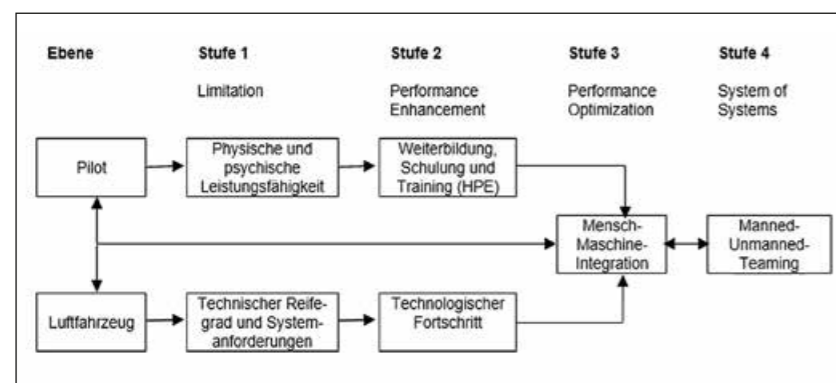


Abb. 1: HSO Zyklus

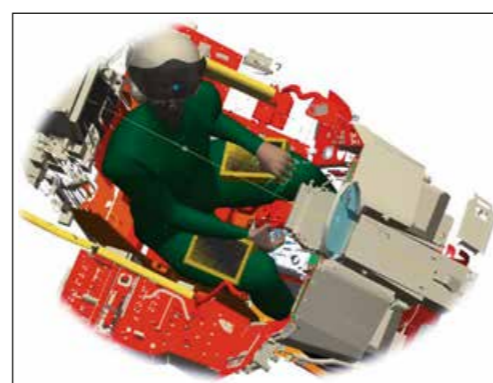


Abb. 2: Statische Haltesimulation mit RAMSIS (digitales Menschmodell) für die virtuelle Produktentwicklung

HPO) und auf das Mensch-Maschine-System abzustimmen (Human-System-Optimization, HSO) bedarf es einer entsprechenden Analyse der vorhandenen Arbeitsplätze in den fliegenden Waffensystemen der Luftwaffe und der Systemverbünde.

Im Rahmen der biomechanischen Arbeitsplatzanalyse Eurofighter werden die physiologischen Grundlagen mechanischer Belastungen des Menschen sowohl in statischen als auch in dynamischen Computersimulationen analysiert, um die Wechselwirkungen der Pilotinnen und Piloten mit ihrer Umwelt zu beschreiben. Hierzu wurden High G-Acceleration Sorties aus dem Tactical Combat Training Programm (TCTP) ausgewertet und eine statistische Flugstundenbiographie mit entsprechenden Anteilen von Flugstunden mit Luftkämpfen gegenüber der gesamten Flugstundenbelastung erstellt. Zusammen mit einer tri-achsialen Videoanalyse der Kopfkinematik im Eurofighter Simulator beim Training von Basic-Fighter-Maneuvers und von MRT-Aufnahmen des menschlichen Kopfes in der Transversal- und der Sagittal-/Medianebene ist es möglich über den ermittelten Schwerpunkt und den von der Halswirbelsäule aus berechneten Trägheitstensor für jegliche Bewegung des Kopfes die musculoskeletalen Belastungen zu analysieren. Auf Basis speziell geflogener Luftkämpfe und Aufzeichnung der Helmbewegungen lassen sich durch Simulation dieser Flugmanöver die mechanischen Belastungen zu jeder Zeit des Fluges mit der dabei eingenommenen Körperhaltung in allen physikalischen Freiheitsgraden bestimmen.

Eine psychologische Arbeitsplatzanalyse ergänzt die biomechanische Analyse, um die mentalen Anforderungen in einem Cockpit eines Kampfflugzeuges der Generation 4+ in ein ergänzendes Konzept zur Steigerung der mentalen Belastungsfähigkeit und

Arbeitskapazität im Sinne einer Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle einfließen zu lassen. Neben einer mittels Fragebogen zu erhebenden Selbsteinschätzung der Luftfahrzeugführer wird ein Expertenrating (Fluglehrerinnen und Fluglehrer, Testpilotinnen und Testpiloten, Fliegerärztinnen bzw. Fliegerärzte und Fliegerpsychologinnen und -psychologen) die Daten objektivieren. Langfristig sollen inflight Messungen physiologischer Parameter weitere objektive Daten zur Bestimmung des Belastungsgrades der Luftfahrzeugführerinnen und -führer liefern, um subjektive Daten weiter zu objektivieren.

Aufgrund der Zusammenfassung biomechanischer Belastungsanalyse und Fragebogenanalyse sowie einer physiologischen Datenerhebung sollte eine möglichst objektive Bewertung der Arbeitsumgebung in modernen Cockpit-Arbeitsplätzen realisiert werden können, um Interventionsmaßnahmen (z. B. HPE, Pilot Ageing) an objektiven Zielkriterien auszurichten und im Sinne einer Systemoptimierung in einem iterativen Prozess weiterzuentwickeln und die Leistung des Gesamtsystems sich ändernden Anforderungen anzupassen und zukunftsfähig zu gestalten.



Abb. 3: Full Mission Simulator (FMS) Eurofighter EF 2000 Basic Fighter Maneuver (BFM)



Abb. 4: Überkopfblick rechts bei bis zu 9 Gz aus der Z-Achse (BFM)



Abb. 5: Eurofighter EF 2000 TaktLwG 74

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

schiffmedinstm@bundeswehr.org

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

schiffmedinstm@bundeswehr.org

## Wie wirken sich Ausdauertraining und/oder wiederholte Hyperoxie beim Sauerstofftauchen auf den Immunstatus aus?

**Oxidativer Stress durch Hyperoxie und/oder Ausdauersport kann Einfluss auf den Immunstatus haben. Isolierte Immunzellen von Kampfschwimmern, Ausdauertrainierten und Kontrollpersonen wurden definierter hyperbarer Hyperoxie ausgesetzt. Kampfschwimmer und Ausdauertrainierte weisen einen mehr aktivierten, aber auch adaptiveren Immunstatus auf, was auch von Relevanz ist für klinische HBO-Therapie (hyperbare Sauerstofftherapie).**

Rezidivierender oxidativer „Stress“ ist Teil der Physiologie und wird mit einer Vielzahl positiver und negativer Effekte auf die Gesundheit in Verbindung gebracht, von immunprotektiven bis hin zu deletären Veränderungen, zu denen auch degenerative und maligne Erkrankungen zählen. Es gibt Hinweise, dass moderater oxidativer „Stress“ bei Ausdauersport (Abb. 1) eher zu Immunprotektion beiträgt, im Gegensatz zu extremer oxidativer Belastung.

In den Streitkräften sind Taucher, Minentaucher und Kampfschwimmer (Abb. 2) der Marine, in geringem Maße fliegendes Personal sowie Patienten und Betreuungspersonal in der klinischen HBO-Therapie in erheblichem Maße rezidivierender Hyperoxie und somit vermehrtem oxidativem Stress ausgesetzt. Die verfügbare Literatur zu zellulären Effekten rezidivierender Hyperoxie beim Menschen ist sehr eingeschränkt und macht umfangreiche Vorlauftforschung notwendig, um deren mögliche gesundheitliche Effekte auf den Soldaten seriös einschätzen und die HBO-Therapie zielführender und effektiver einsetzen zu können.

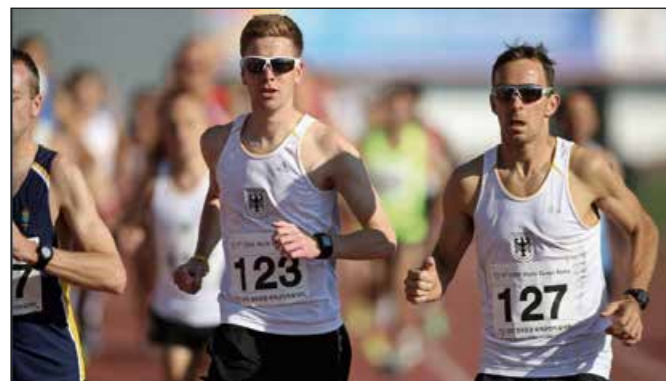


Abb. 1: Ausdauersport



Abb. 2: Kampfschwimmer der Deutschen Marine

Stabsarzt Tatjana Noy  
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine  
Kronshagen

schiffmedinstm@bundeswehr.org

Eine aktuelle Studie am SchiffMedInstM untersuchte deshalb, welchen Einfluss das Tauchverfahren der Kampfschwimmer, die Kombination aus hoher Schwimmbelastung und Tauchen mit reinem Sauerstoff, auf deren Immunstatus hat. Verglichen wurden die Kampfschwimmer hierbei mit Ausdauerathleten und einer Kontrollgruppe lediglich normalaktiver Soldaten.

Methode: die Untersuchungen wurden nach Genehmigung durch die Ethikkommission der Christian-Albrechts-Universität Kiel an isolierten mononukleären Zellen des peripheren Blutes (PBMCs) der Probanden vorgenommen, welche nach Isolierung in einem in-vitro Ansatz einem definierten hyperbaren Hyperoxie-Stress (Experimental-DK; 400 kPa O<sub>2</sub>, 240 min) (Abb. 3) versus Kontrollversuch (Luft, Normaldruck) ausgesetzt wurden. Vorher, direkt nach Hyperoxie-Stress und nach 18 Std wurden die Zellen auf DNA-Doppelstrangbrüche (Einzelzell-Gelelektrophorese (SCGE)), auf inflammationsrelevante und Sauerstoffstress-vermittelte Genexpression mittels real-time PCR (Polymerase Chain Reaction), auf Hyperoxie-vermittelte Immunzellaktivierung und Anzeichen für Apoptose mittels Durchflusszytometrie untersucht.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen: die körperlich hochaktiven und regelmäßig erheblicher Hyperoxie ausgesetzten Kampfschwimmer unterscheiden sich im Hinblick auf den



Abb. 3: Experimentale-Druckkammer am SchiffMedInstM

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

schiffmedinstm@bundeswehr.org

Immunstatus teilweise deutlich von regulären Ausdauersportlern und durchschnittlich Aktiven. Die isolierten PBMCs der Kampfschwimmer wiesen Zeichen der Adaptation an rezidivierende Hyperoxie auf, was sich aus unterschiedlichen Ergebnissen in der SCGE (18 h nach Hyperoxie) (Abb. 4) im Vergleich zu Athleten und Kontrollen und den Daten zur Genexpression (NQO1 und HO-1) ergab. Auch wiesen Kampfschwimmer im Vergleich mehr Zeichen eines proinflammatorischen Immunprofils auf, die Ausdauersportler wiederum eine schnellere Reaktion auf Hyperoxiestress. Zusammenfassend scheinen sowohl Kampfschwimmer als auch ausdauertrainierte Sportler einen im Gegensatz zu normalgesunden Personen mehr aktivierten, aber auch adaptiveren Immunstatus aufzuweisen.

