



Universität Bremen

Fachbereich 03: Mathematik / Informatik

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) im Fachbereich Informatik

Verquickung der mathematischen und informatischen
Forschung an zivilen deutschen Hochschulen mit der
modernen Kriegsführung

Autor:
Thomas Gruber

Erster Gutachter:
Prof. Dr. Hans-Jörg Kreowski

Zweiter Gutachter:
Prof. Dr. Gregor Nickel

Datum des Kolloquiums: 18. Juli 2018

Diese Arbeit wurde in X_YT_EX geschrieben. Das Layout *Maggi Memoir Thesis*, welches hierbei als Vorlage diente, stammt von Federico Maggi (fede@maggi.cc). Es wurde stark abgeändert von Vel (vel@latextemplates.com) und dem Autor selbst.

Vorwort

Privatpersonen, die sich mit militärrelevanter oder allgemeiner Drittmittelforschung in Deutschland befassen, geraten schnell an die Grenzen wissenschaftlicher Transparenz. Selbst die wichtigsten parlamentarischen Kontrollinstrumente schaffen hier nur wenig Abhilfe: Seit mehreren Jahren stellen die Land- und Bundestagsfraktionen der Grünen und der Linken an die jeweiligen Regierungen immer wieder erfolglose kleine Anfragen, die sich mit der Drittmittelfinanzierung deutscher Forschungseinrichtungen befassen. Viele Zahlen und Fakten werden den Parlamentarier_innen¹ erst gar nicht zugänglich gemacht, da gerade wissenschaftlich-wirtschaftliche Kooperationen häufig mit Geheimhaltungsklauseln bezüglich des Forschungsgegenstandes und der Finanzierung geschützt sind. Doch selbst wenn Informationen an die Oppositionsfraktionen weitergegeben werden, bekommen sie von den Regierungen oft den Vermerk „Verschlussache“, was ihre Veröffentlichung oder Verbreitung illegal macht. Im Falle militärrelevanter Forschung stehen die wenigen Zahlen und Kooperationsprojekte, die öffentlich gemacht werden können, meist in Verbindung mit staatlichen und militärischen Institutionen wie etwa dem Bundesverteidigungsministerium (kurz: *BMVg*) oder der Bundeswehr.

Einen Überblick, wie sich die militärrelevante Forschung an deutschen Forschungseinrichtungen bis 2015 entwickelt hat, geben beispielsweise die Bewertung [Goh16] einer kleinen Anfrage von 2016 und der Artikel [Goh18]. Seit dem Jahr 2000 ist etwa das Volumen von *BMVg*-finanzierter Forschung von jährlich vier Millionen auf sieben Millionen Euro angestiegen und die Gelder die von den technischen Dienststellen der Bundeswehr an die Hochschulen fließen, erhöhten sich in der selben Zeit von 250.000 Euro auf 1,5 bis 2,5 Millionen Euro pro Jahr. Weit großzügiger fallen die Gelder bei der Finanzierung außerhochschulischer Forschungseinrichtungen aus: Im Jahr 2015 bekamen sie etwa 56 Millionen Euro vom *BMVg*, ein großer Teil davon ging an die Fraunhofer-Institute, welche im Verbund für Verteidigungs- und Sicherheitsforschung (kurz: *VVS*) organisiert sind. Die *VVS*-Institute erhielten 2015 außerdem eine Grundfinanzierung von 63 Millionen Euro vom deutschen Verteidigungsministerium, was bei der Vergabe von Ressortforschung einen klaren Fokus des *BMVg* auf außerhochschulische Forschungseinrichtungen erkennen lässt. Eine große Dunkelziffer bleibt bei dieser parlamentarischen Analyse von wehrrelevanter Forschung allerdings stehen: Nur selten erhalten die Oppositionspolitiker_innen Zahlen und Daten zu Drittmitteln von Unternehmen mit Rüstungssparte oder über den Bereich der staatlich geförderten Dual-Use-Projekte². Die Problematik und die Umstände jener verdeckten und teils verwischten militärischen Forschung werden auch immer wieder Thema der vorliegenden Arbeit sein.

¹In dieser Arbeit wird im Sinne einer geschlechterneutralen Sprache die sogenannte *Gendergap* genutzt. Durch einen Unterstrich veranschaulicht sie, dass mit einem Begriff nicht nur denjenigen Personen, die sich als männlich oder weiblich verstehen gemeint sind, sondern auch all diejenigen, die sich außerhalb der binären Geschlechtsidentität verorten – wie etwa manche trans- oder intersexuellen Personen.

²also solche, die sowohl zivilen als auch militärischen Zwecken dienen

Mein fünfjähriges Studium (in den Jahren 2008 bis 2013) der Mathematik mit Nebenfach Informatik an der Universität Augsburg war geprägt von der Frage, welche Auswirkungen die industrielle, privatwirtschaftliche und militärische Nutzung von Forschungsergebnissen auf die hiesige Wissenschaftslandschaft hat. Schon früh kamen Studierende dort mit Unternehmen in Berührung, die ihren Fokus auf die Verwertbarkeit mathematischer und informatischer Forschung legten – vornehmlich aus der verarbeitenden Industrie oder der Finanzwirtschaft. Ein fester Bestandteil des Bachelor-Studiums Mathematik in Augsburg ist etwa ein zweimonatiges Pflichtpraktikum außerhalb der Universität und viele Studierende schreiben ihre Abschlussarbeiten in Kooperation mit bayerischen Konzernen oder arbeiten dort als Werkstudierende, um ihren Lebensunterhalt zu verdienen. Während meines Betriebspraktikums und meiner Arbeit als Werkstudent stellte ich fest, dass es einerseits äußerst schwierig (wenn nicht sogar unmöglich) ist, sich im produzierenden Gewerbe von militärrelevanten Problemstellungen fernzuhalten. Andererseits erforderte es teilweise eine beachtliche Portion Eigeninitiative überhaupt in Erfahrung zu bringen wie die Unternehmen und damit auch die eigene Arbeit mit militärischen Akteur_innen verbunden sind. Häufig wurden mathematische und informatische Fragestellungen eher als spannende Knobeleyen angepriesen und nur sehr rudimentäre Angaben zur späteren Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse gemacht. Ohne Frage lag dies auch daran, dass die Arbeitsanweisungen möglichst allgemein gehalten waren, um das fertige Produkt später in vielen Bereichen sowohl zivil als auch militärisch nutzen zu können.

Auf Seiten des Universitätsbetriebes war die wirtschaftliche Verwertbarkeit mathematischer und informatischer Methoden ebenso präsent. Einerseits betreuten und förderten viele Professor_innen Verbindungen zwischen Studierenden und Konzernen, andererseits standen die Wissenschaftler_innen selbst unter einem erheblichen Druck, Drittmittel einzuwerben und damit ihre Unternehmenskontakte stetig zu pflegen. In Augsburg hatte das über die vergangenen Jahrzehnte zur Folge, dass anwendungsbezogene Teilgebiete der Mathematik und der Informatik – wie etwa Ingenieursmathematik, Finanzmathematik, Geoinformatik oder Wirtschaftsinformatik – gegenüber den rein theoretischen – wie etwa Analysis, Algebra, Logik oder theoretische Informatik – erheblich an Bedeutung gewonnen haben und die entsprechenden Fakultäten und Institute auch diesbezüglich umstrukturiert wurden. Eine größere öffentliche Diskussion über diese maßgeblichen Veränderungen der Forschungslandschaft blieb weitgehend aus; nach meinem Empfinden wurden die Entwicklungen von den meisten Universitätsangehörigen – Dozierenden wie Studierenden – zunächst unkommentiert hingenommen.

Mit dem Beginn meines Masterstudiums im Jahr 2011 begann ich mich zunehmend aus einer fachlichen sowie einer wissenschafts- und gesellschaftspolitischen Perspektive mit den Verbindungen zwischen der Wissenschaft und ihren Anwendungsbereichen zu befassen. Weite Teile dieser Auseinandersetzung fanden in der persönlichen Diskussion mit anderen Studierenden und Dozierenden statt und waren keineswegs nur auf die mathematische und informatische oder nur auf militärrelevante Fragestellungen beschränkt. In den Jahren 2012 und 2013 entwickelte sich ein fruchtvoller Diskurs innerhalb der Augsburger Universität – viele Studierende und Professor_innen tausch-

ten sich über ihren Unmut bezüglich der deutschen Wissenschaftspolitik und der Transformation ihrer Universität aus. Für mich war besonders die Verquickung der Wissenschaft mit militärischen Anwendungen von Interesse, da kriegerische Handlungen besonders drastische Auswirkungen auf die Zivilgesellschaft haben und sich damit unmittelbar Fragen nach der Verantwortlichkeit von Forscher_innen für die Folgen ihrer Arbeit ergeben. Es war mir dabei wichtig, ein solches Thema vom Standpunkt meiner fachlichen Verortung aus zu behandeln – als Studierender der Mathematik und der Informatik. Im Jahr 2013 wollte ich über dieses Thema auch meine Masterarbeit schreiben und sprach daher mit einem Mathematikprofessor, der sich rege an unserem universitären Diskurs beteiligt hatte. Er eröffnete mir, dass er zwar meine Masterarbeit gerne betreuen würde und das Thema für ihn auch von großer wissenschaftlicher Bedeutung wäre, er sich damit allerdings unter seinen Kolleg_innen unbeliebt machen und sich eventuell ins wissenschaftliche Abseits befördern würde. Ich beschloss daher, mein Studium an der Universität Augsburg zügig abzuschließen und mich stattdessen um eine Promotion zu dem Thema *Verquickung der mathematischen und informatischen Forschung an zivilen deutschen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung* zu bemühen – die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis jener Bemühungen.

Thomas Gruber
(thomas.gruber@riseup.net)
Hamburg
Mai 2018

Danksagung

Mit Blick auf die Arbeit der vergangenen drei bis vier Jahre gilt mein größter Dank meinem Betreuer Hans-Jörg Kreowski für den äußerst wertvollen fachlichen Austausch, die hervorragende Betreuung sowie die Geduld und Ruhe, mit denen er mich auf Probleme und mögliche Fehler hingewiesen hat; außerdem den Menschen der Rosa-Luxemburg-Stiftung, deren finanzielle Förderung mein Promotionsvorhaben erst ermöglicht hat und deren Bildungsangebot zur diversen wissenschaftlichen und politischen Themen bei mir auf großes Interesse gestoßen ist. Weiter danke ich herzlich Bernhelm Boß-Bavnbek von der Universität Roskilde und Gregor Nickel von der Universität Siegen für die fruchtbaren Gespräche und guten Hinweise, welche mir erheblich bei der Strukturierung und Ausrichtung des Themas geholfen haben. Im Schnittbereich zwischen Wissenschaft und Politik habe ich mich besonders über die produktive und spannende Zusammenarbeit mit den Menschen der Informationsstelle Militarisierung, des Forums InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung sowie den Redakteur_innen der Zeitschrift Wissenschaft und Frieden gefreut. Es ist mir ein großes Anliegen diese Kontakte zu pflegen und die Zusammenarbeit zu vertiefen. Auf Seiten der wissenschaftlichen Institutionen mag ich vor allem das Tübinger Internationale Zentrum für Ethik in den Wissenschaften hervorheben, wo ich über mehrere Monate ein abwechslungs- und lehrreiches Arbeitsumfeld genießen durfte.

Es ist mir nicht möglich in Worte zu fassen, welche Kraft und welchen Halt mir meine Freundin Jenny und meine Mutter Renate in den letzten Jahren gegeben haben. Nur soviel: Eure Zuneigung und Eure wundervolle, offene Art machen selbst in den schwierigsten Momenten meines Lebens einen glücklichen Menschen aus mir.

Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen mathematischer und informatischer Forschung an zivilen deutschen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung.

Die zunehmende Algorithmisierung und Automatisierung militärischer Technik lässt Methoden aus der Mathematik und der Informatik für die Kriegsführung immer wichtiger werden. So sind beispielsweise Kampf- und Überwachungsdrohnen, militärische Spionagesatelliten, moderne Lenkflugkörper und neue Konzepte für Angriffe auf feindliche Verschlüsselungssysteme stark abhängig von aktuellen mathematischen und informatischen Forschungsergebnissen. Das motiviert einerseits die Frage, in welcher Form Mathematiker_innen und Informatiker_innen an diesen Ausprägungen und den Auswirkungen moderner Kriegsführung beteiligt sind, andererseits inwiefern sich diese interessensgeleitete, militärische Nutzung von Forschungsergebnissen wieder zurück auf die Wissenschaftslandschaft auswirkt. Unmittelbar daraus ergeben sich fachinterne, interdisziplinäre und gesamtgesellschaftliche Problemstellungen – etwa bezüglich der Verantwortung von Wissenschaftler_innen für die Folgen ihrer Arbeit, dem Zweck öffentlicher, ziviler Hochschulen oder der anwendungsorientierten Transformation einzelner Fachbereiche.

Bisher ist die Frage nach den *Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und Krieg* weder in der Forschung noch im öffentlichen gesellschaftlichen Diskurs präsent. Deshalb behandelt die vorliegende Arbeit sehr grundlegende Aspekte des Themas: zum einen wird die mathematische und informatische Wissenschaftslandschaft in Deutschland bezüglich ihrer Verquickung mit der modernen Kriegsführung nachgezeichnet, zum anderen wird die Relevanz eines fachinternen und gesamtgesellschaftlichen Diskurses über jene Verquickung geklärt.

Im Verlauf der Dissertation werden zuerst einige Begrifflichkeiten umrissen, die aus mathematischer und informatischer Sicht auf die stellenweise interdisziplinären Forschungsfragen unklar sind – etwa *moderne Kriegsführung* oder *Wissenschaftsverantwortung*. Darauf folgend wird das Thema in den vergangenen und aktuellen wissenschafts- und gesellschaftspolitischen Diskurs eingeordnet. Und schließlich wird die Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung anhand einiger ausgewählter mathematischer und informatischer Teilbereiche dargestellt. Dabei wird zunächst die militärische Bedeutung des jeweiligen Teilbereiches zusammengefasst und danach anhand möglichst fachtypischer Projektbeispiele vertieft. Die Relevanz eines fachinternen und gesamtgesellschaftlichen Diskurses begründet sich dann einerseits auf den bisherigen wissenschafts- und gesellschaftspolitischen Entwicklungen und andererseits auf den Ergebnissen zur Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung.

Angesichts des ursprünglich sehr dünnen Forschungsstandes kann die vorliegende Arbeit als erste Einführung in das Thema *Mathematik, Informatik und moderne Kriegsführung* dienen. Sie motiviert allerdings auch weitere Fragestellungen, auf denen zukünftige Forschung aufbauen kann.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Methoden aus der Mathematik in moderner Kriegstechnologie	4
1.2 Von der Mathematik über die Informatik zur Anwendung	4
1.3 Der Fokus auf die deutsche Forschungslandschaft	5
1.4 Forschungsstand und offene Fragen	6
2 Definitionen und Arbeitsweise	9
2.1 Abgrenzung der Begrifflichkeiten	9
2.1.1 Krieg und Frieden	10
2.1.2 Moderne Schlachtfelder	11
2.1.3 Zur Systematisierung des Kriegsbegriffes	13
2.1.4 Der Begriff der Verantwortung	15
2.1.5 Wissenschaftsethik und Wissenschaftsbegriff	19
2.2 Zur Motivation eines Diskurses über militärrelevante Forschung	21
2.2.1 Die gesellschaftlichen Grundwerte des Friedens und der Wissenschaftsfreiheit	23
2.2.2 Die Situation in der Mathematik und der Informatik	24
2.3 Zielsetzung, Hypothesen und Aufbau der Arbeit	25
2.3.1 Zielsetzung des Promotionsvorhabens	25
2.3.2 Hypothesen der Arbeit	26
2.3.3 Aufbau der Arbeit und Methodik	27
3 Gesellschaftlicher und universitärer Diskurs über die Militärfor-	
schung in Mathematik und Informatik	29
3.1 Nach dem Zweiten Weltkrieg	30
3.2 Während des Kalten Krieges	33
3.3 Heute	38
3.3.1 Wissenschaftspolitik in Deutschland	42
3.3.2 Mathematik und Informatik in der modernen Kriegsführung	50
3.4 Mögliche Gründe für die Vernachlässigung des Diskurses innerhalb der Mathematik und der Informatik	52

4	Verquickung mathematischer und informatischer Forschung mit der modernen Kriegsführung	57
4.1	Kryptologie	58
4.1.1	Die Kryptologie in der Mathematik und der Informatik	60
4.1.2	Kryptologie und Krieg	61
4.1.3	Die BMVg-Studie zum diskreten Logarithmus	65
4.1.4	Entwicklung eines Kommunikationssystems für den Militäreinsatz am FKIE	69
4.1.5	Die Präsenz der NSA auf der <i>International Conference on Finite Fields and Their Applications</i> 2009	72
4.1.6	Beeinflussung der zivilen Forschungslandschaft durch militärische Interessenträger_innen	73
4.1.7	Zwischenfazit zur Kryptologie	75
4.2	Spieltheorie und künstliche Intelligenz	78
4.2.1	Fachliche und geschichtliche Einordnung der Spieltheorie	79
4.2.2	Fachliche und geschichtliche Einordnung der künstlichen Intelligenz	82
4.2.3	Spieltheorie und künstliche Intelligenz in der modernen Kriegsführung	84
4.2.4	Zwischenfazit zur Spieltheorie und zur künstlichen Intelligenz	85
4.3	Technomathematik	86
4.3.1	Direkte Drittmittelkooperationen in der Optimierung	87
4.3.2	Militärisches Interesse an Studierenden der Numerik	93
4.3.3	Wissenschaftlich-militärische Kollaboration in der Kontrolltheorie	99
4.3.4	Militärische Einflüsse auf die zivile Forschungs- und Studienlandschaft	106
4.3.5	Zwischenfazit zur Technomathematik	108
4.4	Aktuelle Forschung zur künstlichen Intelligenz	109
4.4.1	Fachliche Schwerpunkte der spezialisierten KI-Forschung	112
4.4.2	Entwicklung des Forschungsgebietes	114
4.4.3	Dual-Use I: Fraunhofer-Institute und Universitäten	115
4.4.4	Dual-Use II: „Zivile Sicherheitsforschung“	121
4.4.5	Konferenzen, Wettbewerbe und Crowdsourcing	125
4.4.6	Militärische Einflüsse auf die zivile Forschungs- und Studienlandschaft	130
4.4.7	Zwischenfazit zu den modernen KI-Methoden	132
5	Fazit	135
5.1	Zur Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und der modernen Kriegsführung	136
5.2	Problem-, Diskurs- und Lösungsansätze	138
5.3	Nachwort und Ausblick	140

Literaturverzeichnis	143
Internetquellen	163
Bildquellen	181

Abkürzungen

ABUL	Automatisierte Bildauswertung für Unbemannte Luftfahrzeuge
AES	Advanced Encryption Standard
AFCEA	Anwenderforum für Fernmeldetechnik, Computer, Elektronik und Automatisierung
AG	Arbeitsgruppe
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
APN	Almost Perfect Nonlinear
APO	Außerparlamentarische Opposition
ASEV	Automatische Situationseinschätzung für ereignisgesteuerte Videoüberwachung
AStA	Allgemeiner Studierendenausschuss
BBC	British Broadcasting Corporation
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BdWi	Bund demokratischer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler
BGT	Bodenseewerk Gerätetechnik
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung
BND	Bundesnachrichtendienst
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CamInSens	Verteilte vernetzte Kamerasysteme zur in situ-Erkennung Personen-induzierter Gefahrensituationen
CBRN	Chemisch, Biologisch, Radiologisch und Nuklear
CCC	Chaos Computer Club

CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
CETA	Comprehensive Economic and Trade Agreement
CIA	Central Intelligence Agency
CSFV	Crowd Sourced Formal Verification
DAGM	Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DEOS	Deutsche Orbitale Servicing Mission
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFG-VK	Deutsche Friedensgesellschaft - Vereinigte KriegsdienstgegnerInnen
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMV	Deutsche Mathematiker-Vereinigung
Dual_EC_DRBG	Dual Elliptic Curve Deterministic Random Bit Generator
EADS	European Aeronautic Defence and Space
ECC	Elliptic Curve Cryptography
ECDH	Elliptic Curve Diffie-Hellman
ESA	European Space Agency
EU	Europäische Union
EUTM	European Union Training Mission
FEM	Finite-Elemente-Methode
FGAN	Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften
FHR	FGAN-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik
Fiff	Forum InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung
FKIE	Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie
FOM	FGAN-Institut für Optronik und Mustererkennung
Fq9	International Conference on Finite Fields and Their Applications 2009
FSB	Federalnaja sluschba besopasnosti
GMLZ	Gemeinsames Melde- und Lagezentrum

GNU GPL	GNU General Public License
HiWi	Hilfswissenschaftler_in
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
IABG	Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft
IALANA	Juristen und Juristinnen gegen atomare, biologische und chemische Waffen
IBM	International Business Machines Corporation
IDP	IPSec-Discovery-Protocol
IES	Interaktive Echtzeitsysteme
IITB	Institut für Informations- und Datenverarbeitung
IOSB	Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
IPM	Institut für Praktische Mathematik
IPPNW	Internationale Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges, Ärzte in sozialer Verantwortung
IPsec	Internet Protocol Security
IT	Informationstechnik
KGB	Komitet gossudarstwennoi besopasnosti
KI	künstliche Intelligenz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
kNN	künstliches neuronales Netz
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität
MATHMOD	Vienna International Conference on Mathematical Modelling
MIKE	Multicast Internet Key Exchange
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik
MINUSMA	Multidimensionale Integrierte Stabilisierungsmission der Vereinten Nationen in Mali
MOD	International Workshop on Machine Learning, Optimization and Big Data
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NatWiss	NaturwissenschaftlerInnen-Initiative
NAVFOR	Naval Force

NIST	National Institute of Standards and Technology
NS	nationalsozialistisch
NSA	National Security Agency
NSDAP	Nationalsozialistische Deutsche Arbeiterpartei
NSF	National Science Foundation
NVA	Nationale Volksarmee
OAF	Operation Allied Force
OEF	Operation Enduring Freedom
OHB	Orbitale Hochtechnologie Bremen
PLATO-N	Platform for Topology Optimization
QUAKSBw	Querschnittlicher Anteil Kommunikationsserver Bundeswehr
RAF	Rote Armee Fraktion
RSA	Rivest, Shamir und Adleman
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S-Box	substitution box
SAR	Synthetic Aperture Radar
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
SQP	sequential quadratic programming
SS	Schutzstaffel
SSH	Secure Shell
SVM	Support Vector Machine
SWP	Stiftung Wissenschaft und Politik
SWR	Sluschba wneschnei raswedki
TLS	Transport Layer Security
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek
TTIP	Transatlantic Trade and Investment Partnership
TU	Technische Universität
UAV	unpiloted aerial vehicle
UAV DACH	Dachverband für unbemannte Luftfahrt in Europa

UdSSR	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
UK	United Kingdom
UN	United Nations
USA	United States of America
VPN	Virtual Private Network
VVS	Verbund für Verteidigungs- und Sicherheitsforschung
WiMAAS	Wide Maritime Area Airborne Surveillance

Kapitel 1 – Einleitung

„Es gibt Risiken, die man nie eingehen darf: der Untergang der Menschheit ist ein solches. Was die Welt mit den Waffen anrichtet, die sie schon besitzt, wissen wir, was sie mit jenen anrichten würde, die ich ermögliche, können wir uns denken.“ — *Johann Wilhelm Möbius in Dürrenmatts „Die Physiker“*

Die Befürchtung, die Dürrenmatts Charakter Möbius im Jahr 1961 formuliert, bezieht sich auf die militärische Nutzung der eigenen Grundlagenforschung in der Physik. Das Drama *Die Physiker* entstand im Kontext des Kalten Krieges zwischen dem Ost- und dem Westblock¹ und steht exemplarisch für die erheblichen Militarisierungstendenzen in der damaligen Forschungslandschaft. Mit dem Blick auf die eigenen militärischen und geopolitischen Interessen warben die Blockmächte massiv zivile Forschungsergebnisse ein und überzeugten Wissenschaftler_innen, für Kriegszwecke zu forschen. So wurden die Natur- und Ingenieurwissenschaften und später auch die Informatik zu wichtigen Triebfedern damaliger kalter und kriegerischer Konflikte. Gleichzeitig wurden militärische Fragestellungen in diesen Fächern vermehrt in die Hochschulen und Forschungseinrichtungen getragen. Was das Zitat Dürrenmatts allerdings zeitlos werden lässt, ist seine gesellschaftliche und moralische Komponente. Einerseits beschreibt Möbius die Auswirkungen von Krieg als etwas grundlegend Negatives, etwas das die gesamte Menschheit gefährden kann. Andererseits liegt es in der kollektiven und individuellen Verantwortung des Menschen, der Zerstörungsgewalt von Kriegen entgegen zu arbeiten. Im Falle Möbius' bezieht sich diese Verantwortung auf sein Wirken als Wissenschaftler: Da seine Forschungsergebnisse in militärischer Hand die gesamte Menschheit gefährden würden, sieht er es als seine gesellschaftliche Pflicht, sie allen Konfliktparteien vorzuenthalten.

Bis heute hat diese Sichtweise auf bewaffnete Konflikte nichts an Bedeutung eingebüßt: Krieg ist – zivilgesellschaftlich betrachtet – etwas Negatives und Destruk-

¹mit den Führungsmächten Sowjetunion und USA

tives. Denn die Abwesenheit von Krieg ist eine Grundvoraussetzung harmonischen, solidarischen Zusammenlebens: Das Aufwachsen in Gewalt, die ständige Bedrohung physischer und psychischer Unversehrtheit und die damit einhergehende Zerstörung zwischenmenschlicher Beziehungen machen ein friedliches Miteinander unmöglich. Konflikte konstruktiv auszutragen und die Eskalation von Gewalt – wo es denn möglich ist – zu verhindern, liegt daher in der individuellen Verantwortung jedes_jeder Einzelnen und der kollektiven Verantwortung einer Zivilgesellschaft. Die Reflexion der eigenen Taten und eine gesamtgesellschaftliche Debatte sind wichtige Mittel, jene individuelle und kollektive Verantwortung wahrzunehmen. Ein ganzheitlicher Diskurs muss dabei alle Teile der Zivilgesellschaft, die an Konflikten beteiligt oder potentiell von ihnen betroffen sind, einschließen, um zu einer konstruktiven und einvernehmlichen Lösung kommen zu können. An aktuellen Kriegen sind viele verschiedene Interessensgruppierungen und Akteur_innen direkt oder indirekt beteiligt, so etwa Regierungen, politische Think-Tanks, Armeen, die Rüstungsindustrie und auch Wissenschaft und Forschung. Die drastischsten Auswirkungen haben diese Kriege dann auf die Zivilgesellschaft. Bei einer Debatte über die aktuelle Kriegsführung machte es daher Sinn, dass zivilgesellschaftliche Gruppen auch mit denjenigen Personen ins Gespräch kommen, die sich vorwiegend zivil verorten, aber einen Beitrag zu bewaffneten Konflikten leisten. So könnte ein offener Diskurs über eine Verantwortung gegenüber der Gesellschaft geführt werden, der sowohl verursachende als auch betroffene Parteien einschließt.



Abbildung 1.1: EuroHawk-Drohne der Bundeswehr bei der Wehrtechnischen Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät in Manching – hergestellt von Northrop Grumman.

Auch die deutsche Wissenschaftslandschaft kann als wichtiger Ort und als Gegenstand eines solchen Diskurses über die Folgen militärischen Wirkens für die Zivilgesellschaft verstanden werden. Denn hier arbeiten einige Wissenschaftler_innen an zivilen Forschungseinrichtungen direkt oder indirekt Kriegszwecken zu. In der öffentlichen Wahrnehmung geschieht dies vor allem in den Ingenieurwissenschaften wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Luft- und Raumfahrt, aber auch in den Naturwissenschaften wie der Chemie oder der Physik. Beispiele für militärische Kooperationsprojekte an zivilen Hochschulen gibt es dabei zahlreiche: die Universität Bremen und die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (kurz: *RWTH* Aachen) nahmen im Jahr 2012 Stiftungsprofessuren mit wehrrelevanten Forschungsschwerpunkten an (vgl. [1] sowie [Sei12]); viele deutsche Hochschulen und Forschungseinrichtungen erhalten Drittmittel vom Bundesverteidigungsministerium und von den technischen Dienststellen der Bundeswehr (vgl. [Deu16a] und [Goh16]); die technischen Universitäten Braunschweig, München, Berlin sowie die Universitäten Stuttgart und Rostock sind mit namhaften Rüstungsunternehmen wie *Airbus Defence and Space*, *Diehl BGT Defence* und *Northrop Grumman* im Verband *UAV DACH* organisiert, der an Richtlinien zur Zulassung ziviler und militärischer Drohnen arbeitet und diesbezüglich in engem Kontakt mit nationalen und internationalen politischen Entscheidungsträger_innen steht (vgl. [Inf13]); die Technische Universität München (kurz: *TU* München) bildet mit der Bundeswehruniversität München, dem *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (kurz: *DLR*) in Oberpfaffenhofen und dem Verein *Bauhaus Luftfahrt* das gemeinsame Forschungsnetzwerk *Munich Aerospace*, das verstärkt zu autonomem Fliegen sowie zur theoretischen und praktischen Erdbeobachtung forscht (vgl. [2]); die Ludwig-Maximilians-Universität München (kurz: *LMU* München) warb Drittmittel vom US-Verteidigungsministerium zur Verbesserung von Sprengstoffen ein (vgl. [3]) – eine Liste, die sich beliebig verlängern ließe.

Gleichzeitig bemühen sich einige zivilgesellschaftliche Gruppierungen um eine Debatte über die militärrelevante Arbeit an zivilen Hochschulen: universitäre Zivilklausel- und Friedensinitiativen setzen sich vehement für institutionelle Selbstverpflichtungen zu friedlicher Forschung ein (vgl. hierzu die Auflistung von Zivilklauseln deutschlandweit [4]); inner- und interdisziplinäre Zusammenschlüsse von Wissenschaftler_innen analysieren die gesellschaftlichen Auswirkungen diverser Forschungsschwerpunkte – wie beispielsweise das *Forum InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung* (kurz: *FIFF*) [5], die *NaturwissenschaftlerInnen-Initiative* (kurz: *NatWiss*) [6] sowie *Wissenschaft und Frieden* [7] und gesellschaftspolitische Gruppen außerhalb des universitären Kontexts bemühen sich um die Einbettung kriegsrelevanter Forschung in einen Diskurs über die Handels- und Machtbestrebungen der deutschen Außenpolitik – wie beispielsweise die *Informationsstelle Militarisierung* [8].

1.1 Methoden aus der Mathematik in moderner Kriegstechnologie

Viele Forschungsprojekte in den Ingenieurs- und Naturwissenschaften – ob mit dezidiert zivilem oder militärischem Zweck – wären ohne fundamentale mathematische Zuarbeit nicht denkbar. Doch während sich gerade in den angewandten Naturwissenschaften unter den kritischen Augen politischer Gruppierungen ein Hang zur Selbstreflexion und zum Diskurs über die gesellschaftlichen Auswirkungen der eigenen Forschung ergeben hat, bleibt die Mathematik in dieser Entwicklung weitgehend außen vor: „Physicists, chemists, and biologists have a tradition of discussing meta-aspects of their subject – among which are the military use and misuse of the knowledge they produce. Concerns of the latter kind are rare among mathematicians“ (Bernhelm Booß-Bavnbek und Jens Høyrup in [BH03, S. 1]).

Die militärische Nutzung mathematischer Konzepte und Forschungsergebnisse lässt sich allerdings nicht nur als unterstützendes Element angewandter Wissenschaft vermuten. Was Booß-Bavnbek und Høyrup die „mathematization of warfare“ nennen (vgl. [BH03, S. 9]), bezeichnet vor allem, dass mathematische Methoden in vielen Bereichen der modernen Kriegsführung richtungsgebend und inzwischen unabdingbar sind. Für die mathematisierte Kriegsführung gibt es zahlreiche Beispiele: die Verschlüsselung sensibler Daten und Angriffe auf feindliche Kommunikationsstrukturen mittels Methoden aus der Kryptologie und der Algebra; die Flugstabilisierung von Cruise-Missiles oder militärischen Satelliten mithilfe kontrolltheoretischer Konzepte; die Lösung von Optimierungsaufgaben in der militärischen Logistik und bei der Truppenbewegung; Tracking von beweglichen Objekten in Kamerabildern und vieles mehr.

Viele Technologien und Methoden der modernen Kriegsführung sind also ohne mathematische Forschung undenkbar; und dennoch bleibt die Diskussion über die Wechselwirkungen zwischen Mathematik und Krieg sowohl inner- als auch außerhalb der Forschungslandschaft beinahe vollständig aus. Liegt dies am Grundlageneigenschaften mathematischer Forschung, der keinen militärischen Anwendungsbezug in Forschungsprojekten aus der Mathematik erkennen lässt? Werden Ergebnisse der Wissenschaftler_innen ohne deren Billigung für militärische Zwecke genutzt? Oder ist die mathematische Forschung für den Krieg schon längst Usus und ein akzeptierter Aspekt der Drittmittelakquise an Universitäten?

1.2 Von der Mathematik über die Informatik zur Anwendung

Der Einfluss mathematischer Forschungsergebnisse in der modernen Kriegsführung lässt sich also schwer bestreiten. Beim Weg der Mathematik in die konkrete Kriegsmethodik spielen allerdings die angewandten Wissenschaften nach wie vor eine erhebliche Rolle. Mathematische Forschung mag die Grundlage für viele konzeptuel-

le technologische und taktische Neuerungen bieten; im Sinne einer kleinschrittigen Nachvollziehbarkeit der Verquickung von Mathematik und Krieg scheint es aber angebracht, ein praxisnäheres Forschungsfeld zur Hilfe zu nehmen. Dies vereinfacht zumindest den direkten Bezug mathematischer Grundlagen- und Drittmittelforschung zur letztendlichen kriegerischen Anwendung.

Neben den Ingenieurs- und Naturwissenschaften existiert kaum ein Forschungsbereich, der so eng mit der Mathematik verwandt ist wie die Informatik. Dabei verbindet die informationstechnologische und informatische Forschung Industrie- und Wirtschaftsnähe mit der nahezu ungefilterten Verarbeitung mathematischer Konzepte. Während Forschungsgebiete wie die künstliche Intelligenz und das maschinelle Lernen sich noch von mathematischen Ideen inspirieren lassen, sind Fächer wie die Kryptologie oder die Codierungstheorie schon nicht mehr als mathematisch oder informatisch verortet einzustufen – zu stark sind die Überschneidungen.

Die Informatik stellt im Rahmen dieser Arbeit einerseits ein wichtiges Bindeglied zwischen der reinen Mathematik und der Kriegsführung dar, welches helfen kann, die Anwendbarkeit mathematischer Forschungsprojekte zu veranschaulichen. Diese Herangehensweise arbeitet sowohl der_ dem kritischen Forscher_in bei einer Analyse der Auswirkungen ihrer_ seiner Forschung zu als auch einer gesamtgesellschaftlichen Begutachtung. Andererseits hat die informatische Forschung aber selbstverständlich auch Teilgebiete, die zumindest formell von der Mathematik weitgehend losgelöst sind und die eine wichtige Rolle in den oben genannten Aspekten der *mathematisierten Kriegsführung* spielen – etwa die Ausprogrammierung von Verschlüsselungsschemata oder intelligente Verfahren zur Bildverarbeitung. Der Begriff *mathematisierte Kriegsführung* scheint dabei ohnehin etwas zu kurz gegriffen, er ließe sich ohne weiteres noch um die Adjektive *computerisiert*, *algorithmisiert* oder *automatisiert* erweitern. So soll die vorliegende Arbeit also die Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und der modernen Kriegsführung veranschaulichen, ohne sich zu streng auf eines der beiden Fachgebiete zu beschränken. Stattdessen wird der Fokus der analysierten mathematischen und informatischen Forschung auf diejenigen Methoden liegen, die sich mit einer mathematisierten, algorithmisierten oder automatisierten Kriegsführung in Verbindung bringen lassen.

1.3 Der Fokus auf die deutsche Forschungslandschaft

Eine Auseinandersetzung mit den Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung berührt einige stark globalisierte Bereiche von Staat, Wirtschaft und Gesellschaft. So stützt sich beispielsweise die Forschungsarbeit an den Hochschulen häufig auf den internationalen Austausch zwischen Institutionen und Wissenschaftler_innen. Und auch die Geldmittel für Auftragsforschung können aus aller Welt stammen. Der Handel mit Rüstungsgütern ebenso wie ihre Produktion und ihr Einsatz sind meist nicht auf einzelne Länder oder Regionen beschränkt.

Und transnationale Bündnisstrukturen wie die EU oder die NATO gründen eigene Forschungsverbände und geben militärrelevante Ergebnisse an die Mitgliedsstaaten weiter oder verwenden sie in gemeinsamen Einsätzen. Warum also hat die vorliegende Arbeit einen Fokus auf die deutsche Forschung?

Auch wenn viele Aspekte der Rüstungsproduktion, des Handels und der militärrelevanten Forschung international geprägt sind, gibt es dabei zentrale länderspezifische Unterschiede. Diese sollten in einer ganzheitlichen Auseinandersetzung mit den Verbindungen zwischen Wissenschaft und Krieg Beachtung finden. Gerade der Diskurs, der in Deutschland über militärrelevante Forschung geführt wird, konzentriert sich auf die Besonderheiten der hiesigen Wirtschafts-, Wissenschafts- und Militärpolitik. Anlass dazu geben beispielsweise die deutsche Geschichte – also vor allem die militärische Eskalationspolitik in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und die Gräueltaten der Nationalsozialist_innen –, die aktuellen Bundeswehreinsätze und deren Normalisierung in der politischen Debatte, die Ökonomisierung der Hochschulen sowie antimilitaristischer Protest und Widerstand. Der in Deutschland geführte Diskurs über militärrelevante Forschung – mit Blick auf die Mathematik und die Informatik – wird in Kapitel 3 genauer dargestellt.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich im Sinne dieser länderspezifischen Unterschiede auf die Betrachtung der deutschen Forschungslandschaft. Selbstverständlich wird dabei wiederholt auch Bezug auf internationale militärische, wissenschaftliche und politische Entwicklungen genommen, die sich unweigerlich mit auf die Situation in Deutschland auswirken. Ebenso wie in Deutschland sind die oben genannten Themen – wie etwa die Ökonomisierung der Hochschulen, zunehmendes militärisches Engagement und antimilitaristischer Widerstand – auch in anderen Ländern relevant. Die Darstellung der Verquickung von Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung außerhalb Deutschlands – beispielsweise in den USA, in Frankreich oder darauf aufbauend auch mittels eines internationalen Überblicks – wäre daher durchaus ebenfalls gewinnbringend, hätte dann aber andere Forschungsschwerpunkte als die vorliegende Arbeit.