Diese Ergebnisse stellen einen Anfang dar, die komplexen Zusammenhänge zwischen körperlicher Aktivität und erheblicher Hyperoxie und die mit beiden Belastungen verbundenen Effekte wiederholten oxidativen Stresses auf den Immunstatus zu erfassen. Weitere Studien sind notwendig, um diese Daten für das Sauerstofftauchen und auch im Hinblick auf die Effekte des Ausdauersports auf das Immunsystem weiter zu erhärten. Damit lassen sich neue Erkenntnisse über den Zusammenhang von rezidivierendem oxidativem Stress und dem Immunstatus gewinnen, auch im Hinblick auf die Einsatzbereiche der HBO-Therapie.

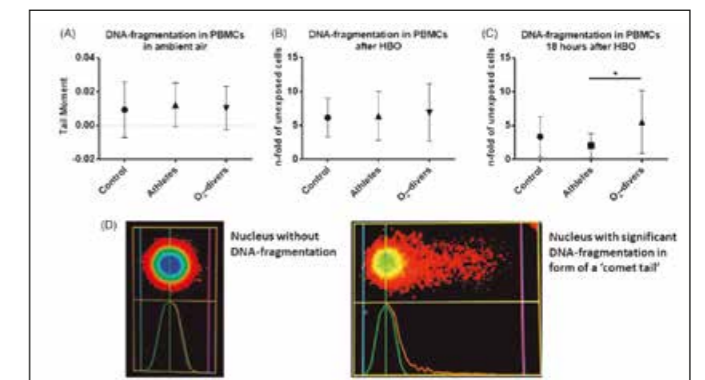


Abb. 4: Einzelzell-Gelelektrophorese zur Darstellung von DNA-Fragmentation nach hyperbarer Hyperoxie

Oberstarzt Prof. Dr. Christian Willy  
Bundeswehrkrankenhaus Berlin  
Berlin

BwKrhsBerlinKlinik14Unfallchirurgie@bundeswehr.org

## PTmHBP – Praktikabilitätstestung der magistralen Herstellung von Bakteriophagen zur Therapie septischer Infektionen an der unteren Extremität (PhagoFlow)

**Multiresistenz von Bakterien gegen Antibiotika ist eine gravierende weltweite Bedrohung der Gesundheit, die auch von hoher wehrmedizinischer Relevanz ist. Mögliche Ergänzung zur antibiotischen Therapie sind Bakteriophagen, Viren, die auf Bakterien als Wirtsorganismen spezialisiert sind. Im Projekt PhagoFlow werden geeignete Bakteriophagen isoliert und zur klinischen Anwendung verfügbar gemacht.**

Trotz der erheblichen technischen Fortschritte vieler Bereiche der Medizin in den letzten Jahrzehnten muss die postoperative Infektion für die muskuloskeletale Chirurgie als große Herausforderung angesehen werden. So konnte trotz modernster Antibiotikaphylaxe und -therapie, optimierter Krankenhaushygiene, präklinischer sowie intensivmedizinischer Versorgung die Infektionsrate nicht weiter entscheidend reduziert werden. Akzentuiert wird die Problematik erheblich durch die aktuell zunehmende Verbreitung multiresistenter Erreger.

Multiresistenz gegen Antibiotika (AMR) ist weltweit und auf höchster politischer Ebene als ernste Gefahr für die Gesundheit heutiger und künftiger Generationen anerkannt. Basierend auf Szenarien steigender Medikamentenresistenzen für sechs Krankheitserreger schätzten Expertinnen und Experten, dass AMR bis 2050 bis zu 10 Millionen Todesopfer jährlich verursachen könnten. Selektionsdrücke, die einem zu großzügigen Umgang mit Antibiotika folgten, haben zur Entstehung von „Superbugs“ geführt, zu Bakterien, die gegenüber praktisch allen kommerziellen Antibiotika resistent sind. Expertinnen und Experten befürchten, dass die Gesellschaft in eine vor-

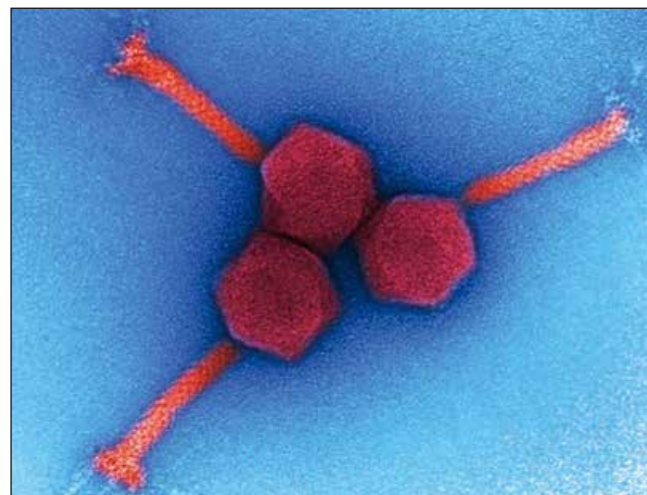


Abb. 1: Coliphage, Elektronenmikroskopische Darstellung, farbig (Quelle: Leibniz Institut DSMZ (Dr. I. Korf, Dr. J. Wittmann) und HZI, ZEIM, Zentrale Einheit Mikroskopie (Prof. M. Rohde); www.phagoflow.de)

antibiotische Ära zurückkehren könnte, in der einfache Infektionen ganze Populationen auslöschen könnten und chirurgische Eingriffe lebensbedrohlich wären.

Multiresistenz gegen Antibiotika ist auch von hoher wehrmedizinischer Relevanz, da traumatische Verletzungen im Einsatz häufig von einer Kontamination der Wunde und nachfolgende Infektion mit hochgradig resistenten bakteriellen Erregern begleitet sind. Die erfolgreiche Behandlung dieser multiresistenten Infektionen ist in vielen Fällen entscheidend für das Überleben bzw. die gesundheitliche Wiederherstellung der Verwundeten.

Eine der vielversprechenden Behandlungsmethoden ist die Phagentherapie, der therapeutische Einsatz von Bakteriophagen (kurz Phagen). Dabei handelt es sich um Viren, die ausschließlich Bakterien befallen, töten und sehr spezifisch sind: ein Phage kann nur ein Bakterium mit passender Zelloberflächenstruktur angreifen (Abbildung 1). Phagen werden bisher vor allem im osteuropäischen Raum therapeutisch eingesetzt und in Westeuropa und Deutschland nicht oder nur eingeschränkt angeboten.

Das Forschungsprojekt untersucht, ob die heutigen biopharmazeutischen Möglichkeiten es erlauben, Phagenpräparate in der Krankenhausapotheke individuell auf die Patientinnen bzw. den Patienten abgestimmt und noch rechtzeitig zum therapeutischen Einsatz zuzubereiten. Projektfokus sind durch multiresistente Erreger infizierte Wunden an Armen und Beinen. In der ersten Phase des Projektes werden aus verschiedenen Quellen, wie beispielsweise Krankenhaus-Abwässern, Phagen isoliert, charakterisiert und in einer sogenannten

Phagenbank gesammelt. Da Krankenhaus-Abwässer eine hohe Konzentration an klinisch relevanten Bakterien, einschließlich multiresistenter Stämme aufweisen, sind sie zugleich ein Habitat für Bakteriophagen, die auf diese Bakterien als Wirtsorganismen spezialisiert sind. Nachfolgend werden die Phagen in biotechnologischen Verfahren so produziert, dass sie in gereinigter Form der Krankenhausapotheke als pharmazeutische Wirkstoffkomponente bereitgestellt werden können (Abb. 2).

Die zweite Projekt-Phase hat die Patientenbehandlung zum Ziel. Zunächst werden Erreger aus dem Wundmaterial eines Patienten auf Phagen-Empfindlichkeit typisiert und anschließend eine darauf abgestimmte Phagen-Zubereitung hergestellt. Das Projekt wird aus dem Innovationsfond des gemeinsamen Bundesausschuss (gBA) für drei Jahre mit insgesamt ca. 2,6 Millionen Euro gefördert. Das Projekt liefert wichtige Erkenntnisse über die Phagentherapie als Ergänzung der klassischen Antibiotikatherapie, insbesondere in Fällen, in denen Patienten antibiotisch austherapiert sind. Im Erfolgsfall könnte eine individualisierte Phagentherapie als zugelassene Gesundheitsleistung etabliert werden.