1.4 Forschungsstand und offene Fragen

Die von Boß-Bavnbeek und Høystrup formulierte Kritik an der Selbstreflexion von Mathematiker_innen gibt Aufschluss über den Forschungsstand einer inter- und interdisziplinären Auseinandersetzung mit der kriegsrelevanten mathematischen Forschung. Tatsächlich sind Boß-Bavnbeek und Høystrup zwei der wenigen Wissenschaftler_innen, die sich der Thematik auch innerhalb der mathematischen Forschungslandschaft nähern (vgl. z. B. [Boo05], [BH84] und [BH03]). Dabei liegt ihr Fokus vor allem auf einer internationalen historischen Analyse der zunehmenden Mathematisierung des Krieges und der sich daraus ergebenden ethischen Fragestellungen. In Deutschland ist das Thema Mathematik und Krieg noch stärker interdisziplinär geprägt. Der Siegener Mathematiker Gregor Nickel forscht beispielsweise in der *Arbeitsgruppe Funktionalana-*

lysis und Philosophie der Mathematik zu ethischen Implikationen der Mathematik (vgl. z. B. [Nic12] und [Nic06]). Und der Wissenschaftshistoriker Volker Remmert befasst sich an der Universität Wuppertal eingehend mit der Rolle von Mathematiker_innen während der NS-Herrschaft in Deutschland (vgl. z. B. [Rem04b] und [Rem04a]).

Unter Informatiker_innen ist die Auseinandersetzung mit der militärischen Nutzung von Forschungsergebnissen ein wenig präsenter als in der Mathematik². Von deutscher Seite wird der Diskurs maßgeblich von Mitgliedern des FIF mitbestimmt. So hat beispielsweise das Vorstandsmitglied Hans-Jörg Kreowski, teils zusammen mit Koautoren aus dem FIF-Vorstand, zahlreiche Artikel und Papers zum Thema *Informatik und Krieg* veröffentlicht (vgl. z. B. [KM14], [KM17], [Kre15], [Kre11] und [HKM17]) und auch die FIF-Beirat_innen Ute Bernhardt und Ingo Ruhmann publizieren in diesem Bereich (vgl. z. B. [BR17] und [BR03]). Zusätzlich existieren zum Thema mehrere Bücher in der Reihe *Kritische Informatik* (vgl. z. B. [WB99], [Kre08] und [BHK⁺14]) und der *Schriftenreihe Wissenschaft und Frieden* (vgl. z. B. [Bir85] und [BR91]) – häufig mit Beteiligung des FIF. Die Autor_innen und Werke behandeln aus politischen und wissenschaftlichen Sichtweisen die historischen und aktuellen Einflüsse der Informatik auf die Kriegsführung sowie die ethischen Fragestellungen, welche sich daraus ergeben. Aber auch von militärischer Seite wird wiederholt die Relevanz informatischer Methoden für die moderne Kriegsführung betont. Militärberater_innen und ranghohe Soldat_innen veröffentlichen Artikel in einschlägigen Journals oder Sammelbände über die *vernetzte Kriegsführung*, den *Cyberwar* oder *Information Warfare* (vgl. z. B. [Obe18], [DD14] und [Ric09]).

Es lässt sich anhand der genannten Literatur ein allgemeiner, internationaler Diskurs über die Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und Krieg motivieren, der auch bis in die Forschungslandschaft reichen kann. Gerade für einen umfassenden und aktuellen wissenschaftlichen Diskurs muss allerdings der Weg der mathematischen und informatischen Forschung in die moderne Kriegsführung noch ausführlicher geklärt werden. Außerdem legen die regionalen Unterschiede in der institutionellen Forschung und in der Sicherheits- und Verteidigungspolitik nahe, diese Auseinandersetzung auch länderspezifisch zu vertiefen. Mit Perspektive auf deutsche Hochschulen sind dabei einige grundlegende Fragen noch weitgehend offen:

- Wie und aufgrund welcher Mechanismen hat sich der Diskurs über die militärrelevante Forschung innerhalb der Mathematik und der Informatik entwickelt? Ist die Relevanz jenes Diskurses aktuell gegeben?
- Wo existieren Schnittpunkte der institutionellen mathematischen und informatischen Forschung mit der modernen Kriegsführung? Lässt sich von einer *mathematisierten* Kriegsführung sprechen?
- Inwiefern zeichnet sich das Bild einer militarisierten Forschungslandschaft in der

²allerdings ist diese Auseinandersetzung immer noch weit davon entfernt, fachlich oder gesamtgesellschaftlich verankert zu sein

Mathematik und der Informatik ab? Variiert dieses Bild in einzelnen Teildisziplinen?

Im Rahmen dieser Fragestellungen soll in Kapitel 2 – neben einigen Begriffsklärungen im Hinblick auf die Interdisziplinarität der Forschungsthematik – auf die Relevanz eines solchen Diskurses innerhalb der Mathematik und der Informatik sowie den grundlegenden Aufbau und die Zielsetzung dieser Arbeit eingegangen werden.

Kapitel 2 – Definitionen und Arbeitsweise

Die aktuelle Ausrichtung der Mathematik und der Informatik an deutschen Hochschulen schließt die fachinterne Reflexion über Forschungsfolgen weitgehend aus – beide Disziplinen fokussieren sich großteils auf Grundlagenforschung oder konkrete Anwendungsbezüge in Wirtschaft und Industrie. Vielmehr sind es politische Zusammenschlüsse von Wissenschaftler_innen oder interdisziplinäre Forschungsgruppen, die sich mit einer Abschätzung und Bewertung der Folgen befassen. Dieser Umstand führt bei einer kritischen Analyse gesamtgesellschaftlicher Auswirkungen von Forschungsergebnissen aus Mathematik und Informatik auch zu interdisziplinären Fragestellungen; sei es mit Bezug zur Soziologie, zur Politikwissenschaft oder auch zur Philosophie.

Dieses Kapitel behandelt daher einige zentrale Fragen, welche sich aus einem mathematischen Blickwinkel auf die Interdisziplinarität der Forschungsthematik stellen und motiviert den Aufbau und die grundlegenden Hypothesen der Dissertation. Zunächst werden hierbei Begriffe wie *Krieg*, *Frieden* und *moderne Kriegsführung* umrissen, anschließend die Idee einer *Wissenschaftsverantwortung* in der Philosophie und einzelne Sichtweisen zum *Verständnis von Wissenschaft* dargestellt. Auf der Basis dieser Überlegungen wird dann die Relevanz eines wissenschaftsethischen Diskurses innerhalb der Mathematik und der Informatik angedeutet, was schließlich zur Motivation der Forschungsfrage, des thematischen Aufbaus der vorliegenden Dissertation und deren Zielsetzung führt.

2.1 Abgrenzung der Begrifflichkeiten

Zu einer eingehenden Analyse der Verquickung der mathematischen und informationstechnologischen Forschung mit der modernen Kriegsführung bedarf es einer sinnvollen Eingrenzung des Begriffs *moderne Kriegsführung*. Dabei sollen zunächst die Begriffe *Krieg* und *Frieden* definiert und gegenüber gestellt und anschließend die Methoden und Mechanismen, welche die *moderne Kriegsführung* charakterisieren, erörtert werden.

Weiter kennzeichnet die Verquickung der Forschung in der Mathematik und der Informatik mit kriegerischen Handlungen einen Eingriff von Forscher_innen in gesamtgesellschaftliche Prozesse. Schon allein dieser Eingriff konfrontiert die Forschenden mit einer Verantwortung gegenüber der Gesellschaft, in der sie leben und sich bewegen. Besonders relevant ist hierbei eine Diskussion über die Reichweite der Verantwortlichkeit, welche aufgrund der unmittelbaren Tötungsfolgen von Krieg und damit der Frage nach einer indirekten Verantwortlichkeit der Forscher_innen für die Tötung von Menschen geführt werden muss. Die Definition von *Verantwortung* ist ein in der Philosophie verorteter Forschungsschwerpunkt und ist daher aus einer mathematischen und informatischen Perspektive ebenfalls zu klären.

Die Idee einer individuellen Verantwortung von Wissenschaftler_innen wirft schließlich unmittelbar die Frage auf, welchen Platz ein ethischer Diskurs in der Wissenschaft, oder allgemeiner, welche Rolle gesellschaftliche Begebenheiten und Entwicklungen in den einzelnen Fachwissenschaften einnehmen können. All das berührt die grundlegende Auffassung von Wissenschaft, also den *Wissenschaftsbegriff* selbst. Eine Auseinandersetzung mit jenen Themen findet und fand vor allem in der jüngeren Wissenschafts- und Sozialphilosophie sowie innerhalb wissenschaftspolitischer Gruppierungen statt. Als Grundlage für einen ethischen Diskurs in der Mathematik und der Informatik scheint es daher sinnvoll, auch einige Aspekte des Wissenschaftsbegriffes zu umreißen.

2.1.1 Krieg und Frieden

„Frieden ist nicht Abwesenheit von Krieg; Friede ist eine Tugend, eine Geisteshaltung, eine Neigung zu Güte, Vertrauen, Gerechtigkeit.“ —
Baruch de Spinoza

Für eine grundlegende Definition des Begriffes *Krieg* und eine stimmige Abgrenzung des Friedens von dem Umstand der bloßen Abwesenheit von Krieg bietet sich das Einführungswerk [Jah12] von Egbert Jahn zur Friedens- und Konfliktforschung an.¹ Jahn charakterisiert den Kriegsfall mittels dreier Aspekte (vgl. [Jah12, S. 33]), die ihn von ähnlichen oder ähnlich benannten Konfliktsituationen trennen. Erstens ist Krieg ein politisches Mittel, um Organisationsformen menschlichen Zusammenlebens zu verändern oder zu erhalten und unterscheidet sich damit grundlegend von strukturell begründeter Gewalt innerhalb der Gesellschaft wie politischen Attentaten, Kampfhandlungen zwischen Banden oder Privatfehden. Zweitens ist der Krieg ein politischer Konflikt zwischen zwei Parteien, die Waffen mit der Absicht zu töten benutzen. Diese Tötungsabsicht unterscheidet den Krieg damit einerseits von anderen politischen Kämpfen wie dem Wahlkampf oder dem politischen Straßenkampf mit Fäusten, Knüppeln oder Steinen; andererseits wird der Kriegsfall dadurch von Handlungen militärischer Agressoren wie beispielsweise bei der Besetzung eines Landes ohne Kampfhandlung getrennt. Drittens schließt der Krieg auch wechselseitiges Töten

¹Bei weiterführendem Interesse bezüglich der gesellschaftlichen und politischen Einordnung von Krieg und Frieden seien der_dem geneigten Leser_in die Werke [SSW06] und [JFS05] empfohlen.

mit ein, nicht nur eine Tötungsabsicht. Werden dagegen unbewaffnete oder wehrlose Individuen getötet, lässt sich nicht von Krieg oder Kampf, sondern von Mord oder Massenmord sprechen.

Bei der Festlegung eines Friedensbegriffs konkurrieren nun laut Jahn (vgl. [Jah12, S. 46]) die Bezeichnungen des *negativen Friedens* – definiert durch die Abwesenheit von Krieg – und des *positiven Friedens*, der durch positive Grundsätze wie beispielsweise soziale Gerechtigkeit und Gleichheit, die Formulierung und Aufrechterhaltung von individuellen Grundrechten sowie Freiheit beschrieben ist. Dabei lässt sich der positive Frieden allerdings auch in einer Negation darstellen, der „Abwesenheit von personaler und struktureller Gewalt“ (ebenda).

Gerade in der antimilitaristischen Arbeit verschiedener Friedensinitiativen spiegelt sich die Problematik der verwendeten Friedensbegriffe wieder: Oft wird aus Gründen der Dringlichkeit der rein reaktiven Anti-Kriegs-Position Vorrang gegenüber der konstruktiven Entwicklung einer positiven Friedensarbeit gegeben.

2.1.2 Moderne Schlachtfelder

In den Verläufen des Ersten und Zweiten Weltkrieges fand eine grundlegende Veränderung in der Kriegsführung beteiligter Parteien statt, die sich vorwiegend in den angewandten Schlachttaktiken und den Anforderungen an moderne Kriegstechnologie abzeichnete. Zum Zwecke einer begrifflichen Abgrenzung dieses taktischen und technologischen Wandels, der bis heute das Kriegsgeschehen stark prägt, wird weithin der Ausdruck „moderne Kriegsführung“ verwendet. Eine Einführung in die Charakteristika moderner Kriegsführung in Bezug auf die Streitkräfte nimmt beispielsweise das Werk [JKL⁺08] vor, das dabei als umfangreiches Lehrbuch gilt. Der Fokus des Werkes liegt weniger in der Analyse der gesamtgesellschaftlichen Ursachen und Auswirkungen jener modernen Kriegsführung, sondern hauptsächlich auf der Beschreibung der Veränderungen im taktischen Vorgehen und auf den Schlachtfeldern.

Werden kriegerische Handlungen anhand ihrer Schauplätze und dem taktischen Vorgehen getrennt, so bieten sich drei Kategorien an: zu Land, zu Wasser und in der Luft. Schritte zu einer Modernisierung der Kriegsführung lassen sich im taktischen Wandel innerhalb dieser Kategorien (z. B. Gefechtsformationen von Bodentruppen) und in der zunehmenden Verschränkung dieser Kategorien (z. B. Luft-Boden-Gefechte) erkennen. Eine der signifikanten Veränderungen der Kriegsführung zu Land war der Übergang von linear geführten Frontenkriegen und eng aufeinanderstehenden feindlichen Linien hin zu einer Analyse der gegnerischen Stärken und Schwächen auf dem Schlachtfeld und der taktischen Nutzung dieses Wissens (vgl. [JKL⁺08, S. 80-107]). Weg von der Überlegenheit in materieller Hinsicht und Personenstärke wurde ein neuer Fokus auf das offensive und defensive Vorgehen in der Bewegung der Bodentruppen gesetzt. Denn statt einer bloßen Zerstörung feindlicher Truppen war oft die lückenlose Aufstellung einer eigenen Defensive und gleichzeitige gezielte Vorstöße in Lücken der gegnerischen Truppen für die beteiligten Kriegsparteien entscheidend. Im Gegensatz zu den essentiellen Neuerungen in der Theorie der Kriegsführung zu Land

bleibt die Kriegsführung zu Wasser größtenteils von der technologischen Komponente des Kriegsgeräts bestimmt (vgl. [JKL⁺08, S. 143-165]). Das Aufrüsten von Kanonen und die Erfindung neuer Schiffstypen wie beispielsweise des U-Boots beeinflussen seit Beginn des Krieges zu Wasser den Ausgang einer Schlacht erheblich. Die Veränderung des Krieges in der Luft stellt eines der stärksten Charakteristika moderner Kriegsführung dar (vgl. [JKL⁺08, S. 187-219]). Sie vereint technische Neuerungen mit der Erschließung neuer Angriffsstrategien und der Informationsakquise für mögliche Offensiven. Neben dem reinen Kampf in der Luft kann ein Flugzeug sich auch ohne Durchbruch im Kampf hinter die feindlichen Linien begeben, um präzise empfindliche Infrastruktur oder Militärgerät anzugreifen. Außerdem verhelfen Aufklärungsflüge zu einem nicht selten für den Kriegsausgang entscheidenden Informationsvorsprung einer Partei. Voraussetzung für diese strategischen Vorhaben bleiben dabei allerdings technische Entwicklungen im Bereich der Waffensysteme sowie der Luftfahrt. Ein besonders aktuelles Beispiel der modernen Kriegsführung in der Luft ist die militärische Nutzung von Drohnen. Die hochtechnisierten ferngesteuerten Flugzeuge werden sowohl zu Aufklärungs- als auch zu Tötungszwecken genutzt.

Nach Ende des Zweiten Weltkrieges gewann ein weiterer Raum an Bedeutung für die militärische Nutzung – das *All.* Die USA und die Sowjetunion lieferten sich während dem Kalten Krieg das sogenannte „Space Race“ (vgl. z. B. [Col99]). Beide Großmächte versuchten möglichst schnell den Weltraum militärisch zu besetzen, weil sie sich dadurch einen Vorteil im Rüstungswettkampf erhofften. Die Jahre der Forschung, Entwicklung und Pionierarbeit brachten schließlich einen zentralen Bestandteil der modernen Kriegsführung hervor – den *Spionagesatellit*. Militärische Erdbeobachtungssatelliten werden beispielsweise für das Auskundschaften gegnerischer Truppenbewegungen, feindlichen Terrains oder zur Zielsuche genutzt und können so erheblich die Taktik und damit auch den Ausgang eines bewaffneten Konflikts beeinflussen. Der Weltraum ist also nicht unbedingt als viertes Schlachtfeld zu bezeichnen, aber durchaus als militärisches Operationsgebiet.

Einen ähnlichen Stellenwert nimmt inzwischen der *Cyberraum* ein. Gerade die immer weiter fortschreitende Computerisierung und Algorithmisierung macht staatliche, militärische und privatwirtschaftliche Institutionen zunehmend verwundbarer. Mit gezielten Angriffen auf feindliche Computernetzwerke können Hacker_innen an sensible Informationen gelangen oder ganze Infrastrukturen lahmlegen. Das Angreifen und Verteidigen von Computernetzwerken ist zwar traditionell eher Geheimdienstarbeit, doch bemühen sich immer mehr Staaten darum, auch militärische Strukturen für den Cyberraum zu schaffen. In Deutschland wurde beispielsweise 2017 ein eigenes Bundeswehr-Kommando für den Cyber- und Informationsraum gegründet, das knapp 14 000 Stellen umfasst (vgl. [Gru17b], siehe Abb. 2.1). Abgesehen vom Cyberraum soll das neue Kommando auch im *Informationsraum* wirken. Nach der militärischen Auffassung beinhaltet dies vor allem *psychologische Kriegsführung* (auch *operative Kommunikation* genannt): Die Zivilbevölkerung und die Truppen feindlicher Staaten sollen durch gezielt platzierte Informationen und Propagandaaktionen gegen ihre

Befehlsmacht aufgebracht und vom Handeln der deutschen Armee überzeugt werden. Selbstverständlich gibt es auch außerhalb Deutschlands militärische Institutionen, die im Cyber- und Informationsraum agieren – wie etwa die *NATO Communication and Information Agency* und die *US Psychological Operations Forces* – oder Geheimdienste, die eng mit dem Militär zusammenarbeiten – wie die *National Security Agency* (kurz: *NSA*) oder die russischen *FSB* und *SWR*. Der Cyber- und Informationsraum ist damit neben Land, Wasser, Luft und All zum fünften militärischen Operationsgebiet geworden.