Abb. 2: Herstellung der Phagen als pharmazeutische Wirkstoffe unter Einhaltung der Anforderungen des pharmazeutischen Qualitätssicherungssystems GMP. Der zuvor im Labor entwickelte Produktionsablauf wird in Abhängigkeit von der Konzentration des Phagen im Kulturüberstand, seiner Ausbeute nach der Aufreinigung, seiner Stabilität und des klinischen Verbrauchs skaliert und durchgeführt. Nach der Produktion wird jeder Phagen-Wirkstoff in Aliquots abgefüllt und auf Gehalt, Identität, biologische Aktivität (Potenz) und Reinheit geprüft (Quelle: Fraunhofer ITEM (Prof. Dr. H. Ziehr); www.phagoflow.de)

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

BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org

Oberstabsarzt Dr. med. Sven Duda  
Bundeswehrkrankenhaus Westerstede  
Westerstede

BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org

## Nutzung von 3D-Druck-Technologien in der simulationsgestützten Vermittlung neurotraumatologischer Kenntnisse für Einsatzchirurgen

Die Nutzung von 3D-Drucktechniken in der Simulation von einsatzrelevanten Kopfverletzungsmustern zur Einübung der adäquaten operativen Zugänge und Techniken in der Einsatzvorbereitung für Chirurgen ist Gegenstand eines gemeinsamen Forschungsprojektes des Labors für Fertigungstechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg und der Abteilung für Neurochirurgie des Bundeswehrkrankenhauses (BWK) Westerstede.

Gefechts- oder anfallsbedingte Explosions- und Schussverletzungen des Hirnschädels gehen oftmals mit notfallmäßig operationspflichtigen, raumfordernden intrakraniellen Läsionen einher. Das Verständnis der dreidimensionalen Beziehung von äußerer Verletzung, intrakranieller Läsion und Anatomie des Hirn- und Gesichtsschädels ist für die Operationsplanung dabei essentiell. Im Auslandseinsatz stehen dem Chirurgen dazu häufig allenfalls nur zweidimensionale axiale CT-Daten zur Verfügung. Die Projektion der eigenen räumlichen Vorstellung auf den Patienten ist dabei eine schwierige Transferleistung, die es unter den besonderen Anforderungen des Auslandseinsatzes zu bewältigen gilt; dies ist umso problematischer, als in den meisten derartigen Einsatzszenarien nicht die Präsenz eines ausgebildeten Neurochirurgen vorgesehen ist. Diesem Problem zu begegnen ist das Hauptziel eines gemeinsamen Forschungsprojektes des Labors für Fertigungstechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg und der Abteilung für Neurochirurgie des BWK Westerstede. Gegenstand des Projektes ist die Nutzung von 3D-Drucktechniken in der Simulation von einsatzrelevanten Kopfverletzungsmustern zur Einübung der adäquaten operativen Zugänge und Techniken in der

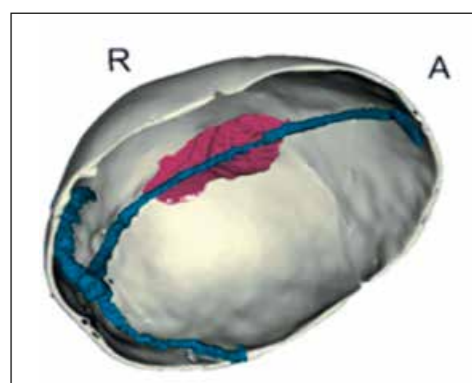


Abb. 1: Virtuelles 3D Modell Virtuelle Darstellung eines segmentierten Vertex-Epiduralhämatoms (VEDH). Anterior (A), Rechts (R)



Abb. 2: FDM Modell des VEDH. Umsetzung des Modells aus Abb. 1 durch FDM Druck. Nach Beleuchtung des semi-transparenten Materials von unten

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

forschung@hsu-hh.de

Hauptmann d.R. Marc Fette, M.Sc.  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr  
Hamburg

forschung@hsu-hh.de

Einsatzvorbereitung für Chirurgen. Hierzu werden virtuelle 3D-Modelle von typischen neurotraumatologischen Krankheitsbildern durch eine Segmentierungssoftware erstellt (Abb.1).

Es werden dann anhand dieser 3D-Datensätze mittels 3D-Druck dreidimensionale Objekte erzeugt (Abb.2). Da bei diesen Modellen dann jeweils die entsprechenden CT-Bilder als Datensatz zur Verfügung stehen werden kann die o.g. Transferleistung im Rahmen von Kursen jederzeit und praktisch unbegrenzt geübt werden. Diese Möglichkeit kann und soll nicht nur von Einsatzchirurgen genutzt werden, sondern auch z.B. von Weiterbildungsassistenten in der frühen Phase der Weiterbildung im Fach Neurochirurgie.

Es handelt sich beim 3D-Druck um ein Verfahren der additiven Fertigung unter Verwendung von CAD-Daten. Durch schichtweise Materialdeposition kommt es dabei zur Herstellung von dreidimensionalen Objekten. Dabei werden unter anderem das Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing und das Rapid Tooling als Verfahrensvarianten voneinander unterschieden. Der wesentliche Unterschied dieser Varianten liegt lediglich in der Verwendung des additiv gefertigten Objekts.

Limitationen der Anwendbarkeit der Technologie sind der hohe Aufwand für die 3D-Modellierung und Datenaufbereitung der

CT-/MRT-Daten. Die derzeit vergleichsweise schlechte Qualität der Bauteile und der hohe Produktionsaufwand bei höheren Stückzahlen stellen weitere Herausforderungen dar. Es konnten aber bereits anhand von Testdatensätzen erste Ergebnisse produziert werden. So sind mittlerweile sind die Methoden zur Segmentierung und zur Umsetzung durch 3D-Druck etabliert. Auch wurden durch verschiedene Testdrucke erste Erfahrungen mit verschiedenen 3D-Druckverfahren gesammelt. Darüber hinaus sind im Rahmen der Kooperation bereits vollständige Schädel-Modelle durch 3D-Druck umgesetzt worden (Abb. 3). Im Zuge dessen wurden unterschiedliche additive Verfahren wie Stereolithographie (SLA), Fused Deposition Modeling (FDM) und Multi-Jet-Modeling (MJM) bezüglich der Machbarkeit erprobt und deren Qualifikation für unterschiedliche Druckaufträge sowie Anwendungen analysiert.



Abb. 3: 3D Modell Schädel. Dargestellt ist ein Schädel mit unterschiedlichen, alloplastisch rekonstruierten Knochendefekten. Parieto-occipital (blau), frontal (gelb), laterale Orbita (schwarz)

Oberfeldarzt PD Dr. med. Arnulf Willms  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

BwZKrhsKoblenzKlinikIIChirurgie  
@bundeswehr.org

Oberstabsarzt Dr. med. Aliona Wöhler  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Koblenz

BwZKrhsKoblenzKlinikIIChirurgie  
@bundeswehr.org

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

BwZKrhsKoblenzKlinikIIChirurgie  
@bundeswehr.org

## Pilotstudie zur Evaluierung der Rolle von zirkulierenden zellabstammenden Extrazellulären Vesikeln im Rahmen des Polytraumas: Entwicklung eines Bluttests zur Erkennung innerer Verletzungen

Ein innovativer Bluttest soll helfen, Art und Schwere der inneren Verletzungen im Rahmen von Traumata anhand der Bestimmung von kleinen Zellpartikeln zu detektieren. Bei extrazellulären Vesikeln (EVs) handelt es sich um kleine Partikel, die von ihrer Ursprungszelle abgegeben werden und dieser in der Oberflächenstruktur sehr stark ähneln.

Zum Erfassen der Komplexität eines Polytraumas stehen zwar mehrere Scoringssysteme anhand der Bildgebung (Computertomographie) zur Verfügung, es existiert aber kein serologischer Marker (Bluttest), der die Komplexität des Traumas und die Immunantwort abbilden kann. Das Ziel dieses Projektes besteht darin, einen zuverlässigen serologischen Marker für das Trauma zu etablieren, eine Korrelation zwischen morphologischen bildgebenden Verfahren (CT-Traumaspirale) und zirkulierenden extrazellulären Vesikeln zu analysieren sowie eine feinere Differenzierung zwischen den polytraumatisierten Patienten und unterschiedlichen Verletzungsmustern vorzunehmen.

Im Rahmen des Pilotprojektes wurden 25 schwerstverletzte Patienten in einem Zeitraum von einem Jahr einbezogen. Sie wurden im Rahmen der weiteren Analyse in zwei Kohorten unterteilt. Die erste Gruppe umfasste alle Patientinnen und Patienten mit Verletzungen innerer Organe und die zweite Gruppe Patientinnen und Patienten ohne innere Verletzungen. Als negative Kontrollgruppe dienten 25 gesunde Probanden. Es wurde am 1. posttraumatischen Tag, am 2. Tag, am 7. sowie am 10. Tag Vollblut entnommen. Hieraus wurden die zirkulie-

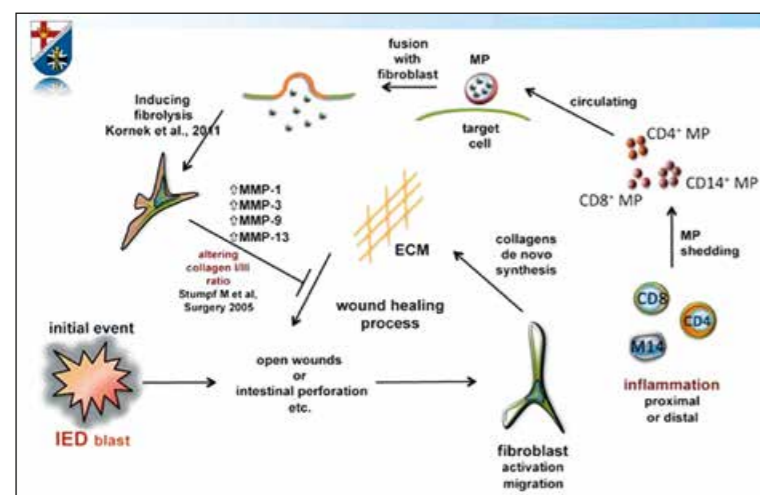


Abb. 1: Modell für die Freisetzung (MP shedding) von Mikropartikeln (extrazellulären Vesikeln) durch CD8, CD4 und M14 Zellen und deren Interaktion und Fusion mit Fibroblasten beim Trauma (Quelle: Ilaria Giusti et al., BioMed Research International, 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/703048>)

M.Sc. Sabine Urban  
Universitätsklinikum Bonn  
Bonn

redaktion@ukbonn.de

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. med. Veronika Lukacs-Kornek  
Universitätsklinikum Bonn  
Bonn

redaktion@ukbonn.de

Oberstleutnant d.R. Dr. rer. nat. Miroslaw Kornek  
Universitätsklinikum Bonn  
Bonn

redaktion@ukbonn.de

renden EVs isoliert. Als extrazelluläre Vesikel (EVs) werden Exosome sowie Mikrovesikel definiert, die im Serum sowie Gewebe nachweisbar sind und die gleichen Antigeneigenschaften besitzen wie ihre Ursprungszelle (Abb. 1). Im Anschluss wurden sie mittels einer Durchflusszytometrie quantifiziert. Die genaue Zuordnung einzelner EVs erfolgte mittels Multiverfärbungen hinsichtlich spezifischer Oberflächenantigene.