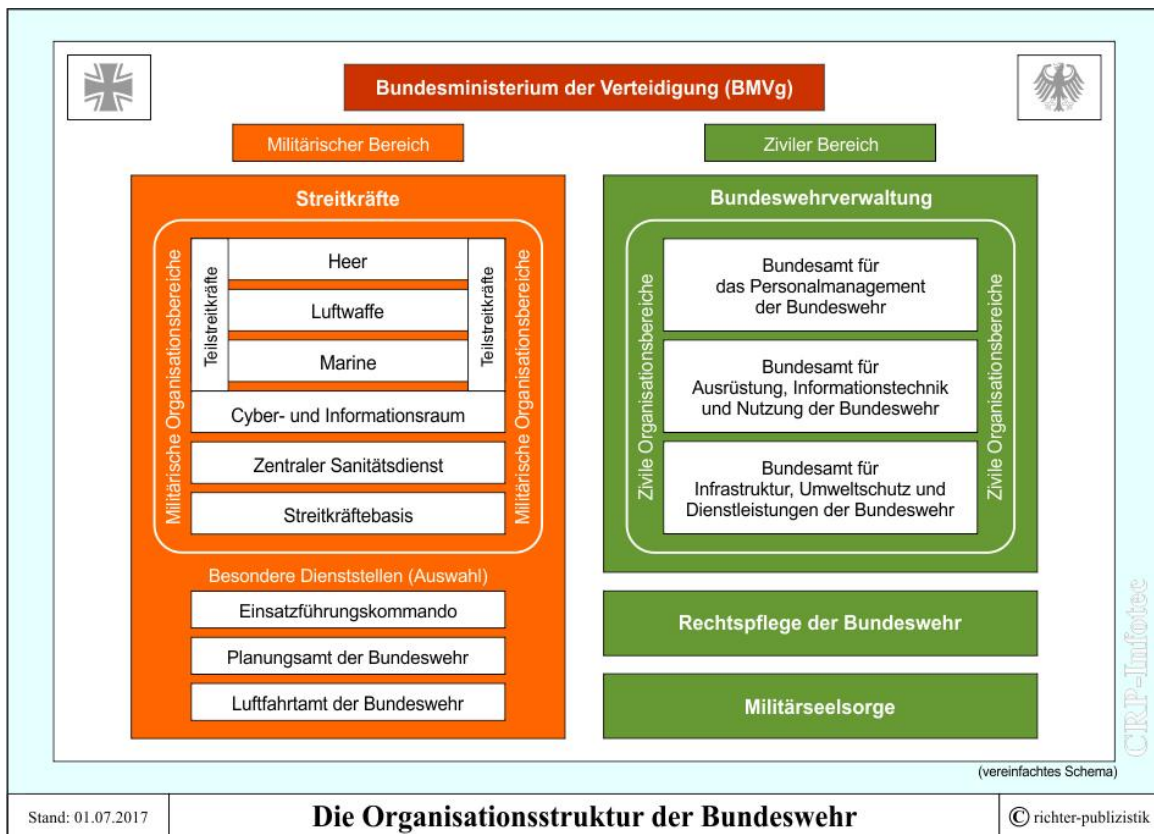


Abbildung 2.1: Organisationsstruktur der Bundeswehr.

Ebenso wie die neuen taktisch und technologisch bedingten Schlachtsituationen an Land, im Wasser und in der Luft soll das militärische Agieren im All sowie im Cyber- und Informationsraum im Folgenden von dem Begriff „moderne Kriegsführung“ mit eingefasst werden. Dabei sei jedoch angemerkt, dass gerade Begriffe wie *Drohnenkrieg*, *Cyberwar* und *Information Warfare* meist Teilaspekte konkreter bewaffneter Konflikte bezeichnen. Nur nominell sind diese Begriffe daher neue „Kriege“.

2.1.3 Zur Systematisierung des Kriegsbegriffes

Die in Abschnitt 2.1.2 dargestellte Entwicklung der Kriegstaktik und der Schlachtfelder seit den Weltkriegen gibt einen Überblick, welche Wege aktuelle bewaffnete Konflikte einschlagen. Um allerdings genauer nachvollziehen zu können, wie einzelne

Forschungsergebnisse im Krieg wirken, scheint es sinnvoll, verstärkt nach den *Zielen* und *Mitteln* moderner Kriegsführung zu fragen. Denn eine Darstellung der Mittel bietet direkte Anknüpfungspunkte zu den wissenschaftlichen Methoden, auf denen sie gegebenenfalls basieren. Die Ziele veranschaulichen dann, welchem Zweck die jeweiligen Mittel und damit auch die Forschungsergebnisse dienen. Eine Systematisierung des Kriegsbegriffes wurde bereits in den 1830er Jahren vom preußischen Generalmajor und Militärwissenschaftler Carl von Clausewitz mit Blick auf die damalige Kriegsführung vorgenommen. Sein Hauptwerk *Vom Kriege* [Cla91] gilt als Standardliteratur in der Militärtheorie und findet bis heute in der Ausbildung hochrangiger Soldat_innen Anwendung.

Clausewitz beschreibt den Krieg als „erweiterte[n] Zweikampf“ (vgl. [Cla91, S. 8]); „sein nächster Zweck ist, den Gegner niederzuwerfen und dadurch zu jedem ferneren Widerstand unfähig zu machen“ (ebenda). Noch zugespitzter ist der Krieg „also ein Akt der Gewalt, um den Gegner zur Erfüllung unseres Willens zu zwingen“ (ebenda). Um hieraus Strategien oder militärische Taktik ableiten zu können, versucht Clausewitz zu erörtern, wie feindlicher Widerstand gebrochen werden kann und stellt daraufhin die Mittel vor, die dazu verwendet werden können. In einem rein theoretischen, nach Clausewitz „abstrakten“ Krieg ergeben sich drei Aufgaben, um den Widerstand des Feindes zu brechen (vgl. [Cla91, S. 21-22]): die Zerstörung der gegnerischen Streitkraft, die Eroberung des Landes und das Bezwingen des feindlichen Willens. Sie alle drei bezeichnen Formen der staatlichen Macht, des Widerstandes gegen eine_n Angreifer_in: die Streitkraft als sich gewaltsam wehrendes Instrument, die Verfügungsgewalt über das Land mit allen Ressourcen, um theoretisch eine neue Streitkraft aufbauen zu können und der staatliche und gesellschaftliche Wille, gegen eine Eroberung oder einen letztendlichen Friedensschluss aufzubegehren. Im Falle des rein theoretischen, prototypischen Krieges gälte es, die Formen des Widerstandes auch in dieser Reihenfolge vollständig zu brechen – zuerst die Streitkraft, dann die Verfügungsgewalt über das Land und schließlich den Willen des Feindes.

In der Praxis zeigt sich allerdings, dass die Bezwingung einer Kriegspartei und der politische Friedensschluss nur selten durch das chronologische Abarbeiten jener drei Aufgaben gelingt. Passender und meist gewinnbringender sind nach Clausewitz zwei andere Ansätze, um den Widerstand des Feindes zu brechen (vgl. [Cla91, S. 22-24]): einen Sieg unwahrscheinlich aussehen zu lassen und den Kraftaufwand bzw. die Aufopferungen des Gegners zu erhöhen. Beide Ideen bedienen sich selbstverständlich auch oft einzelner Aspekte der drei obenstehenden Methoden, ungeachtet der Reihenfolge. So können beispielsweise die Besetzung bedeutender Landstriche (etwa für die Ressourcen oder die Logistik), die Zerstörung eines essentiellen Teils der Streitkraft (wie etwa der Marine) oder ein übermächtiges militärisches Staatenbündnis den Feind zur Kapitulation bewegen. In der theoretischen Idee der Kriegsführung bestehen die *Mittel* vornehmlich aus Variationen physischer Gewalt, Besatzung und Eroberung bis zum Schluss der kriegerischen Auseinandersetzung. In der Praxis kommen zu den klassischen physischen Gewaltmitteln noch psychologische Kriegsführung (wie etwa Einschüchterung oder Demoralisierung) und direktes politisches Vorgehen (wie die

Lösung und Bildung von Bündnissen oder das Anzetteln von Aufständen) hinzu.

In modernen und aktuellen Kriegen haben Clausewitz' Ansätze zur vermeintlichen Unwahrscheinlichkeit des Sieges und der Erhöhung des gegnerischen Kraftaufwandes immer mehr an Bedeutung gewonnen. Und die strikte Abfolge der abstrakten Kriegsführung von der Zerstörung der feindlichen Streitkraft über die Besetzung des Landes hin zum Bezwingen des gegnerischen Willens ist seltener geworden. Inzwischen scheinen drei Ansätze zur Brechung des feindlichen Widerstandes zentrale Bedeutung erlangt zu haben:

1. Abschreckung und das Demonstrieren von Überlegenheit; beispielsweise die Besetzung und Annexion einzelner Landteile, massive waffentechnische Aufrüstung oder einzelne drastische Militärschläge.
2. Schnelle und flexible Angriffe auf ferne, weit verteilte und teilweise hochbewegliche Ziele; beispielsweise Drohnenangriffe, der Einsatz von Spezialkräften oder Cyberattacken auf militärische Infrastruktur.
3. Das Erlangen zivilgesellschaftlicher und zwischenstaatlicher Akzeptanz – im eigenen Land, im Feindgebiet und international; beispielsweise durch eigene Propaganda, die Abwehr gegnerischer Propaganda oder psychologische Kriegsführung.

Auf Grundlage dieser Aspekte können auch die Mittel der modernen Kriegsführung weiter ausdifferenziert werden. Einige der wichtigsten sind: die technische Entwicklung und Verbesserung von Waffen und Kriegsgerät, die Gewährleistung der eigenen Informations- und Kommunikationssicherheit, die Informationsakquise (etwa durch Spionage oder Überwachung), die Vermischung des Militärischen und des Zivilen (z. B. bei Dual-Use-Forschung oder der Militarisierung der Gesellschaft), die zunehmende Fernsteuerung und Automatisierung von Methoden, Waffen und Gerät sowie die Spezialisierung der Streitkräfte. Auf Basis dieser Mittel und der oben aufgezählten Ansätze zur Überwindung des feindlichen Widerstandes sollen die in Kapitel 4 betrachteten Fachgebiete aus der Mathematik und der Informatik hinsichtlich ihrer Bedeutung für die moderne Kriegsführung bewertet werden.

2.1.4 Der Begriff der Verantwortung

Eine Definition von Verantwortung, die Reichweite von Verantwortlichkeit und in diesem Sinne auch die Frage nach Schuld und Strafe sind Kernthemen der Philosophie, die in der aktuellen Forschung äußerst kontrovers diskutiert werden und verschiedene gesellschaftliche Bereiche sowie Formen der menschlichen Interaktion fokussieren. Die im Rahmen dieser Arbeit zu erörternde Verantwortlichkeit von Wissenschaftler_innen bedarf eines Verantwortungsbegriffs, der die Rechenschafts- und Handlungspflicht von Forschenden als Ideengeber_innen und nicht nur als konkret Handelnde untersucht.

Gerade auch in der Mathematik und der Informatik ist diese Unterscheidung wichtig, denn neu entwickelte Theorien und Methoden sind zunächst nur Ideen – erst durch ihre Anwendung kann eine konkrete schadhafte Handlung entstehen. Zudem können Forschungsergebnisse in beiden Fächern durchaus ohne Anwendungsbezug, ohne bestimmte Intention oder für eine andere als die letztendliche Nutzung entwickelt worden sein. Wie kann in solchen Fällen also Verantwortung verstanden und wahrgenommen werden?

Aufgrund der diversen Auffassungen und Formulierungen in der philosophischen Forschung scheint es sinnvoll, verschiedene Verantwortungsbegriffe bezüglich ihrer Praktikabilität in der Wissenschaft abzuwägen. Dazu werden im Folgenden drei prominente Positionen verglichen und diskutiert: Hans Jonas' Ethik für die technologische Zivilisation in [Jon03] (Erstveröffentlichung 1979), Julian Nida-Rümelins Ausführungen zur Überzeugungsverantwortung in [Nid11] und Hannah Arendts umfassende Theorie zum Umgang mit zukunftsgerichteter Verantwortung in [Are13] (Erstveröffentlichung 1960).

Ein zentraler Aspekt von Jonas' Verantwortungsbegriff ist die Unterscheidung einer legalen und moralischen Verantwortung von Taten (vgl. [Jon03, S. 172-174]). Der moralische Part der Tatenverantwortung besteht in der öffentlichen Untersuchung von „Vorsatz, Überlegung, Motiv [und] Zurechenbarkeit“ einer individuellen Aktion, was schließlich im Zu- oder Abspruch von Schuld gipfelt. Im Falle der in diesem Sinne moralischen Schuldigkeit einer Person, eine unsoziale Handlung begangen zu haben, folgt meist eine abermals öffentlich ausgehandelte legale Strafe oder „Bußeleistung“ (vgl. [Jon03, S. 172]). Eine so auf konkrete und gegenwärtige Taten fixierte Verantwortlichkeit ist laut Jonas allerdings nur „Vorbedingung der Moral, aber noch nicht selber Moral“ (ebenda), da allein auf Grundlage dieser Tatenverantwortung auch vollkommene Untätigkeit nicht moralisch verwerflich wäre. Ein erheblicher Handlungsimperativ fehlt daher für wirkliche Moral: Wer die Macht hat, dem Wohle Anderer zuarbeiten zu können, ist „verpflichtet zu Taten, die keinem anderen Zweck vorgehabt sind“ (vgl. [Jon03, S. 174]). Diese Handlungspflicht und damit vor allem die Formulierung eines so zukunftsgerichteten Zwecks der menschlichen Taten lässt Jonas dann zu einer noch strikteren Abgrenzung individueller Verantwortung schreiten, die ein Abwägen der zielführenden Mittel mit einschließt (vgl. [Jon03, S. 393]); der Zweck des Handelns – „das Gedeihen des Menschen in unverkümmelter Menschlichkeit“ (ebenda) – darf nicht durch die dorthin führenden Mittel verletzt werden. Jonas' Beitrag zum Diskurs über einen Verantwortungsbegriff lässt sich schließlich auf zwei zentrale Aussagen kondensieren. Zunächst formuliert er einen neuen ethischen Imperativ: „Handle so, daß die Wirkungen deiner Handlung verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden“ (vgl. [Jon03, S. 36]). Um zu bewerten, ob die Folgen der eigenen Taten der Permanenz echten menschlichen Lebens widersprechen, soll sich das Individuum dann an der „Heuristik der Furcht“ (vgl. [Jon03, S. 63]) orientieren: Wenn die handelnde Person sich die Wirkungen der eigenen Aktionen in ihrer möglichst

negativen Ausprägung vorstellt, kann sie am besten erkennen, welche Folgen der Menschlichkeit widersprechen und welchen Geschehnissen sie daher vorbeugen will.

Ein wenig spezifischer auf wissenschaftliches Wirken und die allgemeinere Äußerung von Ideen bezieht sich Julian Nida-Rümelin, der von der Verantwortlichkeit für Überzeugungen spricht. Nach Nida-Rümelin ist ein Schaden, der durch die Äußerung einer unüberlegten Überzeugung entsteht, ebenso zu verantworten wie eine schadvolle Handlung (vgl. [Nid11, S. 33-40]). Durch die Auffassung einer wissenschaftlichen Theorie als Sonderform einer individuellen Überzeugung ergibt sich in logischer Konsequenz auch die Anwendbarkeit jener Überzeugungsverantwortung auf die Forschung: „Wissenschaftliche Verantwortung, also die Verantwortung des Wissenschaftlers und der Wissenschaftlerin, ist eine Sonderform der Verantwortung für Überzeugungen“ (vgl. [Nid11, S. 164]). Und da die Forscher_innen nicht nur innerhalb ihres wissenschaftlichen Umfelds interagieren, sondern in Form von angewandter Forschung auch mit anderen sozialen Gemeinschaften, beinhaltet die wissenschaftliche Verantwortung auch eine gesamtgesellschaftliche Komponente (vgl. [Nid11, S. 167]). Nida-Rümelin nennt die Verantwortlichkeit der Wissenschaftler_innen für die gesellschaftlichen Auswirkungen ihrer Forschungsergebnisse eine „externe Verantwortung der Wissenschaft“ (ebenda). Im Vergleich zum obenstehenden Jonasschen Verantwortungsbegriff trifft Julian Nida-Rümelin also eine explizitere Aussage über die Verantwortlichkeit von Wissenschaftler_innen.

Hannah Arendts Werk *Vita activa* [Are13] befasst sich weniger mit einer konkreten Formulierung von Wissenschaftsverantwortung, als vielmehr mit sehr grundlegenden Gedanken über die gesellschaftliche Einbettung menschlicher Tätigkeit – in Arendts Worten „was wir eigentlich tun, wenn wir tätig sind“ [Are13, S. 12]. Damit ist allerdings wissenschaftliches Wirken durchaus mit in ihre Überlegungen eingeschlossen und die Ausführungen über „Das Handeln“ [Are13, S. 239-306] gehen auf wichtige Problemfelder bei wissenschaftsethischer Reflexion ein. Zunächst erkennt Arendt an, dass kein Individuum „die Folgen der eigenen Tat je voll übersehen kann“ [Are13, S. 239]. Gleichzeitig existieren Grenzen für individuelle Handlungen, die von der Gesellschaft und Gemeinschaft, in der sich einzelne Personen bewegen, festgelegt oder – durchaus dynamisch – definiert werden. Die Grundsätze der Verantwortung, wie sie Hannah Arendt beschreibt, sind also immer in Wechselwirkungen zu sehen, zwischen dem handelnden Individuum und der Gemeinschaft. Ihr Verantwortungsbegriff baut dabei auf zwei zentralen Punkten auf: der Fähigkeit des handelnden Individuums zu versprechen sowie der Fähigkeit der Gesellschaft dem Individuum zu verzeihen. Genauer heißt das: Wegen der Unabsehbarkeit der eigenen Taten gibt die_ der Handelnde der Gesellschaft ein Versprechen über die bestmögliche Wahrung der Intention ihrer_ seiner Handlung. Sollte die Handlung also nicht intendierte Konsequenzen haben, wird das Individuum, das die Handlung vollzogen hat, versuchen, die negativen Folgen seiner Handlung zu bekämpfen und sie gemäß seines Versprechens gegenüber der Gesellschaft zu wenden. Dabei sind die durch die Handlung begonnenen Prozesse allerdings unwiderruflich und ein irreversibler negativer Ausgang für die Gesellschaft ist auch bei reichhaltig überdachten Aktionen möglich. Um dem Individuum dennoch die

Freiheit zu geben, wohlüberlegte Handlungen durchzuführen und im Falle negativer Konsequenzen auch frei und handlungsfähig zu bleiben, muss die Gesellschaft der Person verzeihen können. Für Arendt reicht damit nicht reine Selbstreflexion, denn „niemand kann sich selbst verzeihen, und niemand kann sich durch ein Versprechen gebunden fühlen, das er nur sich selbst gegeben hat“ [Are13, S. 302]. Die Wechselwirkung des Individuums mit der Gemeinschaft ist von höchster Bedeutung. Für die Verantwortung von Wissenschaftler_innen lässt sich die Arendtsche Idee also analog ihrer Tatenverantwortung formulieren: Die_der Wissenschaftler_in entscheidet sich nach eingehender Reflexion und Abschätzung eines Forschungsvorhabens für ein Projekt und gibt gleichzeitig der Gesellschaft ein Versprechen über die wohlgemeinten Absichten desselben. Sollte das Forschungsprojekt ungewünschte negative Konsequenzen haben – die beurteilende Instanz ist dabei die Gesellschaft –, liegt es an den verantwortlichen Wissenschaftler_innen, gemäß ihres Versprechens gegenüber der Gemeinschaft und als fähige Expert_innen für dieses Thema den Konsequenzen bestmöglich im Sinne ihrer initialen Intention entgegen zu wirken. Gleichzeitig muss die Gesellschaft den Wissenschaftler_innen die schadhafte Folgen ihrer Forschung verzeihen und ihnen damit den Handlungsspielraum für die Wiedergutmachung – im Sinne ihres anfänglichen Versprechens – geben.

Die Überlegungen der drei Philosoph_innen haben damit einige wichtige Gemeinsamkeiten: Erstens soll das Individuum sich nicht nur für seine konkreten Handlungen verantwortlich fühlen und zeigen, sondern auch für die zukünftigen Folgen derselben. Zweitens sind individuelle Taten immer auch gesellschaftlich einzubetten, da das Umfeld der_des Handelnden die Konsequenzen ihrer_seiner Taten mit trägt. Daraus ergeben sich auch zwei Sphären innerhalb des Verantwortungsbegriffes: Einerseits die individuelle Selbstreflexion und andererseits der Austausch und Diskurs zwischen der_dem Handelnden und der Gesellschaft. Jonas' ethischer Imperativ und seine Heuristik der Furcht sind konkrete Ideen, wie eine sinnvolle Selbstreflexion aussehen kann. Arendts Konzept vom Versprechen und Verzeihen beinhaltet dagegen einen konstruktiven Ansatz, wie gesellschaftliche Verantwortung wahrgenommen werden kann.

Gerade für die wissenschaftliche Arbeit – also auch die mathematische und informatische – scheinen die zukunftsgerichteten Aspekte der Verantwortungsbegriffe äußerst passend zu sein. Denn die Veröffentlichung einer Theorie oder die Entwicklung einer Technologie kann für sich selbst genommen nur schwer eine negative Handlung darstellen. Erst aus der Verwendung ergeben sich eventuell schadhafte Konsequenzen. Während problematische Forschungsfolgen in einigen angewandten Wissenschaftsbereichen noch relativ gut anhand der Zielsetzung oder der_dem Auftraggeber_in von Einzelprojekten diskutiert werden können, stellt etwa Grundlagenforschung die Wissenschaftler_innen und die interessierte Öffentlichkeit vor ein größeres Problem. Umso wichtiger scheint es dann allerdings, einen möglichst breiten gesamtgesellschaftlichen Diskurs über eventuelle schadhafte Folgen der theoretischen Forschung und entsprechende potentielle Lösungswege zu führen.

2.1.5 Wissenschaftsethik und Wissenschaftsbegriff

Die Übersetzung einer individuellen Verantwortung von Forscher_innen in den kollektiven Wissenschaftsbetrieb ist ein Themenschwerpunkt der Wissenschaftsphilosophie und steht damit in engem Zusammenhang mit dem Grundverständnis von Wissenschaft selbst. Der wichtigste Fachbereich ist in diesem Kontext wohl die *Wissenschaftsethik* (vgl. z. B. [San10, S. 3028-3030] und [Rey13]), deren Bedeutung inzwischen auch auf inter- und intradisziplinäre Forschungsgruppen ausgeweitet wurde. Zusätzlich existieren neben der ethischen Betrachtung wissenschaftlichen Wirkens auch Strömungen innerhalb der Soziologie, der Sozialphilosophie und wissenschaftspolitische Gruppierungen, die sich mit allgemeineren Fragen zu den Wechselwirkungen zwischen Wissenschaft, Staat und Gesellschaft auseinandersetzen (vgl. z. B. [Hor88], [Hab68] und [9]). All diese Ansätze haben gemein, dass sie das gegenwärtige Verständnis von *Wissenschaft* kritisch beleuchten. Und auch wenn für die Diskussion um anwendungsbezogene Forschung in Mathematik und Informatik eine Analyse des Wissenschaftsbegriffes äußerst interessant wäre, so kann sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht umfassend vorgenommen werden.² Stattdessen sollen einige Aspekte der wissenschafts- und sozialphilosophischen Forschung, der wissenschaftspolitischen Auseinandersetzung sowie der wissenschaftsethischen Praxis vorgestellt werden, die einem Diskurs über militärrelevante Forschung in Mathematik und Informatik zuträglich sein können.

Die Wissenschaftsethik ist stark geprägt von den drastischen Auswirkungen der naturwissenschaftlichen und medizinischen Forschung auf die Gesellschaft im Laufe des 20. Jahrhunderts. Beispiele hierfür finden sich etwa in den Chemiewaffen des Ersten Weltkrieges, den medizinischen Menschenversuchen der Nationalsozialist_innen oder der Erforschung und Entwicklung von Nuklearwaffen durch Physiker_innen ab dem Zweiten Weltkrieg. Dem gesellschaftlichen und politischen Ziel, dass solch menschenverachtende Technologien und Methoden zukünftig keine Anwendung mehr fänden, wurde zunächst überwiegend vertraglich und rechtlich zugearbeitet – wie beispielsweise mittels des Genfer Protokolls von 1925, den Bio- und Chemiewaffenkonventionen von 1971 und 1997, des Nürnberger Ärztekodex von 1947 und des Atomwaffensperrvertrags von 1970. Gegen Ende des 20. Jahrhunderts verfestigte sich die Idee, ethischen Belangen auch einen Platz in fachwissenschaftlichen Zusammenhängen einzuräumen. Das Ziel war es, dass einerseits die spezifischen ethischen Problemstellungen des jeweiligen Forschungsbereiches von fähigen Expert_innen – also selbst im Fach verorteten Wissenschaftler_innen – behandelt würden und andererseits, dass die wissenschaftsethische Forschung durch ihre Institutionalisierung unter den Forscher_innen Relevanz und Verbreitung erlange. Dabei ist die Wissenschaftsethik meist nicht durch die Formulierung strenger Regularien und moralischer Grundsätze gekennzeichnet, es geht vielmehr darum, einen offenen wissenschaftlichen Diskurs über Forschungsfolgen anzuregen und ethische Reflexion innerhalb von Wissenschaftsstrukturen zu motivieren. Verbreitung finden wissenschaftsethische Ansätze vornehmlich in den Fächern Medizin, Biologie, den Wirtschaftswissenschaften und vereinzelt in den

²Vielmehr böte sich dieses komplexe Thema als eigene Forschungsarbeit an.

Medien- und Kommunikationswissenschaften – andere, vor allem auch militärrelevante Forschungsbereiche wie die Physik, die Ingenieurs- und Materialwissenschaften, die Informatik oder die Mathematik bleiben bei dieser Entwicklung weitgehend außen vor.

An den Hochschulen ist die Wissenschaftsethik fachintern in eigenen Lehrstühlen, Arbeitsgruppen, Kommissionen und Räten organisiert (vgl. z. B. [10], [11] und [12]), fachübergreifend gibt es außerdem einige interdisziplinäre Zusammenschlüsse (vgl. z. B. [13] und [14]). So seien interessierte Leser_innen für weiterführende Literatur auf die Ergebnisse jener verschiedenen Forschungsgruppierungen verwiesen. Die institutionalisierte Wissenschaftsethik muss sich allerdings auch einer kritischen Betrachtung stellen: Denn sie ist – wie auch die übrige institutionalisierte Forschung – zunehmend abhängig von Drittmitteln und Kooperationsvereinbarungen. Gerade wenn Projekte von derselben Einrichtung finanziert werden, deren Produkt oder Methode ethisch eingeordnet und diskutiert werden soll, stellt sich unmittelbar die Frage nach der nötigen Unabhängigkeit und Neutralität der beteiligten Forscher_innen (vgl. z. B. [Mar10, S. 16]). Und selbstverständlich kann dieser wirtschaftliche Einfluss dann auch Auswirkungen auf die Forschungsschwerpunkte in der Wissenschaftsethik haben, da sich der wissenschaftliche Nachwuchs vor allem an Themen orientiert beziehungsweise orientieren muss, die hohe Fördergelder und Ansehen in der Forschungsgemeinde versprechen.

Auch die Sozialphilosophie und die Soziologie beteiligten sich ab dem 20. Jahrhundert verstärkt am Diskurs, welche Rolle die Gesellschaft sowie ihre Strukturen und Entwicklungen in der wissenschaftlichen Arbeit spielen. Vertreter_innen der *Kritischen Theorie* wie Max Horkheimer, Theodor W. Adorno und Jürgen Habermas sprachen sich beispielsweise wiederholt gegen die Tendenz einzelner Fachwissenschaften aus, sich von gesellschaftlichen Problemen, von Verantwortung und von der Sinnfrage der Forschung losgelöst zu betrachten. Horkheimer dazu etwa 1937 (vgl. [Hor88, S. 206]): „Eine Wissenschaft, die in eingebildeter Selbständigkeit die Gestaltung der Praxis, der sie dient und angehört, bloß als ihr Jenseits betrachtet und sich bei der Trennung von Denken und Handeln bescheidet, hat auf die Humanität schon verzichtet.“ Die Einbettung gesamtgesellschaftlicher Gegebenheiten in einen allgemeinen Wissenschaftsbegriff ist innerhalb der Sozialphilosophie und der Soziologie – und damit auch innerhalb der Kritischen Theorie – allerdings eher als Randthema zu bezeichnen und wird in diesen Disziplinen nicht besonders rege beforscht.

Eine andere Seite des Wissenschaftsverständnisses beleuchteten beispielsweise im Jahr 1968 Marburger Forscher_innen, die sich im *Bund demokratischer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler* (kurz: *BdWi*) organisierten. Gründungsmitglieder waren etwa der Soziologe Werner Hofmann, der Politologe Wolfgang Abendroth und auch Jürgen Habermas. Sie sahen sich als linke Wissenschaftler_innen auf gesellschaftspolitischer Ebene mit den Notstandsgesetzen der damaligen großen Koalition und auf wissenschaftlicher mit dem Marburger Manifest konfrontiert. Beiden Entwicklungen schrieben sie eine antidemokratische Grundhaltung zu – die Notstandsgesetze billigten dem Staat in einer Grundgesetzänderung eine weitreichende Machtausweitung im Kri-

senfall (etwa im Krieg, bei Katastrophen oder Aufständen) zu und mit dem Marburger Manifest hatten sich kurz zuvor viele Forscher_innen gegen eine Demokratisierung der universitären Strukturen ausgesprochen. Der BdWi führt in seinen Äußerungen zum Selbstverständnis unter anderem zwei Aspekte des Wissenschaftsbegriffes an, die ihm zufolge langsam abhanden zu kommen scheinen oder schon gekommen sind. Einmal den emanzipatorischen Ansatz, dass Wissenschaft dem reinen Erkenntnisgewinn diene und nicht „außerwissenschaftlichen Einflüssen“ (vgl. [9]) unterworfen werden dürfe – also etwa staatlichen oder privatwirtschaftlichen Interessen. Zum anderen tritt der Bund „für eine Wissenschaft in gesellschaftlicher Verantwortung“ ([15]) ein. Politisch motivierte Zusammenschlüsse von Forscher_innen gab es seit Ende des Zweiten Weltkrieges immer wieder – viele von ihnen hatten und haben das Ziel, aus der Wissenschaft heraus vor gefährlichen gesellschaftlichen Entwicklungen zu warnen und gesellschaftliche Verantwortung als Grundwert der Forschung zu etablieren. Kapitel 3 gibt – mit Fokus auf die militärrelevante Forschung – einen Überblick über jene Bestrebungen und Organisationen.

Insgesamt können also die bis hier genannten wissenschaftsethischen, sozialphilosophischen und wissenschaftspolitischen Überlegungen als wichtige Teile eines Wissenschaftsbegriffes verstanden werden. Die Auffassung, dass Wissenschaft von gesellschaftlichen Problem- und Fragestellungen losgelöst agiert ist in keinem Fachbereich in Stein gemeißelt. Vielmehr geben Wissenschaftsethik und Kritische Theorie Anreize zu einem Diskurs, ob und wie die in Abschnitt 2.1.4 motivierte individuelle Verantwortung von Forscher_innen in die wissenschaftliche Arbeit aller Fachbereiche integriert werden kann. Gleichzeitig stellen die Gründungsmitglieder des BdWi eine wichtige Frage nach Wissenschaftlichkeit: Inwieweit kann Forschung, die nicht dem reinen Erkenntnisgewinn, sondern staatlichen oder wirtschaftlichen Interessen dient, noch als wissenschaftlich bezeichnet werden?

2.2 Zur Motivation eines Diskurses über militärrelevante Forschung

Manche gesellschaftlichen und politischen Diskussionen erscheinen in Deutschland inzwischen selbstverständlich. Über Zeitungen, Radio und Fernsehen drängen Themen wie die politischen Aussagen der großen parlamentarischen Parteien, die Terrorgefahr in europäischen Städten oder die neuesten Beschlüsse der Bundesregierung zur Verkehrspolitik so lange immer wieder in den öffentlichen Diskurs, bis sie daraus nicht mehr wegzudenken sind. Viele andere Positionen und Ideen werden dagegen trotz erheblicher gesellschaftlicher Beachtung von Politik und Medien fast vollständig ignoriert und verlaufen dann entweder im Sand oder wachsen zu einer so großen Bewegung, dass über sie berichtet werden muss. Beispiele für ignorierte Debatten finden sich zahlreiche: die Freihandelsabkommen *TTIP* und *CETA*, praktische Ansätze zum Umweltschutz, Arbeitskämpfe oder die aktuellen Kriegsbeteiligungen der Bundesregierung.



Abbildung 2.2: Demonstration gegen das Freihandelsabkommen *TTIP* im Oktober 2015 in Berlin. Mit 250.000 Teilnehmer_innen eine der größten deutschen Demonstrationen der letzten Jahre.

Auch eine tiefgehende öffentliche Auseinandersetzung mit negativen Forschungsfolgen ist eher unpopulär. Dabei haben die in den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.5 vorgestellten Ansätze zur Wissenschaftsverantwortung und dem Wissenschaftsverständnis deutlich gemacht, als wie wichtig in diesem Fall ein wechselseitiger Austausch zwischen Forscher_innen und der übrigen Zivilgesellschaft verstanden werden kann. Gleichzeitig gibt es Fachbereiche, die selbst von einem innerwissenschaftlichen Diskurs über Forschungsfolgen weitgehend unberührt bleiben, obwohl sie erhebliche Auswirkungen auf die Gesellschaft haben. Ebendiese Problematik ergibt sich auch beim Schwerpunktthema der vorliegenden Arbeit – dem Zusammenhang zwischen Mathematik, Informatik und der modernen Kriegsführung. Im Folgenden soll daher anhand des Spannungsfeldes zwischen den gesellschaftlichen Grundwerten des *Friedens* und der *Wissenschaftsfreiheit* die Relevanz eines gesamtgesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskurses über militärrelevante Forschung exemplarisch angedeutet werden.

2.2.1 Die gesellschaftlichen Grundwerte des Friedens und der Wissenschaftsfreiheit

Die Diskussion um militärrelevante Forschung dreht sich oft um die Auslegung zweier zentraler gesellschaftlicher Grundwerte – des Friedens und der Wissenschaftsfreiheit. Beide Ideen finden im menschlichen Miteinander eine Umsetzung und sind auf ihre Art auch gesetzlich verankert.

Mit Blick auf die Schreckensherrschaft und Verbrechen der Nationalsozialist_innen wurde das friedliche Agieren Deutschlands in der Weltgemeinschaft vertraglich und rechtlich geregelt: zum einen im *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland* aus dem Jahr 1949, zum anderen im *Zwei-plus-Vier-Vertrag* von 1991. Zusammen mit internationalen Vereinbarungen zum Völkerrecht sprechen die rechtlichen Formulierungen eine klare Sprache: In der Präambel des Grundgesetzes verpflichtet sich die Bundesrepublik dazu, „dem Frieden der Welt zu dienen“ (vgl. [Bun49, Präambel]), der Zwei-plus-Vier-Vertrag regelt, „daß von deutschem Boden nur Frieden ausgehen“ darf (vgl. [BDF⁺91, Art. 2]), in der UN-Charta ist für alle Nationen ein „allgemeines Gewaltverbot“ (vgl. [Ver45, Art. 2 Abs. 4]) festgelegt und das *Völkerstrafgesetzbuch* aus dem Jahr 2002 spricht bei der Vorbereitung oder der Durchführung eines Angriffskrieges vom „Verbrechen der Aggression“ (vgl. [Bun02, §13]). Selbstverständlich sind solche Gesetzestexte keine Garantie für ein friedliches Zusammenleben, doch sie sollten zumindest die Pflichten staatlicher Institutionen abbilden. Im gesellschaftlichen Sinne ist der Frieden schon allein deshalb ein Grundwert, weil ohne ihn ein menschliches – geschweige denn ein harmonisches – Miteinander überhaupt nicht möglich ist.

Die Wissenschaftsfreiheit ist dagegen ein sehr viel spezielleres Thema, das sich stark auf die akademische Forschung fokussiert. Rechtlich ist die Formulierung über die Unabhängigkeit von Forscher_innen im Grundgesetz verankert: „Kunst und Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei“ (vgl. [Bun49, Art. 5 Abs. 3]). Gesellschaftlich gesehen wird den Wissenschaftler_innen damit das Vertrauen gewährt, eigenverantwortlich zum Wohle der Allgemeinheit zu forschen.

Allein an den Werten des Friedens und der Wissenschaftsfreiheit ließe sich ein Diskurs über Kriegsforschung an zivilen Hochschulen aufhängen. Dabei werden die Begriffe in der konkreten Diskussion oft von beiden Seiten genutzt. Befürworter_innen militärrelevanter Forschung sehen Kriegseinsätze häufig als notwendiges Mittel zur Friedensbildung in politisch instabilen Regionen, während die Gegensprecher_innen die Abwesenheit von Krieg oft als Mindestvoraussetzung für Frieden formulieren. Die Wissenschaftsfreiheit kann dagegen einerseits als Argument für die Zulässigkeit von Kriegsforschung genutzt werden, andererseits bedeutet Freiheit von Forschung, Lehre und Wissenschaft auch Unabhängigkeit von den Interessen Dritter, wie etwa der Rüstungsindustrie oder sonstigen Drittmittelgeber_innen. Insgesamt zeichnet sich damit ein wichtiger Diskurs über militärrelevante Forschungsprojekte ab, der bereits auf mehreren Ebenen zwischen verschiedenen Akteur_innen geführt wird³:

³allerdings noch weit davon entfernt ist, als „gesamtgesellschaftlich“ bezeichnet werden zu können

gesellschafts- und friedenspolitischen Gruppierungen (vgl. z. B. [16], [17] und [18]), Hochschulinitiativen (vgl. z. B. [19]), einzelnen Hochschulangehörigen (vgl. z. B. [20], [21] und [22]), Zusammenschlüssen kritischer Forscher_innen (vgl. z. B. [5], [6] und [23]), Universitätsleitungen (vgl. z. B. [ASt12], [24], [25]) und Landesregierungen (vgl. z. B. [Han15, §7b] und [26]).