Mittels dieses Verfahrens lässt sich sowohl zwischen den Gruppen mit und ohne innere Verletzungen und zwischen Verletzten und der gesunden Kontrollgruppe differenzieren. Die höchsten Werte wurden in der Kohorte mit polytraumatisierten Patientinnen und Patienten mit Verletzungen der inneren Organe am Tag 1 und Tag 7 erhoben, gefolgt von der Kohorte mit überwiegend knöchernen Traumamustern. Es konnte ein Grenzwert für das Vorliegen innerer Verletzungen bestimmt werden. Die Sensitivität lag dabei bei 94 % und die Spezifität bei 71 %.

Im zweiten Schritt wurden die CT morphologischen Daten mit den molekular-biologischen Parametern verglichen. Die Pearson-Korrelation zeigte eine signifikante Korrelation zwischen Verletzungsschwere und EV-Konzentration. Im zeitlichen Verlauf zeigte sich ein Abfall der EV-Konzentration in der Kohorte ohne innere Verletzungen während in der Gruppe mit inneren

Verletzungen keine signifikante Abnahme zu verzeichnen war (Abb. 2).

Die vorliegende Pilotstudie zeigt, dass es möglich ist, einen zuverlässigen serologischen Marker für die Bestimmung der Schwere eines Polytraumas (insbesondere mit Verletzungen der inneren Organe) zu etablieren. Das zeitliche Verhalten der EV-Konzentration zeigt eine mögliche Korrelation mit Entwicklung des Genesungsverlaufs der Patientinnen und Patienten und der Möglichkeit für z. B. die operative Entscheidungsfindung (window of opportunity nach durchgeführten damage control surgery). Bei einer möglichen Etablierung dieses Verfahrens im Einsatz mit seinen limitierten Ressourcen wäre es potentiell möglich, sowohl die Verletzungsschwere als auch die Art der Verletzung anhand einer Blutprobe zum Beispiel in einem zu etablierenden Schnelltest zu bestimmen. Hierzu wird allerdings noch weitere Forschungsarbeit notwendig sein.



Abb. 2: Darstellung des intraoperativen Situs bei Verletzung innerer Organe

# 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 (BMVg), um mit den dabei gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnissen die öffentlichen Diskussionen über Militär und Sicherheit in Deutschland aktiv mit zu gestalten. 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 außer-universitären 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.



## Inklusion von Schwerbehinderten und diesen gleichgestellten Behinderten in der Bundeswehr

Eine aktuelle Studie des Zentrums für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) zeigt auf, dass weder die UN-Behindertenrechtskonvention noch der Aktionsplan des BMVg unter den Bundeswehrangehörigen bekannt sind. Zwar wird die Zusammenarbeit von Behinderten und Nichtbehinderten häufig positiv beschrieben, doch gibt auch noch Verbesserungsbedarf bezüglich der Anerkennung und Chancengerechtigkeit.

Seit dem März 2009 gilt in Deutschland die UN-Behindertenrechtskonvention (UN-BRK). Diese enthält die Verpflichtung, die international entwickelten Normen zur Inklusion von schwerbehinderten und diesen gleichgestellten behinderten Menschen in nationales Recht umzusetzen. Neben dem Schutz vor Benachteiligung werden die volle und wirksame Teilhabe an der Gesellschaft und die Einbeziehung in die Gesellschaft als die zentralen Prinzipien der UN-BRK beschrieben. Der frühere Defizitansatz in der Deutung von Behinderung wird durch ein menschenrechtliches Modell ersetzt. Die Teilhabe behinderter Menschen wird zu einer Frage des Rechts auf Zugang und ist nicht mehr an körperliche oder geistige Besonderheiten gebunden. Behinderung wird vielmehr als soziale Konstruktion aufgefasst, die durch eine hinderliche Umgebung zutage tritt.

Inklusion ist der zentrale Gedanke der UN-BRK: Menschen mit Behinderung und deren Belange sollen von Anfang an in alle Lebens- und Arbeitsbereiche mit einbezogen werden. Vielfalt wird respektiert und Unterschiedlichkeit zur Normalität. Barrieren sind abzubauen, um eine gleichberechtigte soziale Teilhabe zu gewährleisten.



Abb. 1: Piktogramm Rollstuhl Tarnfleck  
(Quelle: PIZ Personal)



Abb. 2: Rollstuhlfahrer  
(Quelle: Fotolia/RAM)

Im November 2014 hat das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) einen hauseigenen Aktionsplan zur Inklusion von Schwerbehinderten und diesen gleichgestellten Behinderten vorgelegt. Dieser ist handlungsorientiert und umfasst 49 Einzelmaßnahmen. Der Fokus liegt auf einer Reihe von Maßnahmen zur Förderung der Barrierefreiheit und der beruflichen Teilhabe von Menschen mit Behinderungen am Arbeitsleben. Der Aktionsplan listet fünf Handlungsfelder auf: Bewusstseinsbildung, Arbeitsleben, Soldat und Behinderung, Bildung und Ausbildung sowie barrierefreie Informationstechnik. Der Großteil der schwerbehinderten und diesen gleichgestellten behinderten Menschen in der Bundeswehr ist im zivilen Bereich der Bundeswehr tätig (93 Prozent), nur wenige gehören zum militärischen Personal (7 Prozent). Das Thema Inklusion ist folglich in der Bundeswehr hauptsächlich ein ziviles Thema, da die große Mehrheit der Betroffenen in diesem Bereich tätig und im Dienstalltag wahrnehmbar ist.

Das Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) wurde vom Stabelement Chancengerechtigkeit, Vielfalt und Inklusion (StEl ChgVI) damit beauftragt, die Bekanntheit und den Umsetzungsstand des Aktionsplans BMVg sowie das aktuelle Inklusionsklima in der Bundeswehr zu evaluieren. Die Datenerhebung erfolgte sowohl unter Schwerbehinderten und Gleichgestellten als auch unter Nichtbehinderten und wurde als schriftliche, postalische Befragung konzipiert und durchgeführt. Die Studienergebnisse verdeutlichen, dass die UN-BRK und der Aktionsplan des BMVg sowohl unter den Nichtbehinderten als auch den Schwerbehinderten und Gleichgestellten überwiegend unbekannt sind. Nur wenige Einzelmaßnahmen des Aktionsplans sowie deren Umsetzungsstand sind den Befrag-



Abb. 3:  
Fragebogenversand  
(Quelle: ZMSBw/Adam)

ten bekannt, allerdings werden sie durchweg als wichtig eingeschätzt. Weitere Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Thema Inklusion bereits im Bewusstsein vieler Bundeswehrangehöriger angekommen ist und auch die Zusammenarbeit wird mehrheitlich positiv beschrieben. Allerdings gibt es auch Vorbehalte gegen Schwerbehinderte und Gleichgestellte, insbesondere unter den nichtbehinderten Soldatinnen und Soldaten.

Die Betroffenen selbst wünschen sich mehr Anerkennung durch Vorgesetzte und Kollegen bzw. Kameraden sowie Chancengerechtigkeit. Zur Erlangung der vollen Inklusion ist es notwendig, die Arbeitskultur in der Bundeswehr weiter zu modifizieren, um schwerbehinderten und diesen gleichgestellten behinderten Menschen nicht nur einen Arbeitsplatz, sondern auch Karriere-chancen zu eröffnen.



Abb. 4: Logo des Stabelements Chancengerechtigkeit, Vielfalt und Inklusion  
(Quelle: Bundeswehr)



## 4

## Geowissenschaftliche Forschung

Die Kenntnis und die Bewertung von Geofaktoren, wie zum Beispiel Geländeerief, Gewässer, Vegetation, Klima, Wetter, Seegang, Straßennetz oder Bebauung sind im Rahmen von militärischen Operationen und militärischen Fähigkeiten von großer Bedeutung. Die vielfältigen und anspruchsvollen Aufgaben der Bundeswehr lassen den Bedarf an qualitätsgesicherten Informationen über die raumzeitliche Variabilität von Geofaktoren stetig wachsen. Dies gilt sowohl bei Einsätzen im Rahmen des internationalen Krisenmanagements als auch bei der Landes- und Bündnisverteidigung und bei der humanitären Not- und Katastrophenhilfe.

Das Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) ist die zentrale Dienststelle des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr und die Einrichtung mit geowissenschaftlicher Expertise im Geschäftsbereich des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg). Eine der Abteilungen des Zentrums, die Abteilung „Angewandte Geowissenschaften“, ist für die Ressortforschungsaufgabe zuständig. Die in Dezernat gegliederte Abteilung bearbeitet Themen der Navigation/Geodäsie, Geopolitik/Geographie, Erdbeobachtung/Fernerkundung, Geologie/Hydrologie/Geophysik, Geoinformatik, Kartographie, Biologie/Ökologie und Atmosphärenphysik mit der Ausrichtung auf eine bedarfsorientierte angewandte Forschungs- und Entwicklungsarbeit (FuE). Die Bearbeitung erfolgt nach dem „Add-on-Prinzip“, d.h. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden dann zielgerichtet initiiert und vorgenommen, wenn es nach entsprechender Prüfung keine Möglichkeit gibt, den FuE-Bedarf durch Rückgriff auf Ergebnisse von externen Stellen der Hochschul- und Wissenschaftslandschaft zu decken.