Der Anstoß zum aktuellen Diskurs über militärrelevante Forschung kam zunächst von friedens- und gesellschaftspolitischen Initiativen sowie kritischen Forscher_innen. Erst als das Thema auch in der Politik nicht mehr ignoriert werden konnte, stiegen auch Universitätsleitungen und Landesregierungen als Akteur_innen in die Debatte ein. Oft besteht diese Beteiligung allerdings nicht in der Förderung des Diskurses sondern eher in der Rechtfertigung militärrelevanter Forschung.⁴ Innerhalb der einzelnen Forschungsbereiche wird eine solche Diskussion außerdem meist nicht als Teil der wissenschaftlichen Arbeit betrachtet – Ausnahmen bilden kleine Gruppen von Physiker_innen, Chemiker_innen und Biolog_innen, die in der Tradition der Ächtung von chemischen, biologischen, radiologischen und nuklearen Waffen (kurz: *CBRN*-Waffen) fortbestehen.

2.2.2 Die Situation in der Mathematik und der Informatik

Zurück zur Ausgangslage: Viele Methoden der modernen Kriegsführung stützen sich maßgeblich auf Forschungsergebnisse aus der Mathematik und der Informatik. Und die Ausprägungen jener modernen Kriegsführung sind ethisch oft sehr fragwürdig: gezielte Eingriffe in private Kommunikationsnetze (vgl. [27] und [Bun16, S. 13]), globale militärische Bildgebung durch Spionagesatelliten (vgl. [28]) oder der Ansatz des Drohnenkriegs (vgl. [29], [Ple16] und [30]). Das heißt, dass einige mathematische und informatische Forschungsergebnisse äußerst drastische und negative Auswirkungen auf die Zivilgesellschaft haben. Gleichzeitig ist ein Diskurs über diese Folgen mathematischer und informatischer Forschung aber weder innerhalb noch außerhalb der Forschungslandschaft sehr präsent.

Selbstverständlich sagt die simple Notwendigkeit aktueller Ergebnisse aus der Mathematik und der Informatik für die Methoden der modernen Kriegsführung weder etwas über den Weg des Wissens von der Forschung in die militärische Anwendung aus noch etwas über die Auswirkungen, die eine solche militärische Relevanz auf die wissenschaftliche Realität in beiden Fächern hat. Doch zumindest zeigt dieser Umstand, dass es jenen Weg von der mathematischen und informatischen Forschung in die moderne Kriegsführung geben muss. Das allein kann als Ansporn dienen, sich tiefergehend mit der Thematik auseinanderzusetzen und zwar – im Sinne der Ideen zur Wissenschaftsverantwortung in Abschnitt 2.1.4 – sowohl innerhalb der Mathematik und der Informatik als auch gesamtgesellschaftlich.

⁴Die historische und aktuelle Entwicklung der diesbezüglichen Debatten wird mit besonderem Fokus auf die Mathematik und die Informatik in Kapitel 3 weiter ausgeführt.

2.3 Zielsetzung, Hypothesen und Aufbau der Arbeit

Eine theoretische gesellschafts- und wissenschaftspolitische Auseinandersetzung über militärrelevante Forschung wäre bereits mit der Gegenüberstellung der Grundwerte *Frieden* und *Wissenschaftsfreiheit* möglich. Für einen ganzheitlichen Diskurs – inner- und außerhalb der Wissenschaftslandschaft – über die Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und der modernen Kriegsführung wird allerdings mehr benötigt. Vor allem konkrete Ideen zur Problemlösung verlangen nach weiterem Hintergrundwissen über die Art jener Verbindung.

Zum einen wäre zu klären, wie die Verquickung von Mathematik, Informatik und Krieg innerhalb der Forschung ausgeprägt ist: Was sind typische Themen für militärrelevante Projekte? In welchen Teilbereichen der Mathematik und der Informatik findet solche Forschung vornehmlich statt? Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftler_innen und militärischen Akteur_innen? Wie transparent und nachvollziehbar sind die Forschungsprojekte und deren Durchführung? Zum anderen stellt sich die Frage, welche Folgen dies nach sich zieht: Wie wirken sich mathematische und informatische Methoden in der modernen Kriegsführung auf die Zivilgesellschaft aus? Wie äußert sich die Verbindung von Mathematik, Informatik und Krieg innerhalb der Forschungslandschaft?

Es scheint, dass nur unter ständiger Berücksichtigung und Weiterentwicklung jener Fragen ein wirklich konstruktiver Diskurs über die militärische Nutzung mathematischer und informatischer Methoden geführt werden kann. Denn so werden einerseits den zivilgesellschaftlichen Akteur_innen und andererseits den Mathematiker_innen und Informatiker_innen die nötigen Informationen an die Hand gegeben, um über die Problematik und konkrete Lösungsansätze diskutieren zu können. Welche Rolle diese Arbeit innerhalb des Diskurses einnimmt und wie dabei vorgegangen wird, soll im Folgenden geklärt werden.

2.3.1 Zielsetzung des Promotionsvorhabens

Der dünne Forschungsstand zu den Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und Krieg lässt eine Reihe an Fragestellungen zu, die sich im Rahmen dieser Arbeit kaum erschöpfend behandeln ließen. Dies liegt zum einen an der schieren Anzahl und dem Umfang möglicher Themen: eine eingehende Analyse militärrelevanter Ansätze innerhalb einzelner Teildisziplinen der Mathematik und der Informatik (z. B. Optimierung, Kontrolltheorie, Kryptologie oder künstliche Intelligenz); eine zusammenfassende Auseinandersetzung mit dem Einfluss militärischer Fragestellungen auf die anwendungsbezogene Forschung in Mathematik und Informatik; auf die Grundlagenforschung in den einzelnen Teilgebieten; eine rein historische Bearbeitung der Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und Krieg; die Folgen jener historischen Entwicklung für die aktuelle Forschung; und vieles mehr.

Zum anderen wirkt die aktuelle politische Situation erheblich auf die Ausgangslage jener potentiellen Forschungsthemen ein (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.3 der vorlie-

genden Arbeit). Eine starke Präsenz in der NATO und die Ausweitung der eigenen militärischen Machtstellung sind zentrale Mittel der deutschen Außen- und Verteidigungspolitik (vgl. [SG13], [Deu16b] und [RF16]). Außerdem findet seit Jahrzehnten eine immer stärkere Deregulierung des Marktes statt, die nicht nur zur Kürzung von Sozialleistungen führt, sondern auch die Idee des wirtschaftlichen Wettbewerbs schrittweise prominenter und alltäglicher macht (vgl. z. B. [Bie08] und [Hol06]). Diese Entwicklungen schlagen sich natürlich auch auf die hiesige Wissenschaftspolitik nieder. Die kompetitive Einwerbung von Drittmitteln ist an den Hochschulen inzwischen selbstverständlich – militärische Akteur_innen sind teilweise zu vollkommen normalen Geldgeber_innen und Kooperationspartner_innen geworden (vgl. z. B. [31] und [21]). Gerade Drittmittelforschung wird dabei häufig von sogenannten Geheimhaltungsklauseln begleitet, die Wissenschaftler_innen eine Weitergabe der einzelnen Projektergebnisse untersagen. Die staatlichen und privatwirtschaftlichen Auftraggeber_innen wollen so sichergehen, dass die von ihnen bezahlten Erkenntnisse nicht an konkurrierende Länder oder Unternehmen gelangen. Eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der militärrelevanten Forschung in Mathematik und Informatik muss also immer auch mit diesen politischen Begebenheiten umgehen können: Militärforschung und Kriegsführung müssen überhaupt erst als Themen eines gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskurses motiviert werden; die Intransparenz von militärrelevanten Forschungsprojekten stellt ein beträchtliches Hindernis dar, das es zu thematisieren gilt; der gesellschaftliche Zweck von Wissenschaft und Forschung muss allgemein neu hinterfragt werden; und so weiter.

Hinter dieser Arbeit stehen die Hoffnung und das Ziel, dass die obenstehenden Forschungsthemen in Zukunft weiter aufgegriffen werden – sowohl innerhalb der Mathematik und der Informatik als auch interdisziplinär. Mit Blick auf die wissenschaftliche und politische Ausgangslage muss hierfür allerdings zunächst ein grundlegender Diskurs über die Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung angestoßen und damit der derzeitige Status quo in Frage gestellt werden. Um einem möglichst konstruktiven Ansatz zuzuarbeiten, soll diese Arbeit die verschiedenen Facetten der Problematik abbilden, die Inklusion aller potentiellen Diskursparteien fördern und die Wichtigkeit konkreter Lösungsansätze hervorheben. In diesem Sinne wird zum einen ein inhaltlicher Aufschlag für die Analyse militärrelevanter mathematischer und informatischer Forschung innerhalb der Wissenschaftslandschaft gemacht, zum anderen soll die Arbeit als fachliche Unterstützung des zivilgesellschaftlichen Diskurses und damit auch als Brücke zwischen der wissenschaftlichen und der gesamtgesellschaftlichen Debatte dienen.

2.3.2 Hypothesen der Arbeit

Aufgrund der vielen möglichen Themenstellungen zur Verquickung von Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung und dem gleichzeitig nur sehr dünnen Forschungsstand, scheint es von zentraler Bedeutung, die Orientierung der Arbeit genauer zu bestimmen. Im Folgenden werden daher zwei Hypothesen formuliert, deren Bearbei-

tung den wichtigsten Forschungsfragen und der Zielsetzung des Promotionsvorhabens bestmöglich Rechnung tragen soll. An ihnen können Argumentation und Arbeitsweise stetig ausgerichtet und geschärft werden.

Die beiden Forschungshypothesen der Arbeit lauten:

1. Es besteht eine erhebliche Verquickung zwischen mathematischer und informatischer Forschung an zivilen deutschen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung; diese Verbindung ist auch ohne eigene Mitarbeit an militärrelevanten Forschungsprojekten erkennbar.
2. Die Relevanz eines wissenschaftlichen und gesamtgesellschaftlichen Diskurses über militärisch nutzbare Forschung aus der Mathematik und der Informatik ist aktuell und war seit Ende des Zweiten Weltkrieges stetig gegeben.

Beide Hypothesen motivieren zusammen genommen die meisten zentralen Fragen der Arbeit: Wie sind die Wechselwirkungen zwischen mathematischer und informatischer Forschung an deutschen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung geartet? Sind Erkenntnisse dazu nur für Fachwissenschaftler_innen oder auch für eine interessierte Öffentlichkeit verständlich darstellbar? Besitzt ein Diskurs über die gesellschaftlichen Folgen der mathematischen und informatischen Forschung überhaupt gesellschaftliche und wissenschaftliche Relevanz? Und wie hat sich die Diskussion des Themas historisch entwickelt?

Aus ihnen ergeben sich dann – im Sinne einer ganzheitlichen Analyse der Thematik – auch die in der Einleitung des Abschnittes genannten, tiefergehenden Fragen: Was sind typische Themen für militärrelevante Projekte? In welchen Teilbereichen der Mathematik und der Informatik findet solche Forschung vornehmlich statt? Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftler_innen und militärischen Akteur_innen? Wie transparent und nachvollziehbar sind die Forschungsprojekte und deren Durchführung? Und: Wie wirken sich mathematische und informatische Methoden in der modernen Kriegsführung auf die Zivilgesellschaft aus? Wie äußert sich die Verbindung von Mathematik, Informatik und Krieg innerhalb der Forschungslandschaft?

2.3.3 Aufbau der Arbeit und Methodik

Die vorliegende Arbeit soll einen Überblick geben, wie die mathematische und informatische Forschung an zivilen deutschen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung verbunden sind. Nur so kann einerseits den Zielen des Promotionsvorhabens und andererseits auch dem dünnen Forschungsstand genüge getan werden. Allerdings wird auch ein noch so grober Überblick nicht zwei komplette Fachgebiete erfassen und gleichzeitig die Relevanz eines Diskurses über militärrelevante Forschung erörtern können. Der Fokus der Arbeit liegt daher auf Teilgebieten der Mathematik und

der Informatik, die die verschiedenen Facetten der militärrelevanten Forschung besonders gut und möglichst weitreichend abbilden. Auch innerhalb dieser Teilgebiete wird dieser Ansatz weiter geführt: Zum einen wird die militärische Bedeutung des jeweiligen Forschungsschwerpunktes übersichtsartig dargestellt, zum anderen sollen exemplarisch ausgewählte Forschungsprojekte den Einblick in die Thematik vertiefen. Dieser methodische Ansatz und die oben genannten Forschungshypothesen bestimmen den inhaltlichen Aufbau der Arbeit.

In Kapitel 1 und Abschnitt 2.2 wird der Diskurs über die Verquickung von Mathematik, Informatik und Krieg und die Relevanz der Forschungsarbeit motiviert – sowohl gesellschafts- als auch wissenschaftspolitisch. Außerdem wird schon die erste Beschränkung des Themenumfanges formuliert: Eine Analyse soll ausschließlich zu deutschen Hochschulen vorgenommen werden. In Abschnitt 2.1 werden Begriffe – etwa aus der Philosophie und der Friedens- und Konfliktforschung – geklärt, die für die Thematik wichtig sind. Kapitel 3 liefert einen historischen Überblick des bereits stattgefundenen Diskurses. Dabei wird die Auseinandersetzung innerhalb der Mathematik und der Informatik auch in allgemeinere politische Zusammenhänge eingeordnet. Die chronologische Darstellung soll einerseits Leser_innen und Forscher_innen den Einstieg ins Thema erleichtern. Andererseits wird der Diskurs um die militärrelevante Forschung in Mathematik und Informatik inhaltlich bereichert, indem bereits früher genannte – und oft vergessene – Aspekte erneut in die aktuelle Debatte getragen werden. In Kapitel 4 soll die deutsche Forschungslandschaft innerhalb der Mathematik und der Informatik bezüglich ihrer Verquickung mit der modernen Kriegsführung nachgezeichnet werden. Dazu werden einige kriegsrelevante Forschungsbereiche auf ihre Wechselwirkungen mit der militärischen Anwendung untersucht. Als Mittel dienen hierbei ein allgemeiner Überblick jener Wechselwirkungen pro Fachgebiet und die exemplarische Analyse einzelner Forschungsprojekte. Die Auswahl der Forschungsbereiche, der Projektbeispiele und der Formen der Verquickung geschieht allerdings ohne Anspruch auf Vollständigkeit – vielmehr soll das Kapitel fachspezifische Angriffspunkte für den Diskurs und die weitere Forschung liefern. Kapitel 5 beschließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem daraus entstandenen Ausblick auf potentiell folgende Fragestellungen.

Diese Arbeit soll sowohl verschiedenen wissenschaftlichen als auch gesellschaftspolitischen Milieus einen Mehrwert bringen. Viele einleitende Textteile und Beispiele erzeugen daher einen niedrigschwelligen Zugang zur Thematik. Außerdem sind die einzelnen Kapitel und Abschnitte so strukturiert, dass sie teilweise vollständig für sich stehen können und damit einen Einblick in Einzelaspekte der Arbeit ermöglichen. Fachspezifische Beispiele und tiefergehende wissenschaftliche Betrachtungen wurden so formuliert, dass sie bei Bedarf übersprungen werden können ohne das gesamte Grundverständnis der Thematik zu gefährden. Einen weiterreichenden Einblick in die jeweils behandelten Fachgebiete und Forschungsprojekte bietet eine möglichst umfassende Auswahl an ergänzenden Literaturangaben.

Kapitel 3 – Gesellschaftlicher und universitärer Diskurs über die Militärforschung in Mathematik und Informatik

Die bisher eher schleppende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und Krieg darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass auf politischer und gesellschaftlicher Ebene schon länger ein breiterer Diskurs über Militarisierungstendenzen in Deutschland stattfindet. Dieser kann zu Auswirkungen auf die Forschungspolitik in Mathematik und Informatik haben, ohne dass das Thema innerhalb der Fachbereiche präsent ist. Zum anderen beteiligen sich auch Wissenschaftler_innen an den Diskussionen und fördern so eine öffentliche Analyse der gesellschaftlichen Folgen ihrer Forschung. Seit Ende des Zweiten Weltkrieges richten Mathematiker_innen und Informatiker_innen – als Einzelpersonen oder in Zusammenschlüssen kritischer Forscher_innen – immer wieder das Wort an ihre Kolleg_innen, an die Politik und an die Zivilgesellschaft. Sie wollen damit eine Debatte über die militärische Nutzung mathematischer und informatischer Forschungsergebnisse anstoßen. Und auch wenn jene Mathematiker_innen und Informatiker_innen innerhalb ihrer Fachbereiche eine kleine Minderheit darstellen, so ist ihnen dennoch meist daran gelegen, die kritische Analyse ihrer Forschungsgebiete nicht nur politisch, sondern auch wissenschaftlich einzubetten.

Die historische Entwicklung der verschiedenen Diskurse – zur Militarisierung allgemein oder zur Verbindung zwischen Wissenschaft und Krieg – ist auch für die heutige Auseinandersetzung mit Militärforschung in Mathematik und Informatik äußerst relevant. Denn es wurden dabei schon früh Standpunkte und Argumente ausgetauscht, die auf die aktuellen Debatten über die Verquickung von Mathematik, Informatik und Krieg erheblichen Einfluss haben und daher in einer wissenschaftlichen Bearbeitung der Thematik Beachtung finden sollten. Eine chronologische Zusammenfassung der verschiedenen Diskurse seit Ende des Zweiten Weltkrieges, die für die Debatte innerhalb der Mathematik und der Informatik relevant sind, scheint daher angebracht. So

können bereits vorgebrachte Argumente dargestellt und gleichzeitig Gründe für die aktuelle Form des Diskurses in Mathematik und Informatik an deutschen Hochschulen analysiert werden. Die folgenden Betrachtungen der deutschen Hochschullandschaft werden sich für die Zeit von 1949 bis 1990 größtenteils auf die Entwicklungen in Westdeutschland beschränken. Denn die wissenschaftshistorische Quellenlage lässt vergleichsweise wenige Rückschlüsse auf die Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und Krieg an den ostdeutschen Hochschulen zu. Außerdem wurde nach der Wiedervereinigung das westdeutsche Hochschulmodell weitgehend auch für die ostdeutschen Forschungseinrichtungen übernommen – die damalige westdeutsche Wissenschaftspolitik besitzt daher für die heutige Sachlage weit mehr Relevanz als die ostdeutsche.