Neben der FuE-Aufgabe die GeoInfo-Produkte und -Beratungen zu optimieren und zu erweitern, etwa durch Gewinnung und Analyse von strukturierten und unstrukturierten Geodaten, der Erzeugung von Simulationsumgebungen, gekoppelte Ozean-/Atmosphärenmodelle oder der Bewertung von natürlichen und technischen Störpotenzialen Globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS), werden im Zuge der Digitalisierung innovative Methoden der Geoinformatik zu Speicherung, Bereitstellung, Visualisierung und Analyse von Geoinformationen mit hoher Performanz über alle Sicherheitsdomänen hinweg verfolgt. Ein wissenschaftlicher Beirat mit nationalen und internationalen Kompetenzträgern geowissenschaftlicher Fachdisziplinen unterstützt dabei das ZGeoBw in seiner Rolle als Wehrwissenschaftliche Ressortforschungseinrichtung hinsichtlich fachlicher Fragestellungen und Forschungsaktivitäten. Als langfristige Schwerpunkte der Geowissenschaftlichen Ressortforschung sind die Anwendungsfelder Big Data Analytics und Künstliche Intelligenz im GeoInfo-Kontext, Virtuelle und Erweiterte Realitäten, GeoInfo-Datenmanagement und Qualität von Online Services sowie die weitere Entwicklung im Bereich Positionsbestimmung, Navigation und Zeitfestlegung identifiziert. Die Vielfalt der betrachteten geowissenschaftlichen Fachdisziplinen und das Erfordernis auf Bedarfsänderungen im Rahmen der GeoInfo-Unterstützung auch kurzfristig reagieren zu können, setzt Flexibilität voraus und die Kompetenz, sich stets auch ad hoc mit Themen außerhalb der Schwerpunktbereiche befassen zu können. Die nachfolgenden Beispiele aus der Geowissenschaftlichen Ressortforschung verdeutlichen einmal mehr die Bandbreite der vielfältigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZGeoBw.



ORR Dipl.-Met. Rolf Thiele  
Zentrum für Geoinformationswesen  
der Bundeswehr  
Euskirchen

ORR Dr. rer. nat. Stefan Polanski  
Zentrum für Geoinformationswesen  
der Bundeswehr  
Euskirchen

ORR Dr. rer. nat. Marcus Herold  
Zentrum für Geoinformationswesen  
der Bundeswehr  
Euskirchen

zgeobwv8atmosphaerenphysik  
@bundeswehr.org

zgeobwv8atmosphaerenphysik  
@bundeswehr.org

zgeobwv8atmosphaerenphysik  
@bundeswehr.org

## Biometeorologische Gefährdungslage

Zur Erkennung von mental und physiologisch leistungsmindernden Umweltbedingungen und für entsprechende arbeitsmedizinische Präventionsempfehlungen steht das modulare Informationssystem „Biometeorologische Gefährdungslage“ im IntranetBw bereit. Der aktuelle Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt umfasst die Anpassung des Universal Thermal Climate Index (UTCI) auf den militärischen Anwendungsfall.

Das Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) hat im Rahmen seiner Kernfähigkeit zur weltweiten Analyse und Bewertung aller Umweltfaktoren automatisierte, onlinegestützte, Beratungsverfahren zur biometeorologischen Gefährdung der Soldatinnen und Soldaten in Ausbildung und Einsatz eingeführt. In dem modularen Informationssystem „Biometeorologische Gefährdungslage“ zur Analyse und Prognose umweltbedingter mentaler und physischer Leistungseinschränkungen werden in Kooperation mit dem Sanitätsdienst der Bundeswehr auch arbeitsmedizinische Präventionsmaßnahmen als Teil der „Human Performance Enhancement (HPE)“ Aktivitäten der Bundeswehr bereitgestellt.

Entgegen früherer Annahmen zur informationstechnischen Entwicklungsrichtung müssen die Anwendungen des Systems aktuell und zukünftig heterogenen Geräteformfaktoren unter diversen Betriebssystemen genügen. Die Entwicklung nativer Apps ist wegen der damit verbundenen hohen Fragmentierung der Codebasis und der hohen Abhängigkeit von den Betriebssystemen ressourcengerecht aber kaum noch möglich.

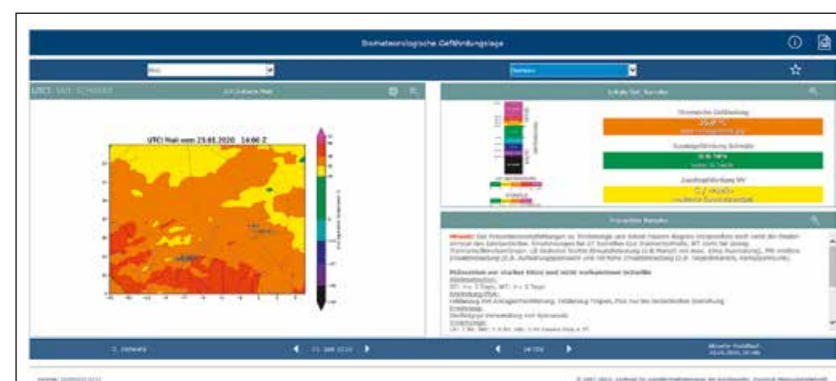


Abb. 1: Nutzeroberfläche der PWA „Biometeorologische Gefährdungslage – Vorhersage“

RAMtfr Dipl.-Ing. (FH) Anna Witzens  
Zentrum für Geoinformationswesen  
der Bundeswehr  
Euskirchen

RAR Dipl.-VerwBetrW Jan Wöhl  
Zentrum für Geoinformationswesen  
der Bundeswehr  
Euskirchen

zgeobwv8atmosphaerenphysik  
@bundeswehr.org

zgeobwv8atmosphaerenphysik  
@bundeswehr.org

Bereits für die 2018 nach nur 4 Monaten Entwicklungszeit fertiggestellte Vorhersage-App des vollautomatisierten Online-Informationssystems (Abbildung 1) wurde deshalb der Ansatz der „Progressive Web Apps“ (PWAs) gewählt. PWAs sind keine nativen Apps, sondern nutzen die jeweiligen nativen Webbrowser der Geräte und leicht zu beherrschende Webtechnologien für eine plattformübergreifende Interoperabilität. Langfristig erlaubt nur dieser Ansatz eine flexible Reaktion auf die sich entwickelnde IT-Landschaft und Anforderungen an sichere mobile Kommunikation.

Aktuell wird im ZGeoBw die Bioklimadienst-App als zweites Systemmodul entwickelt (Abbildung 2). Diese wird ab Frühjahr 2020 die aus den Ergebnisfeldern des BIOMET-Vorhersage-modells aufbereitete, sich automatisch jährlich erweiternde, human-bioklimatischen Datenbasis visualisieren und für den Download verfügbar machen. Für jeden Staat wird für die Parameter Universal Thermal Climate Index (UTCI), UV-Index und Schwüle jeweils eine Kartenserie des maximalen, minimalen und häufigsten Tagesgangs für alle 12 Monate des Jahres bereitgestellt. Zudem kann dieser Tagesgang für jede beliebige Koordinate weltweit grafisch abgerufen werden. Entsprechende Programm-Schnittstellen erlauben eine dynamische Einbindung in Online-Informationen Dritter, z. B. für Health Country Profiles des Sanitätsdienstes der Bundeswehr.

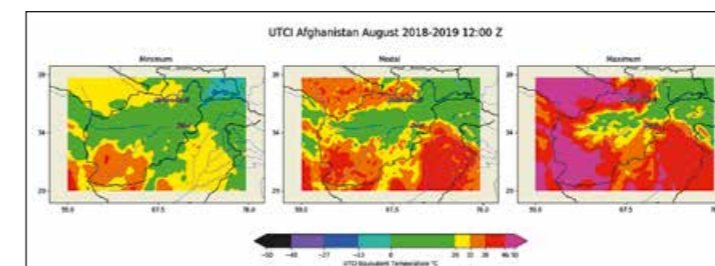


Abb. 2: Kartografischer Prototyp für einen Stundenwert des monatlichen Tagesgangs der minimalen, häufigsten und maximalen thermophysiologicalen Belastung für die PWA „Biometeorologische Gefährdungslage – Bioklimadienst“

Für die Unterstützung des GeoInfo-Umwelt-Warnmanagements wird Ende 2020 in einem dritten Systemmodul eine automatisierte Schnittstelle entwickelt, die dynamisch erzeugte biometeorologische Warnungen für jeden beliebigen Standort ausliefern kann.

Bis Ende 2021 soll der thermophysiologicalen Referenzparameter UTCI im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten für den militärischen Anwendungsfall angepasst werden (Abbildung 3). Die Öffnung des zugrundeliegenden thermophysiologicalen Modells und die Einführung eines einsatznahen Bekleidungsmodells erlauben eine dynamische Berücksichtigung

- einsatzspezifischer metabolischer Aktivitätsraten,
- verschiedener Bekleidungs- und Isolationsszenarien,
- und individueller Merkmale wie Akklimatisation, Fitness, Anthropometrie, Geschlecht und Alter.

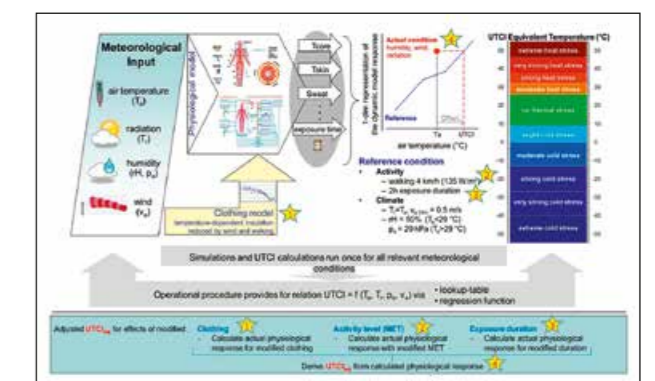


Abb. 3: Prinzip der Ableitung von UTCI-Werten, angepasst für nicht der Referenz entsprechende Kleidung, Aktivität und Expositionszeit (Quelle: BRÖDE, P. et al.: Extending the Universal Thermal Climate Index UTCI towards varying activity levels and exposure times. Windsor 2016)

## Land-/Seeübergang – kombinierte Nutzung von land- und seebezogenen GeoInfo-Daten

Im Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Höhen- und Tiefendaten verschnitten und für Anwendungen wie z. B. Amphibische Operationen im Küstenbereich bereitgestellt werden können. Das Verfahren wurde für Datensätze im Küstenbereich der Nordsee prototypisch umgesetzt und erfolgreich getestet.

Deutschland ist als außenhandels- und rohstoffabhängige Nation auf die uneingeschränkte Nutzung der See angewiesen. Aufgrund der maritimen Abhängigkeit kommt der Bundeswehr beim Schutz der Küstengewässer und angrenzender Seegebiete besondere Verantwortung zu. Für die Landes- und Bündnisverteidigung (LV/BV) sowie Evakuierungsoperationen wurden begrenzte amphibische Operationen als Fähigkeit benannt.

Der Schutz von Küstengewässern sowie der Ost- und Nordsee bedingt im Kontext von amphibischen Operationen aktuelle und qualitätsgesicherte Informationen einsatzrelevanter Geofaktoren. Die Geofaktoren „Höhen- und Tiefendaten“ werden am Beispiel von Testdaten im Bereich der Nordsee nahtlos zusammgeführt. Für eine kombinierte Nutzung von land- und seebezogenen Daten sind Problemstellungen wie z. B. unterschiedliche Lage- und Höhenbezugssysteme ebenso zu behandeln, wie die Überlappungen von Höhen- und Tiefendaten unterschiedlicher Auflösung im Küsten- und küstennahen Bereich. Für den seeseitigen Bereich werden Ausgangsdaten aus dem Digitalen Geländemodell Wasser (DGM-W), durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

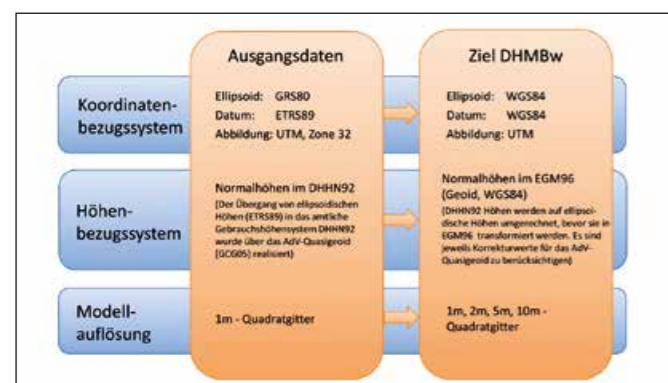


Abb. 1: Lage- und Höhenbezugssysteme für DGM-W und DHMBw

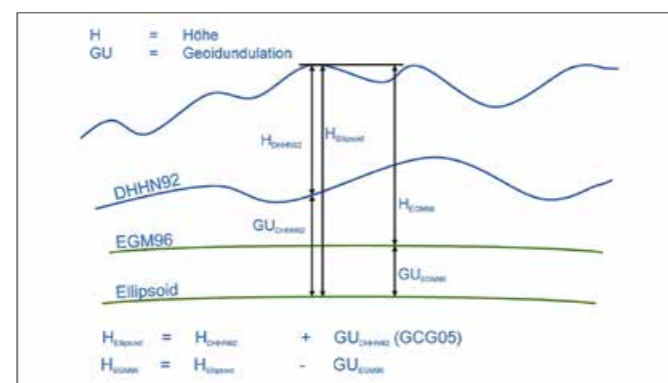


Abb. 2: Höhenkorrekturen auf Grund der Geoidundulation

bereitgestellt. Die Daten DGM-W wurden aus georeferenzierten, plausibilisierten und klassifizierten Laserdaten ermittelt (Abdeckung: Deiche, Deichvorländer, vorgelagerten Inseln, Wasserwechselzone, Gewässerbett, Wattflächen und Priele, Rinnen und Seegaten). Für den landseitigen Bereich werden Daten aus dem Digitalen Höhenmodell der Bundeswehr (DHMBw) genutzt (Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)- bzw. TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement (TanDEM-X)-Höhendaten), die seeseitig mit vollständiger Kachelabdeckung vorliegen. Das Lage- und Höhenbezugssystem für das Zielsystem wird durch das DHMBw definiert (Abb. 1).

Die Basiskoordinaten der DGM-W Daten werden aus einer UTM-Abbildung (Universal Transverse Mercator, das ist ein globales Koordinatensystem) bezogen auf das Ellipsoid GRS80 (Geodätische Referenzsystem 1980) und dem Datum ETRS89 (Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989) in das Zielsystem mit UTM-Koordinaten WGS 84 transformiert.

Für die Umrechnung der Höhenangaben im Deutschen Haupthöhennetz 92 (DHHN92) in das Höhensystem Earth Gravitational Model 96 (EGM96) ist die Geoidundulation (Abb. 2) zu berücksichtigen (EGM96 ist ein Beispiel für ein aktuelles Geoidmodell, das für WGS84-EGM96 die Geoidundulation zur Höhenanpassung liefert – Hinweis: WGS84 und ETRS89 werden hier gleichgestellt).

Für die Transformationen der Lage- und Höhenangaben in das Zielsystem wird die Safe Software FME als Datenintegrationsplattform genutzt. Mit Rasterdatenoperationen können die Datenbestände nicht final prozessiert werden (keine deckungsgleichen Pixel, unterschiedliche Rasterweiten; nach Schaffung

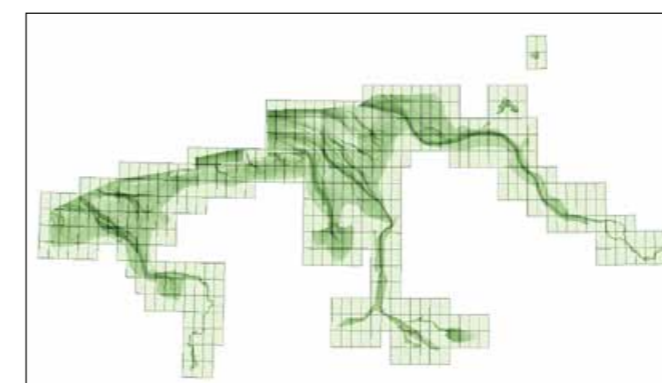


Abb. 3: Kachelung der Daten für DHMBw (3.75 Minuten)

der Voraussetzungen zur Berechnung sind die Rechenzeiten extrem zeitintensiv). Nach einer Umrechnung der Daten in PointClouds ist eine sehr schnelle Prozessierung möglich.

Für die Übernahme in Kachelungen gem. DHMBw ist für eine Auflösung im 1 m – Raster eine Speicherung in Kacheln von 3.75 Minuten vorgesehen. Unter Einsatz von FME und einem in Shapefiles vorliegenden Schema erfolgt die Kachelung (Abb. 3).

Die Überlappung der Daten aus DGM-W mit den Daten aus dem DHMBw bildet die Voraussetzung für die Bewertung der erzielten Genauigkeiten in Lage und Höhe (Abb. 4). Die überwiegende Genauigkeit der verschnittenen Höhendaten liegt im Bereich von 0,5 m. Festgestellte Differenzen über 0,5 m sind auf Maßnahmen des Küstenschutzes bzw. auf schnell veränderliche Morphologie (z.B. von Dünen im Küstenbereich) zurück zu führen. Für schnell veränderliche Morphologie werden die Höhenwerte aus dem jüngsten Datenbestand übernommen.

Große Differenzen (> 10 m) in den Tiefenangaben (z. B. in Prielen, Fahrrinnen ...) sind durch Standardwerte im DHMBw zu erklären. Im Zieldatenbestand werden für Fahrrinnen die Tiefenangaben aus dem DGM-W übernommen. Die Tiefenangaben können im Vergleich mit Daten der Electronic Navigational Chart (ENC) verifiziert werden.

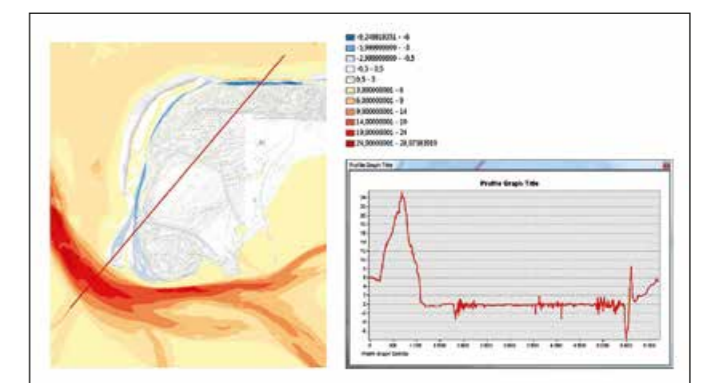


Abb. 4: Auswertung zur Höhengenaugigkeit

# 5

## Forschung Cyber / Informationstechnik

Wehrtechnische Forschung im Bereich der Cyber- und Informationstechnologien findet im Spannungsfeld zwischen zivilen, disruptiven Innovationen unter zukünftigen militärischen Randbedingungen statt. Cyber- und Informationstechnologien sollen auch unter extremen Umwelt-, Einsatz- und Gefechtsbedingungen schnell und zuverlässig verwendet werden können. Andererseits soll die Forschungsdauer auch nicht zu lang sein.