3.1 Nach dem Zweiten Weltkrieg

Zu Beginn des Jahres 1945 war die deutsche Zivilgesellschaft in einem Zustand beispielloser Verrohung. Zwei zerstörerische Weltkriege, Nationalismus, Rassismus, Antisemitismus und die Schrecken der NS-Herrschaft hatten das Schlimmste in den Menschen zum Vorschein gebracht. Der Alltag war geprägt von Misstrauen, Angst, Hass und die Gesellschaft war so durch und durch militarisiert, dass der Krieg und die unerbittliche nationalsozialistische Ideologie in jeder Form des menschlichen Miteinanders präsent waren. Als Deutschland von den Alliierten befreit wurde, bedeutete dies zwar einen Regimewechsel, doch der Nationalismus, der Rassismus und der Hass waren in der Gesellschaft noch immer verwurzelt. Hinzu kam, dass die von den Verwaltungsmächten geplante Umerziehung – die sogenannte „Entnazifizierung“ – nur sehr zögerlich durchgeführt, gänzlich vernachlässigt oder durch alte Nationalsozialist_innen systematisch unterlaufen wurde (vgl. z. B. [Fre96]). Dies hatte verschiedene Gründe, wie etwa den Beginn des Kalten Krieges zwischen dem Ost- und dem Westblock, der viele Kapazitäten der alliierten Kontrollbeamt_innen in Deutschland band oder die Idee, möglichst schnell wieder eine funktionierende deutsche Wirtschaft und Industrie aufzubauen, was dann den eigenen nationalen Interessen dienen sollte (z. B. mittels des *Marshallplans*).

Eine wirklich tiefgreifende Kritik und ehrliche Reflexion über die Taten der Deutschen in der NS-Zeit kam daher fast ausschließlich von den ehemals Geächteten, den Ausgestoßenen und den Verfolgten. Holocaust-Überlebende wussten als Zeitzeug_innen von ihren Leiden zu berichten, mundtot gemachte Kunstschaffende konnten die strukturellen Zwänge während der nationalsozialistischen Herrschaft beschreiben und zahlreiche Exilant_innen hatten die Entwicklung in Deutschland aus einer internationaleren Perspektive begleitet. Dennoch: Weitreichende Beachtung erhielten jene mahnenden Stimmen in der Mehrheitsbevölkerung anfangs oft nicht. Ganz im Gegenteil: Die konservativen westdeutschen Regierungen der Nachkriegsjahre und breite rechte Netzwerke ermöglichten alten Nationalsozialist_innen den erneuten Zugang zum deutschen Beamt_innenwesen – in die Exekutive, die Judikative, die

Legislative und ins Bildungssystem. Die Gesellschaft war so nachhaltig mit geschichtsvergessenen, rechten Anschauungen durchsetzt, dass sich noch die folgende Generation heftig gegen ihre Eltern und Großeltern wehren musste. Die politische Bewegung der 1960er Jahre wurde in Westdeutschland unter anderem mit der Ablehnung dieser erzkonservativen Politik begründet (vgl. z. B. [Fre08]).

Ähnlich der restlichen Zivilgesellschaft wurde in der NS-Zeit auch die Wissenschaft ideologisch besetzt. An den Hochschulen wurden jüdische und widerständige Angestellte verdrängt und verfolgt, Rassenlehre und Propaganda fanden den Weg in die Forschung und schließlich arbeiteten viele Wissenschaftler_innen der Kriegsmaschinerie des nationalsozialistischen Regimes und dessen Vernichtungspolitik zu. Nach der Befreiung Deutschlands konnten zwar einige jüdische Forscher_innen wieder Plätze in den Instituten und an den Hochschulen finden, doch wieder verblieben auch viele alte Nationalsozialist_innen in den Wissenschaftsberufen. Mit dem politischen Widerstand in den 1960er Jahren wurde die Problematik der mangelnden Vergangenheitsaufarbeitung erstmals breiter thematisiert (vgl. [Bol08]). Studierende der Universität Hamburg enthüllten im Jahr 1967 ein Transparent mit der berühmten Aufschrift „Unter den Talaren – Muff von 1000 Jahren“ und der Frankfurter Philosoph und Soziologe Theodor W. Adorno sagte 1966: „Die Forderung, dass Auschwitz nicht noch einmal sei, ist die allererste an Erziehung. [...] Ich kann nicht verstehen, dass man mit ihr bis heute so wenig sich abgegeben hat“ (vgl. [Ado71, S. 88]).



Bundesarchiv, Bild 146-1978-Anh.026-01
Foto: o. Ang. | 1943

Abbildung 3.1: Start der *Vergeltungswaffe 2* in Peenemünde.

Die Mathematik spielte in den Angriffskriegen des NS-Regimes eine entscheidende Rolle (vgl. z. B. [Seg03]). Forscher_innen lieferten Erkenntnisse und Methoden für die militärische Luftfahrt (z. B. Gustav Doetsch), neue Waffensysteme (z. B. die Berechnungen von Lothar Collatz und Alwin Walther für die *Vergeltungswaffe 2*) und die Chiffrierung kriegsrelevanter Nachrichten (z. B. Helmut Grunsky und Oswald Teichmüller). Mathematiker_innen beteiligten sich natürlich auch an der Durchsetzung der nationalsozialistischen Ideologie innerhalb und außerhalb der Hochschulen. Zum einen war es ihnen so im Wissenschaftsbetrieb möglich, jüdische Konkurrenz – wie etwa die berühmten Professoren Edmund Landau in Göttingen oder Felix Hausdorff in Bonn – auszuschalten. Zum anderen trieb sie die pure Überzeugung: Ludwig Bieberbach propagierte beispielsweise die „Deutsche Mathematik“, welche „undeutsche“ Einflüsse aus der Mathematik verbannen und die NS-Ideologie mathematisch zu begründen suchte. Ähnlich entwickelte sich der größte deutsche Interessenverband von Mathematiker_innen, die *Deutsche Mathematiker-Vereinigung* (kurz: DMV): Jüdische Mitglieder wurden ausgeschlossen, es entbrannte Streit um die Einführung eines „Führerprinzips“ und Wilhelm Süss, Mitglied der *Nationalsozialistischen Deutschen Arbeiterpartei* (kurz: NSDAP) und des NS-Dozentenbundes, wurde Präsident der DMV (vgl. [Rem04b] und [Rem04a]).

Die Ausschlüsse jüdischer Mitglieder, interner politischer Streit, eine NS-konforme Führungsriege und schließlich zahlreiche prominente Austritte aus der Vereinigung – das Ende des Zweiten Weltkrieges hätte ohne Weiteres auch das berechtigte Ende der DMV bedeuten können. Mit großem Engagement schaltete sich im Jahr 1946 allerdings der Mathematiker Erich Kamke ein und verhinderte dies. Auf sein Betreiben hin konnte 1946 ein Mathematiker_innen-Kongress in Tübingen abgehalten werden und 1948 wurde die DMV wieder gegründet. Kamke war als politischer Gegner des nationalsozialistischen Regimes, als „jüdisch versippt“ geltend 1937 in den Zwangsruhestand versetzt worden und 1944 knapp einem Arbeitslager entgangen. In seiner Eröffnungsrede des Tübinger Mathematiker_innen-Kongresses fand er als einer der ersten deutschen Forscher_innen der Nachkriegszeit sehr deutliche Worte bezüglich der Rolle von Wissenschaftler_innen in der Gesellschaft (vgl. [Mat46]):

„Wie zum Arzt neben der medizinisch-technischen Ausbildung auch eine charakterliche Erziehung gehört die ihn selbst die gefährlichsten Hilfsmittel – Messer, Narkotika, Gifte – nur zum Wohle des Kranken verwenden lässt, so ist es unerlässlich, dass auch die Wissenschaftler ihre ungeheure Macht, die sie zum Herrn über Leben und Tod ganzer Völker, ja der ganzen Menschheit machen kann, nur zu deren Wohle verwenden. Während früher die Eignung für die eigentliche wissenschaftliche Forschung das hervorstechendste Merkmal des Forschers bildete, wird in Zukunft noch etwas anderes hinzukommen müssen: ein besonders hohes Berufsethos, ein auf das feinste ausgeprägtes Verantwortungsbewusstsein gegenüber den Folgen der Forschung für die Menschheit. Es wird zu erwägen sein, ob zu diesen auf moralischem Gebiet liegenden Ansprüchen an die Forscherpersönlichkeit

noch organisatorische Massnahmen hinzukommen müssen, etwa als mildeste Massnahme die Einrichtung eines internationalen Informationsbüros, bei dem ohne Beschränkung der Freiheit des Forschens, alle Forschungen bestimmter Wissenschaftsgebiete anzumelden sind.

Diese Probleme sind von solcher Bedeutung, dass sie überall wo Wissenschaftler zusammentreffen, diskutiert werden sollten. Wir alle müssen uns mit aller unserer Kraft, mit unserer ganzen Person dafür einsetzen, dass die Wissenschaft niemals mehr einem Werk der Zerstörung, sondern nur noch dem Wohle der Menschheit dient.“

Mit seinem Appell blieb Kamke allerdings ein Außenseiter – der Wissenschaftsbetrieb in der Mathematik nahm wieder seine gewohnte Fahrt auf. Wilhelm Süss blieb Leiter des von ihm gegründeten *Reichsinstituts für Mathematik* in Oberwolfach (nach dem Krieg: *Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach*) und Professor an der Universität Freiburg. Alwin Walther blieb dem *Institut für Praktische Mathematik* (kurz: *IPM*) in Darmstadt vorangestellt, von wo aus er während der nationalsozialistischen Herrschaft eng mit der SS-Forschungseinrichtung „Ahnenerbe“ zusammengearbeitet hatte und dabei an der Ausbeutung von jüdischen Zwangsarbeiter_innen im Konzentrationslager Sachsenhausen beteiligt gewesen war. Am IPM hatte in den 1940er Jahren auch Lothar Collatz gearbeitet, der noch während der NS-Zeit einem Ruf an die Universität Hannover gefolgt war und später das Institut für Angewandte Mathematik der Universität Hamburg gründete. Zur direkten Selbstreflexion waren Mathematiker_innen in der Nachkriegszeit also nur selten gezwungen, genausowenig wie die übrige deutsche Bevölkerung. Dies änderte sich erst merklich mit den sozialen Bewegungen der 1960er Jahre.

3.2 Während des Kalten Krieges

Nach dem Zweiten Weltkrieg standen sich mit USA und Sowjetunion Supermächte gegenüber, die einen Konflikt zwischen zwei gegensätzlichen Ideologien heraufbeschworen – dem Kapitalismus im Westen und dem Kommunismus im Osten (vgl. [Stö10]). Auf die Blockbildung folgte ein riesiger Rüstungswettlauf, der beide Staaten bald mit Atombomben versorgte, mit denen sie mühelos die ganze Menschheit hätten auslöschen können. Die Angriffe der USA auf Hiroshima und Nagasaki verdeutlichten die fürchterliche Wirkung von Nuklearwaffen und beide Supermächte wussten, dass sie bei einem potentiellen Erstschlag selbst mit ihrer vollständigen Vernichtung hätten rechnen müssen (engl. *mutually assured destruction*). So blieb jener Konflikt zwar ein Kalter Krieg, doch von einem stabilen Gleichgewicht konnte kaum die Rede sein: Militärische Drohgebärden – wie etwa in der Kubakrise 1962 oder durch den NATO-Doppelbeschluss 1979 –, direkte Kriegsbeteiligungen beider Länder – zum Beispiel die der USA in Vietnam oder der Sowjetunion in Afghanistan –, Stellvertreterkriege im Globalen Süden – beispielweise in Angola oder Äthiopien – und ständige Geheim-

dienstaktionen – wie durch die *Central Intelligence Agency* (kurz: *CIA*) und den *KGB* – hielten die Weltöffentlichkeit über gut 40 Jahre in Atem.

Auch in Deutschland war diese Ost-West-Konfrontation spürbar (vgl. z. B. [Dep06] und [BOR⁺94]). Das Land war mit dem Ende des NS-Regimes von den alliierten Mächten geteilt worden – die *Bundesrepublik Deutschland* (kurz: *BRD*) wurde nun im Sinne der westlichen Staaten, die *Deutsche Demokratische Republik* (kurz: *DDR*) nach den Wünschen der Sowjetunion regiert. Dieser politischen Trennung folgte bald auch militärisches Säbelrasseln: Mit der Gründung der *Bundeswehr* 1955 und der *Nationalen Volksarmee* (kurz: *NVA*) 1956 standen schon früh im Verlauf des Kalten Krieges zwei deutsche Armeen zum Einsatz im Kriegsfall bereit. Der Entschluss zur Wiederbewaffnung deutscher Streitkräfte und die jeweilige politische Bindung an die Mächte USA und UdSSR führte zu einer erheblichen Waffenproduktion in BRD und DDR.

Doch die Zeit des Kalten Krieges wurde auch schnell die Zeit der sozialen und gesellschaftspolitischen Bewegungen. Die neuen schwelenden und tatsächlichen militärischen Konflikte ließen weltweit Friedensbewegungen entstehen und erstarken. Im Westen waren vor allem die Zerstörungsgewalt der Atombombe, der rein antikommunistisch begründete Krieg der USA in Vietnam und die völlige Ignoranz der Regierungen gegenüber der Kritik aus der Zivilgesellschaft aktivierende Momente. In der BRD wurde spätestens mit den Studierendenprotesten der 1960er Jahre und der *Außerparlamentarischen Opposition* (kurz: *APO*) eine kritische Masse für politischen Widerstand erreicht. Die APO sah sich schon früh mit medialer Stimmungsmache – vor allem durch den *Springer-Verlag* und dessen *Bild-Zeitung* – und harten staatlichen und polizeilichen Maßnahmen konfrontiert. Demonstrationen verliefen selten ohne Ausschreitungen und schließlich gipfelte der Konflikt in der Erschießung des Studenten Benno Ohnesorg durch einen Polizisten im Jahr 1967 und einem Attentat auf den Sozialisten Rudi Dutschke im Jahr 1968. Den Widerstand erfasste daraufhin eine Welle der Radikalisierung, welche zu Streitigkeiten und Rissen zwischen gewaltbereiten Aktivist_innen und bürgerlichen Kräften innerhalb der Protestbündnisse führte. So zerfiel die APO in Gruppen mit unterschiedlichen Ansätzen und Arbeitsgebieten. Die Friedens- und Umweltbewegung versuchte sich beispielsweise weiter an Demonstrationen, Blockaden und anderen Mitteln des zivilen Ungehorsams, die Partei *Die Grünen* sollte in den 1980er Jahren zum parlamentarischen Sprachrohr des Widerstands werden und einige linksradikale Aktivist_innen schlossen sich zu militanten Vereinigungen wie der *Roten Armee Fraktion* (kurz: *RAF*) oder der *Bewegung 2. Juni* zusammen. Die Attentate der RAF und die darauf folgenden Gewaltdebatten innerhalb linker Gruppen ließen bis in die 1990er Jahre große Teile der sozialen und politischen Bewegungen zerbröckeln.

Die kritischen Stimmen in der Zeit des Kalten Krieges haben wichtige Beiträge zu aktuellen politischen Diskursen geleistet. Dabei war der Widerstand allerdings keinesfalls nur auf die Bundesrepublik beschränkt. Da der Fokus dieses Abschnittes aber auf den Auswirkungen der damaligen Proteste auf die heutige Diskussion über militärrelevante Forschung in Deutschland liegen soll, scheint es an dieser Stelle nicht sinnvoll, die internationalen Entwicklungen der ereignisreichen Jahre von 1947 bis 1989

ausführlicher zu behandeln. Die _der geneigte Leser_in sei zu diesem Zweck auf Werke wie [Fre08] und [Kat87] verwiesen.

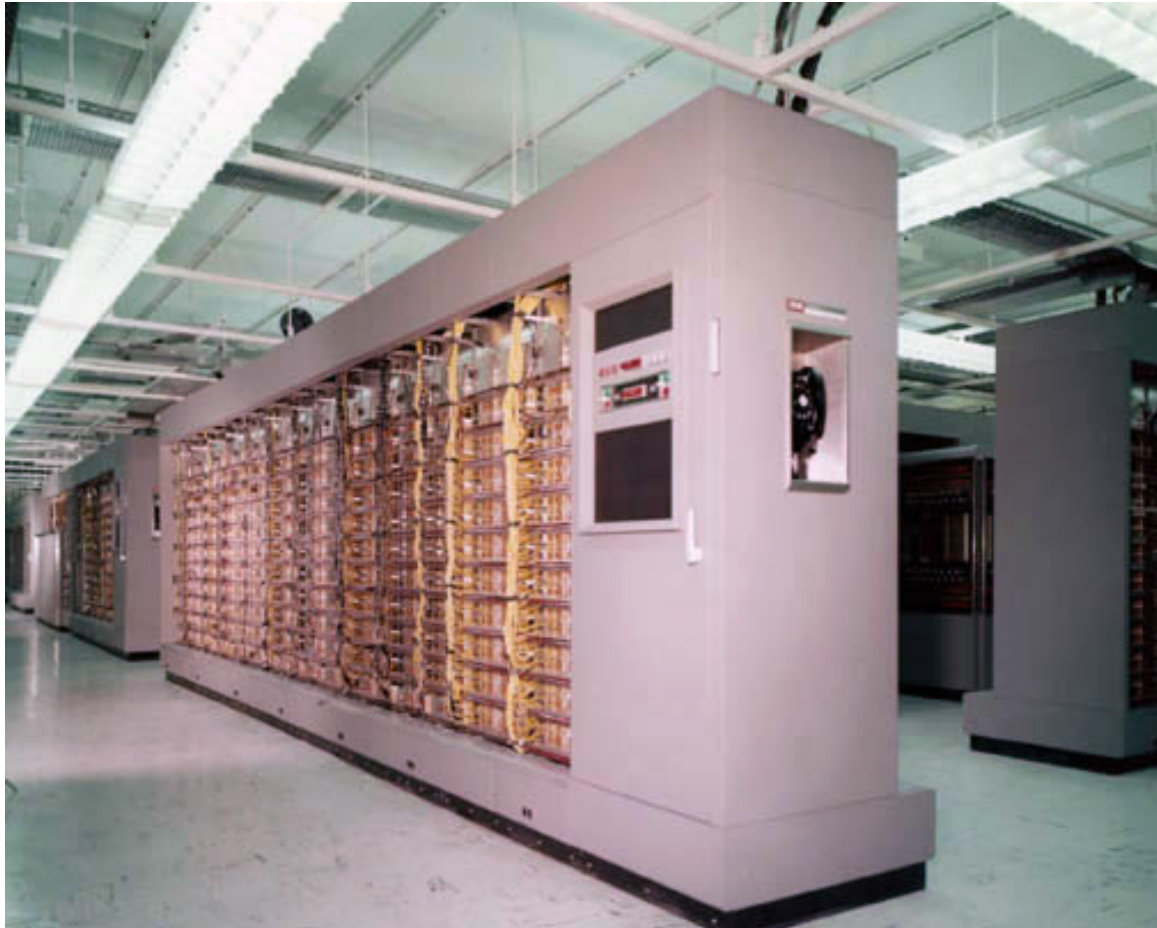


Abbildung 3.2: Q7 Kommando- und Kontrollsystem des *US Air Force Semi-Automatic Ground Environment* aus dem Jahr 1961 – eines US-weiten Computernetzes zur Erkennung und Abwehr feindlicher Geschosse und Flugzeuge.