Es werden zwei Beispiele aus der breiten Palette an Forschungsaktivitäten vorgestellt.

Die Erzeugung von realzeitfähigen Lagebildern für taktische Heeresinheiten wird durch Verwendung von kommerziellem Mobilfunk in Verbindung mit dem Schwarmeinsatz unbemannter fliegender Systeme und Künstlicher Intelligenz möglich.

Der Einsatz einer privaten Cloud lässt einen virtuellen militärischen Einsatzraum zu, der sowohl aus stationären als auch verlegfähigen Komponenten besteht und als Keimzelle für eine IT-Infrastruktur erforscht wird.



Dr. Volker Krebs  
 Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung  
 der Bundeswehr  
 Koblenz

BAAINBwPosteingang@bundeswehr.org

Simon Brünjes  
 Atos SE Deutschland  
 München

info@atos.net

## Erzeugung eines gläsernen Gefechtsfeldes zur Unterstützung dynamischer Operationen (Forschungsstudie „ErzUntGlas“)

**Der Kampf um Informationsüberlegenheit ist bestimmender Faktor für eine erfolgreiche militärische Operationsführung. Ganzheitliche Verfahren sowie Technologien zur luftgestützten Aufklärung und gemeinsamen Datenverarbeitung im Informationsraum sind operativ zu erproben, um hier auch zukünftig militärisch das Heft des Handelns und die Initiative zu behalten.**

Die Entwicklung und militärische Nutzbarmachung von neuen Aufklärungstechnologien ermöglichen ein frühzeitiges Aufklären des gegnerischen Handelns. Das Gefechtsfeld wird einerseits transparenter, andererseits nimmt die Komplexität der Operationsführung auf Grund der Vielzahl von Signaturen und Parametern zu. Der von Clausewitz beschriebenen Ungewissheit des Handelns steht heute das „Gläserne Gefechtsfeld“ gegenüber.

Motivation für die Studie ist, dass nicht allein neue Aufklärungstechniken zu Erfolg und Dominanz auf dem Gefechtsfeld führen, sondern die zeitgerechte zur Verfügungsstellung der gewonnenen Informationen und eine Automatisierung der Aufklärungsleistung für den Interessenbereich bis zur Verbandsebene (Abb. 1). Methodische Anknüpfungspunkte für diesen Ansatz bietet die Vorgängerstudie „Automatisierte Augmentierte Gefechtsfeldaufklärung“, die den Teaming-Ansatz von Soldat und Robotersystem erprobte.

ErzUntGlas führt nun diesen Ansatz weiter fort und erfolgt in enger Abstimmung mit zukünftigen Großvorhaben und

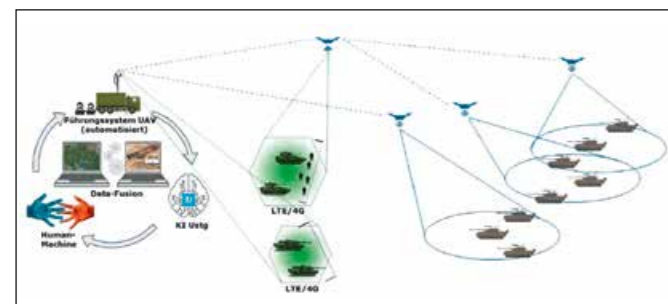


Abb. 1: Taktisches Teaming und Künstliche Intelligenz in zukünftigen militärischen Szenarien



Abb. 2: Einzelkomponenten von ErzUntGlas

Programmen, wie z. B. Digitalisierung Landbasierte Operationen oder Main Ground Combat System (MGCS).

Ziel der Studie ist ein Demonstrator auf Teileinheitsebene, der 2023 operativ in den Versuchsstrukturen des deutschen Heers taktisch eingesetzt und erprobt wird. Der Demonstrator besteht aus verschiedenen Unmanned Air Vehicle (UAV), einem bodengebundenen Leitstand sowie einem Start- Landefahrzeug.

Die UAV teilen sich in drei Kategorien auf:

- Aufklärungsdrohne zur Aufklärung des Interessenbereiches des Verbandes
- Luftgestützter Kommunikationsknoten zur Reichweiten-erhöhung der Aufklärungsdrohnen sowie Erzeugung einer 4G/5G Zelle für bodengebundene Kräfte
- Verlustdrohnen zur Aufklärung von Räumen mit hoher Gefährdung eigener Kräfte

Das Herzstück des Systems bildet der Leitstand, auf dem die Einsatzplanung und Überwachung der luftgestützten Aufklärungsoperation erfolgt (Abb. 2). Zwei Operateure sind für das Führen der eingesetzten Drohnen verantwortlich, die durch eine umfassende Künstliche Intelligenz unterstützt werden. Der Einsatz der UAV erfolgt teilautonom, d.h. auf Grundlage regelbasierter Algorithmik. Die Operateure können verschiedene Flugmuster wählen, die dann von dem System an das jeweilige Gelände und Auftrag automatisiert angepasst und durchgeführt werden.

Die Einbindung in aktuelle oder in Beschaffung stehende taktische Informationssysteme erzeugt den wesentlichen Mehrwert des Systems für den Soldaten. Die Etablierung

kurzer „Workflow“ Prozesse zwischen Mensch und Maschine sowie das direkte Tasking und Informationsfluss der UAV durch einen „Vorne“ eingesetzten Soldaten, erhöht deutlich das Lagebewusstsein und den Schutz eigener Kräfte, ohne das zusätzliche Ausrüstung erforderlich wird.

Beauftragt für die Durchführung der Studie ist das IT-Großunternehmen Atos Deutschland, dass zusammen mit den israelischen Firmen Rafael Advanced Defense Systems und Aeronautics sowie den deutschen Firmen Krauss-Maffei Wegmann und SecuNet den Erfolg dieser Studie gewährleistet. Das Vorgehen erfolgt dabei in Jahresscheiben mit jährlicher Demonstration, in denen sukzessiv der Umfang und die Komplexität des Demonstrators zunehmen. Bis 2021 erfolgt die Einbindung der UAV in den Informationsverbund auf dem Gelände der Wehrtechnischen Dienststelle 61 in Manching und weitere technische Tests, ab 2022 die operative Erprobung in Munster.

Die Teildemonstration bestehender Systemkomponenten erfolgte im November 2019 auf der WTD 61 in Manching (Abb. 3). Die ausgestellten Lösungen und Produkte haben ein sehr positives Echo der geladenen Fachexperten und militärischen Vertreter ausgelöst. Für eine vollumfängliche Einbringung dieser Studie ist die Erweiterung auf weitere Plattformen und Systeme in Nutzung geplant sowie Einbindung über die Verbandsebene hinaus zur Gewährleistung der Datenqualität.



Abb. 3: Teildemonstration im November 2019 auf der WTD 61 in Manching

TRDir Stefan Rechmeier  
 Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung  
 der Bundeswehr  
 Koblenz

BAAINBwPosteingang@bundeswehr.org

## Interoperables Cloud Computing (IOCC)

**Der Aufbau einer Cloud Computing Demonstratorumgebung stand im Mittelpunkt der in 2019 durchgeführten Maßnahmen im Rahmen IOCC. Technische Erprobungen und flankierende konzeptionelle Überlegungen waren weitere Schwerpunkte. Übergreifend koordiniert werden diese Aktivitäten auch in 2020 weitergeführt.**

Das Ziel der F&T-Studie „Interoperables Cloud Computing (IOCC)“ in 2019 war weiterhin die Analyse von Cloud Technologien für den Einsatz in der Bundeswehr inklusive deren technischer Erprobung.

Vor diesem Hintergrund stehen die in 2019 durchgeführten Maßnahmen im Kontext praktischer Evaluierungen auf der einen und der Aufbereitung theoretischer Weiterentwicklungspotentiale auf der anderen Seite.

Konkret wurden im Rahmen IOCC Teil 6 Demonstratoren beschafft, aufgebaut und in Betrieb genommen. Selbige bestehen aus einem stationären und einem verlegfähigen Anteil. Im Verbund mit bereits existierender Hardware bilden diese Anteile die so genannte Demonstratorumgebung IOCC (Abbildung 1).

Die existierende Hardware wurde geänderten Anforderungen entsprechend technisch hochgerüstet. Implizit konnte damit die so genannte Multivendorenfähigkeit nachgewiesen werden: Der Demonstratorverbund IOCC setzt auf Hardwarekomponenten unterschiedlicher Anbieter (hier: DELL und HPE) auf

Neubeschaffung (stationär)	Neubeschaffung (verlegfähig)	Existierende Hardware
<b>VCF on VxRail ES60F System Datacenter</b>	<b>VxRail ES60F System verlegfähig</b>	<b>HPE</b>
Nodes #	Nodes #	Nodes #
4	6	20
Proz # per Node	Proz # per Node	Proz # per Node
2	2	4
Proz Typ	Proz Typ	Proz Typ
4208, 2.1GHz, 8 Core Cascade Gen2	4214 2.2GHz, 12 Core Cascade Gen2	4x 2640 2.4 GHz, 16x 2620 2.1 GHz
HD	HD	HD
2x 800 GB SSD, 4x 3.84 TB SSD	2x 800 GB SSD, 4x 1.92 TB SSD	gesamt 153.8 TB SSD
Memory	Memory	Memory
768 GB (24 x 32 GB)	16x 32 GB = 512GB	gesamt 4433 GB
<b>Workload Domain</b>		
Nodes #		
20		
Proz # per Node		
2		
Proz Typ		
4208, 2.1 GHz, 8 Core		
HD		
2x 800 GB SSD, 4x 3.84 TB SSD		
Memory		
768 GB (24 x 32GB)		
Total Cores		
384		
Switche		
4x Cisco T4R 9318S 1x Cisco 9348 N9t		
Switche		
	4x Cisco T4R 9318S 1x Cisco 9348 N9t	2x Cisco T4R

Abb. 1: Demonstratorumgebung IOCC (Quelle: BWI GmbH)

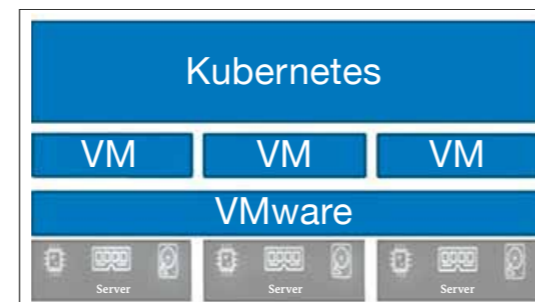


Abb. 2: Kubernetes & VM (Quelle: BWI GmbH)

und ist damit herstellerunabhängig ausgeprägt (Verhinderung Vendor Lock-in).

Auf dieser Plattform wird in 2020 das Architekturdesign für einen auf Produkten des Unternehmens VMware basierenden Cloud Stack für die private Cloud der Bundeswehr (pCloudBw) implementiert und erprobt. Darüber hinaus wird die Integrationsfähigkeit des vorhandenen IT-Services „Container Plattform“ auf Basis Kubernetes validiert. Abbildung 2 zeigt den derzeit verfolgten Ansatz: Kubernetes setzt als Managementebene auf einer via VMware virtualisierten Infrastruktur auf.

Als theoretische Elemente IOCC Teil 6 werden ein Bewertungsmodell für die „Cloudifizierbarkeit“ bestehender IT-Services inklusive eines Vorgehensprozesses („Migration as a Services“) entwickelt. Als Referenz dient ein agiles Zielbild auf Basis der Cloud Computing Referenzarchitektur für die Bundeswehr (CCRABw). Weiterhin wurde eine Aufbereitung sicherheits- und datenschutzrelevanter Anforderungen beauftragt. Die Ergebnisse dieser Analyse bilden die Basis zur Evaluierung der immanenten Sicherheitsfeatures der betriebenen Cloud Infrastruktur.

Flankierend erfolgten praktische Untersuchungen marktverfügbarer Cloud Technologien als identifizierte Potentiale im Rahmen der Agenda Digitalisierung. Konkret beinhaltet dies das Arbeiten innerhalb eines auf einer Cloud Umgebung implementierten virtuellen militärischen Lagersaums. Mit einem anderen Arbeitspaket sollen Nutzen, Kosten und Risiken analysiert werden, die sich im Zusammenhang mit der Abbildung von Legacy Applikationen auf eine Cloud Infrastruktur ergeben könnten.



Abb. 3: Arbeitspakete IOCC 6 (Quelle: BWI GmbH)

Abbildung 3 fasst die Arbeitspakete der IOCC 6 stichpunktartig zusammen.

Die in 2019 zwischen dem Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr, BAAINBw und der BWI GmbH etablierte Cloud Task Force (CTF) hat den Auftrag, alle Cloud relevanten Aktivitäten der Bundeswehr zu koordinieren. Folgerichtig begleitet und steuert die CTF auch die Durchführung IOCC 6.

IOCC 6 soll in 2020 beendet werden. Die weiterhin notwendige Analyse technologischer Potentiale zur Thematik Cloud Computing werden durch die CTF und beginnend ab 2021 im Rahmen einer Leistungserweiterung des Leistungsvertrags HERKULES Folgeprojekt (LV HFP) weitergeführt. Dazu erforderliche vorbereitende Maßnahmen sind bereits angestoßen und befinden sich in der Abstimmung.

Absicht ist die Etablierung einer Grundbefähigung einer pCloudBw als Keimzelle einer auf Cloud Technologie basierenden IT-Infrastruktur. Die Demonstratorumgebung IOCC bildet dazu einen ersten Ansatz, weitere Anteile befinden sich derzeit in Planung oder Umsetzung.

# 6



## Anhang





Bundesministerium  
der Verteidigung

Bundesministerium  
der Verteidigung  
Postfach 13 28  
53003 Bonn  
Internet: www.bmvg.de

Abteilung Ausrüstung - A II 5  
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 41 66  
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 35 94  
E-Mail: BMVgAII5@bmvg.bund.de

Abteilung Ausrüstung - A II 6  
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 41 80  
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 41 89  
E-Mail: BMVgAII6@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: BMVgCIT12@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 III 5  
Tel.: +49 (0) 30 / 20 04 - 2 48 54  
Fax: +49 (0) 30 / 20 04 - 8 97 00  
E-Mail: BMVgFueSKIII5@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 1  
Tel.: +49 (0) 228 / 12 - 13 17  
Fax: +49 (0) 228 / 12 - 4 33 10  
E-Mail: BMVgPIII1@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 landgebundene  
Fahrzeugsysteme, Pionier- und Truppentechnik  
(WTD 41)  
Kolonnenweg  
54296 Trier - Grüneberg  
Tel.: +49 (0) 651 / 91 29 - 0  
Fax: +49 (0) 651 / 91 29 - 26 00  
E-Mail: WTD41posteingang@bundeswehr.org  
Internet: www.baainbw.de/wtd41



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 Greding  
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 - 0  
Fax: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 55  
E-Mail: ZGeoBwEingang@bundeswehr.org



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: ZMSBWEingang@bundeswehr.org  
Internet: www.zmsbw.de



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



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



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



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



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.marine.de



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.sanitaetsdienst-bundeswehr.de



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 Westerstede  
Lange Straße 38  
26655 Westerstede  
Tel.: +49 (0) 44 88 / 50 - 0  
Fax: +49 (0) 44 88 / 50 - 72 79  
E-Mail:  
BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org  
Internet:  
https://westerstede.bwkrankenhaus.de



Fraunhofer-Verbund  
Verteidigungs- und  
Sicherheitsforschung 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  
Internet: www.vvs.fraunhofer.de



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  
Internet: www.emi.fraunhofer.de



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  
Internet: www.fhr.fraunhofer.de



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: info@fkie.fraunhofer.de  
Internet: www.fkie.fraunhofer.de



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  
Internet: www.iaf.fraunhofer.de



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  
Internet: www.ict.fraunhofer.de



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  
Internet: www.int.fraunhofer.de



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  
Internet: www.iosb.fraunhofer.de



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)



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Faserverbundleichtbau  
und Adaptronik DLR FA  
Lilienthalplatz 7  
38108 Braunschweig  
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 23 01  
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)



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)



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Flugsystemtechnik DLR FT  
Lilienthalplatz 7  
38108 Braunschweig  
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 26 00  
Fax: +49 (0) 531 / 295 - 28 64  
E-Mail: [info-pks@dlr.de](mailto:info-pks@dlr.de)  
Internet: [www.dlr.de/ft](http://www.dlr.de/ft)



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)



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 II  
Fontainengraben 150  
53123 Bonn

**GESTALTUNG UND REALISATION**

Konzeptbüro Schneider, Erfstadt

**INHALTLICHE BETREUUNG**

Fraunhofer INT, Euskirchen

**DRUCK**

Wartlich Druck Meckenheim GmbH, Meckenheim

**STAND**

Juni 2020

**FOTOS**

	Seite
© Bundeswehr / Ahrens+Steinbach;	
Sebastian Scheuermann; Jana Neumann	01
© Bundeswehr / Jana Neumann	08
© Bundeswehr / Jana Neumann; Johannes Heyn	09
© Bundeswehr / Kim Brakensiek	10
© Bundeswehr / Christian Vierfuß; Jana Neumann	11
© Bundeswehr / Weber, Schmidt	32
© MAKO – EADS, © Airbus Defence & Space	34
© DLR / Frank Eppler	41
© Gerhard Schwarz	50
© Phoenix Wisconsin	66
© BwKrhs Berlin / Carolyn Rose	92
© BwKrhs Berlin / Charlyn Löpke © Wesemann et al., 2019	93
© Frank Eggen, BwKrhs Berlin © Wesemann et al., 2020	95
© Leibniz Institut DSMZ (Dr. I. Korf, Dr. J. Wittmann) und HZI, ZEIM, Zentrale Einheit Mikroskopie (Prof. M. Rohde); www.phagoflow.de	100
© Fraunhofer ITEM (Prof. Dr. H. Ziehr); www.phagoflow.de	101
© Fraunhofer ITEM (Prof. Dr. H. Ziehr); www.phagoflow.de	101
© Ilaria Giusti et al. © BioMed Research International, 2013	104
© PIZ Personal	108
© Fotolia / RAM	108
© ZMSBw / Adam	109
© Bröde, P. et al.: Extending the Universal Thermal Climate Index UTCI towards varying activity levels and exposure times. Windsor 2016	113
© BWI GmbH	120

AeroDesignWorks, Köln  
Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr,  
Koblenz  
Bundesministerium der Verteidigung, Bonn  
Bundeswehrkrankenhaus Berlin  
Bundeswehrkrankenhaus Westerstede  
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut, Saint-Louis  
DLR, Institut für Faserverbundleichtbau, Braunschweig  
DLR, Institut für Flugführung, Braunschweig  
DLR, Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig  
DLR, Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Weßling  
DLR, Institut für Technische Physik, Stuttgart  
Fraunhofer EMI, Freiburg i. Br.  
Fraunhofer FHR, Wachtberg  
Fraunhofer FKIE, Wachtberg  
Fraunhofer IAF, Freiburg i. Br.  
Fraunhofer ICT, Pfinztal  
Fraunhofer INT, Euskirchen  
Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, Ettlingen  
Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg  
HPS GmbH, München  
Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München  
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr, München  
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr, Koblenz  
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr, München  
Naval Postgraduate School Monterey, USA  
Psychotraumazentrum der Bundeswehr, Berlin  
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine, Kronshagen  
Universität der Bundeswehr München  
Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, USA  
WIS, Munster  
WIWeB, Erding  
WTD 41, Trier  
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