Das technische Wettrüsten zwischen USA und UdSSR erforderte stetig neueste Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung. Die wissenschaftlichen Institutionen beider Länder und deren Angestellte wurden daher zu wichtigen Grundpfeilern des Ost-West-Konflikts (vgl. z. B. [Les94] und [Gra94]). So waren Ingenieurwissenschaftler_innen für den Waffen- und Maschinenbau unabdingbar – es wurden Interkontinentalraketen konzipiert, Flugzeuge entwickelt, die auch Atombomben ins Ziel bringen konnten und Trägerraketen für militärische Satelliten gebaut. Physiker_innen waren mit Problemen in der Raumfahrt betraut und erweiterten die Waffenarsenale der beiden Blockmächte um neue Atom- und Wasserstoffbomben, die Forschung in Biologie und Chemie fügte dem schließlich noch B- und C-Waffen hinzu. Erfolge im Bau von Computern und das neue Forschungsgebiet der Informatik konnten außerdem den Zeitaufwand für Flugbahnberechnungen in der Raumfahrt und von ballistischen Raketen bedeutend verringern.

Die Finanzierung der Rüstungsprojekte oblag größtenteils staatlichen Institutionen oder den Regierungen der beiden Länder selbst. Auf US-Seite wurde beispielsweise 1958 die *Defense Advanced Research Projects Agency* (kurz: *DARPA*) gegründet – eine Behörde des Verteidigungsministeriums, die militärisch relevante Wissenschaft fördert –, die 1950 entstandene *National Science Foundation* (kurz: *NSF*) legt ihren Fokus dagegen auf die Finanzierung nichtmedizinischer Grundlagenforschung, die unter anderem die „Landesverteidigung sicherstellen [...] [soll]“¹ (vgl. [32]) und der Raumfahrt wurde mit der *National Aeronautics and Space Administration* (kurz: *NASA*) im Jahr 1958 gleich eine ganze Behörde gewidmet. In der Sowjetunion mussten die Mechanismen des freien Marktes nicht berücksichtigt, Universitäten und Forscher_innen nicht erst mit finanziellen Anreizen zur Mitarbeit bewegt werden. Die Universitäten waren verstaatlicht und dienten daher im Kalten Krieg ohnehin auch militärischen Zwecken – die sowjetische Führung musste nur entsprechende Aufträge wie etwa das Raumfahrt- oder das Atomprogramm anordnen. Auch deutsche Wissenschaftler_innen arbeiteten ihrer jeweiligen Verwaltungsmacht zu. Entweder wurden sie zu diesem Zweck in die USA und die UdSSR verbracht oder die Forschung an deutschen Universitäten fand ihren Weg in die US-amerikanischen und sowjetischen Projekte.

Im Widerstand der BRD der 1960er Jahre fanden einige wichtige Wechselwirkungen zwischen gesellschaftspolitischen Bewegungen und den deutschen Hochschulen statt. Zum einen waren unter den Protestierenden viele Studierende, zum anderen bekamen Staats- und Gesellschaftskritik mit den Soziologen *Horkheimer*, *Adorno* und *Marcuse* (Vertreter der sogenannten *Frankfurter Schule*) erstmals ein wissenschaftliches Gesicht (vgl. z. B. [Wal10]). Die Theorien der Frankfurter Schule hatten damals und haben bis heute Einfluss auf die Debatten innerhalb linker Zusammenhänge. Außerdem wandten sich Forscher_innen unterschiedlichster Fachbereiche teilweise in internationalen Zusammenschlüssen gegen die Aufrüstungs- und Abschreckungspolitik von USA und Sowjetunion. In Göttingen sprach sich im Jahr 1957 eine Gruppe von 18 hoch angesehenen Atomforschern gegen die damals von der Bundesregierung angestrebte Ausrüstung der Bundeswehr mit Atomwaffen aus (vgl. [33]). 1980 gründete sich in Genf die Gemeinschaft *Internationale Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges, Ärzte in sozialer Verantwortung* (kurz: *IPPNW*), ab 1982 mit eigenen Sektionen in beiden deutschen Staaten (vgl. [34]). Und 1989 entstand die deutsche Abteilung des internationalen Verbundes von *Juristen und Juristinnen gegen atomare, biologische und chemische Waffen* (kurz: *IALANA*) (vgl. [35]). Auch die ersten institutionellen Verpflichtungen zur friedlichen Forschung – sogenannte *Zivilklauseln* – wurden in der Zeit des Kalten Krieges an deutschen Forschungseinrichtungen implementiert. So wurden der TU Berlin und dem Kernforschungszentrum Karlsruhe von den alliierten Mächten nach Ende des Zweiten Weltkrieges verboten, rüstungsrelevante Forschung an ihren Insituten durchzuführen (vgl. [4] und [36]). Im Jahr 1986 gab sich außerdem die Universität Bremen eine eigene Zivilklausel ([ASt14, S. 4]). Auf Wunsch der Bremer Landesregierung sollte dort ein neuer Wissenschaftsbereich *Weltraumforschung*

¹Übersetzung des Autors aus dem Englischen

gegründet werden und der Akademische Senat der Hochschule befürchtete, dass dahinter militärische Interessen stünden – die Zivilklausel als Selbstverpflichtung der Universität, nicht für militärische Zwecke zu forschen, schaffte dieser Problematik Abhilfe.

Auch der Mathematik kam während des Kalten Krieges erhebliche Bedeutung zu. So war beispielsweise die Arbeit in der Numerik, der Optimierung und der Kontrolltheorie grundlegend für ingenieurwissenschaftliche Durchbrüche in der Luft- und Raumfahrt sowie der Entwicklung von Lenkwaffen (vgl. Abschnitte 4.3.1 bis 4.3.3). Ergebnisse aus der Optimierung, dem Operations Research und der Spieltheorie sollten Industrie und Militär Planungsunterstützung bei der Produktion, der Logistik, in Schlachtszenarien und beim Rüstungswettlauf bieten (vgl. Abschnitte 4.3.1 und 4.2.1). Und die in den Geheimdiensttätigkeiten und der Staatskommunikation ständig präsente Kryptologie stützte sich maßgeblich auf abstrakte Algebra – insbesondere auf die Forschung zu endlichen Körpern (vgl. Abschnitte 4.1.1 und 4.1.2). Dabei war es die massive finanzielle Förderung militärrelevanter Projekte durch USA und Sowjetunion, die einzelne Ansätze der angewandten Mathematik – wie etwa das Operations Research und die Theorie zur optimalen Steuerung – erst entstehen ließ oder eine Vertiefung gewisser Forschungsbereiche ermöglichte. Gleichzeitig fand im Bereich der Datenverarbeitung eine regelrechte Revolution statt: Die 1950er Jahre brachten die ersten digitalen programmierbaren Computer. Nach und nach wurden diese immer rechenstärker bis sie schließlich in den 1960er Jahren nicht mehr aus der Wissenschaft wegzudenken waren. Mit der *Informatik* entstand ein eigenes Fachgebiet zur automatischen Informationsverarbeitung ([Edw96, S. 43-73]). Die neuen Computer ermöglichten beispielsweise komplexe numerische Berechnungen in der Luft- und Raumfahrt, parameterintensive Schlachtsimulationen und eine schnellere Chiffrierung von Nachrichten, wodurch bessere Verschlüsselungsschemata und Angriffe auf dieselben entwickelt werden konnten. Aus der Euphorie der kurzen Rechenzeiten, der immer kleiner werdenden Computer und der zunehmenden Automatisierung entstand schließlich auch der Ansatz der *künstlichen Intelligenz* (kurz: *KI*). Innerhalb weniger Jahre, so dachten einige Forscher_innen, sollten Maschinen mit der menschlichen Intelligenz gleichziehen – eine verlockende Aussicht für staatliche und militärische Geldgeber_innen (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Selbstverständlich fanden die allgemeinen politischen Diskurse auch unter Mathematiker_innen und Informatiker_innen statt – die sozialen Bewegungen der 1960er Jahre ließen diese beiden Fachbereiche nicht unberührt. Doch blieb die kritische wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den gesellschaftlichen Auswirkungen mathematischer und informatischer Forschung eher eine Seltenheit. Ausnahmen bildeten individuelle Entscheidungen wie die von Peter Deuffhard², der bei seiner wissenschaftlichen Tätigkeit klarstellte, dass es mit ihm „keine Rüstungsforschung [...] geben würde“ (vgl. [Deu14]), oder das Wirken des französischen Mathematikers Alexander Grothendieck

²1978 Professor für numerische Mathematik an der Universität Heidelberg und 1984 Gründer des *Zuse-Instituts Berlin*

(vgl. [Sch08]). Grothendieck weigerte sich in den 1960er Jahren, an Konferenzen und an Forschungsvorhaben teilzunehmen, die von militärischen Interessenträger_innen mitfinanziert wurden und blieb aus Protest gegen den sowjetischen Militarismus der Verleihung seiner Fields-Medaille in Moskau fern. Auf Seiten der Informatik tat sich ein wenig mehr als in der Mathematik. Im Jahr 1984 gründete sich das FIFF, das sich seither in zahlreichen Sammelbänden, Zeitschriften und Veranstaltungen für den friedlichen und verantwortungsvollen Einsatz von Informationstechnik „im Dienst einer lebenswerten Welt“ stark macht (vgl. [Str09] und [37]). Und der deutsch-US-amerikanische Informatiker Joseph Weizenbaum lieferte mit seinen Werken *Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft* und *Kurs auf den Eisberg: Die Verantwortung des Einzelnen und die Diktatur der Technik* in den Jahren 1978 und 1987 wichtige Beiträge zum damaligen Technikdiskurs (vgl. [Wei78] und [Wei87]).

Wie schon für Erich Kamke war die Verantwortung der Wissenschaftler_innen auch für die kritischen Mathematiker_innen und Informatiker_innen zwischen 1947 und 1989 ein zentrales Thema. Wer die theoretischen Grundlagen für das Wettrüsten und eine Politik der ständigen militärischen Bedrohung lieferte, sollte sich seines Wirkens und der Folgen zumindest bewusst sein. Während ein Großteil der kritischen Forscher_innen die Machtgebaren von Ost und West vehement ablehnten, war ihr Ziel innerhalb der Wissenschaft vor allem die Förderung der Selbstreflexion von Forscher_innen und eines offenen Diskurses untereinander.

3.3 Heute

„Ich glaube, Geduld ist die stärkste Waffe eines Besiegten, und ich habe sehr viel Geduld. Ich kann warten.“ — *Konrad Adenauer*, Bundeskanzler, 1949

Deutschland war nach dem Zweiten Weltkrieg militärisch, wirtschaftlich und – innerhalb der internationalen Gemeinschaft – auch politisch bedeutungslos. Die damaligen konservativen Politiker_innen in der BRD verwendeten gerne das Wort „besiegt“, was suggerierte, die Deutschen wären den Alliierten in einem Wettstreit unterlegen statt von einem menschenverachtenden Regime befreit worden. Kaum verwunderlich also, dass die bundesdeutschen Regierungen nach dem Zweiten Weltkrieg wieder nach Bedeutung und „Größe“ strebten, zumindest soweit ihnen dies die Verwaltungsmächte gewährten. Die Wiederbewaffnung und die Gründung der Bundeswehr in den 1950er Jahren, der Marshallplan der USA zum wirtschaftlichen Aufbau der BRD und die Vereinigung der beiden deutschen Staaten unter der Flagge der Bundesrepublik im Jahr 1990 wirkten wie Initialzündungen in der erneuten Entwicklung Deutschlands hin zur heutigen militärischen, wirtschaftlichen und politischen Großmacht. Dabei hat sich in allen drei Bereichen seit den 1990er Jahren viel getan.

- Militärisch: Neben einigen humanitären Hilfseinsätzen in den frühen 90er Jahren war es vor allem der Krieg im Kosovo 1999, der die Bundeswehr wieder zur

„Armee im Einsatz“ machte. Seitdem damals der politische Widerstand gegen die ersten deutschen Kampfhandlungen nach Ende des Zweiten Weltkrieges gebrochen wurde, war die Bundeswehr immer häufiger im Auslandseinsatz (vgl. z. B. [38] und [39]). Seien es Missionen mit direkter Kriegsbeteiligung wie im Kosovo, in Afghanistan, in Mali und in Syrien (*OAF*, *OEF*, *MINUSMA* und *Counter Daesh*), zur Ausbildungsunterstützung verbündeter Streit- und Sicherheitskräfte wie in Mali und Somalia (*EUTM Mali* und *EUTM Somalia*), zur Sicherung von Handelsrouten und der Bekämpfung illegalisierter Migration wie in Somalia und im Mittelmeer (*EU NAVFOR Somalia* und *Sea Guardian*) oder zur Abschreckung Russlands wie in Island, in Litauen und dem Baltikum als Ganzes (*Air Policing Island*, *NATO-Battlegroup Lithuania* und *Air Policing Baltikum*). Gut 3600 Soldat_innen sind derzeit an 16 verschiedenen Auslandseinsätzen beteiligt.³

- Wirtschaftlich: Deutschland ist mit der viertgrößten Volkswirtschaft weltweit und dem regelmäßigen Titel „Exportweltmeister“ eines der wirtschaftsstärksten Länder überhaupt. Besonders beliebt sind im internationalen Handel deutsche Produkte aus dem Bereich des Maschinenbaus wie etwa der Automobil- und Rüstungsindustrie (vgl. z. B. [Sta17, S. 426] und [40]). So ist Deutschland beispielsweise weltweit der drittgrößte Waffenexporteur. Begünstigt und ermöglicht werden diese marktwirtschaftlichen Erfolge auch durch eine immer weitere Förderung der Wettbewerbsfähigkeit – den Abbau von Sozialleistungen, Lockerungen im Kündigungsschutz und eine rigorose Privatisierungspolitik. Der Neoliberalismus in der Innenpolitik ist ein wichtiger Faktor für die deutsche Wirtschaftskraft.
- Politisch: Auch in internationalen Zusammenhängen spielt die Bundesrepublik eine bedeutende Rolle. Mit ihrer wirtschaftlichen Größe tritt sie in der EU als eine der führenden Nationen – gerade in der Kreditvergabe an finanzschwächere Länder und deren Saktionierung – auf. Außerdem sichert das vielseitige militärische Engagement Deutschland einen komfortablen Stand innerhalb der NATO. Seit dem NATO-Beitritt im Jahr 1955 hat sich die Bundesrepublik zu einem der aktivsten und wichtigsten Bündnispartner entwickelt.

Selbstverständlich bedingen sich diese Entwicklungen auch gegenseitig: Die vermehrten Kriegseinsätze Deutschlands befeuern die hiesige Rüstungsindustrie; Exporte von Kriegsmaschinerie an verbündete Staaten stärken die deutsche Wirtschaft; die Routen des ausgiebigen deutschen Außenhandels werden militärisch geschützt,⁴ und die militärische und wirtschaftliche Macht der BRD verbessert ihre Position in internationalen Bündnissen.

³Diese Zahlen schwanken selbstverständlich. So waren 2002 beispielsweise mehr als 10000 deutsche Soldat_innen im Auslandseinsatz.

⁴Das bestätigten auch der ehemalige Bundespräsident Horst Köhler (vgl. [41]) und der ehemalige Verteidigungsminister Guttenberg (vgl. [42]).

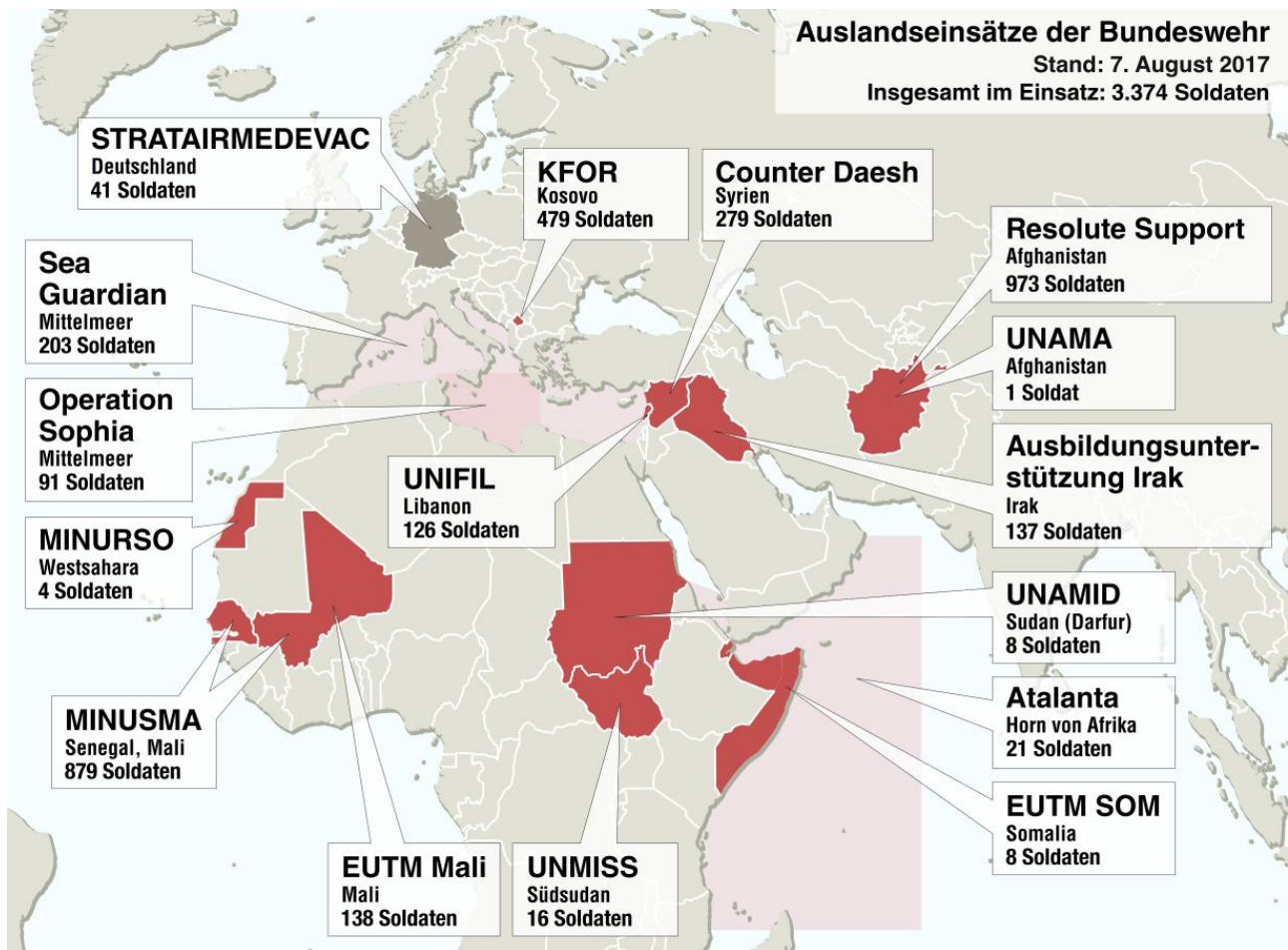


Abbildung 3.3: Auslandseinsätze der Bundeswehr, Stand August 2017.

Seit der NS-Zeit sind deutsche Großmachtbestrebungen – insbesondere militärische – sowohl innerhalb des Landes als auch international ein sehr heikles Thema, das von den Politiker_innen zunehmend taktisch angegangen wird. Mit zurückhaltenden und euphemistischen Formulierungen stellen die politischen Eliten deutsche Großmachtendenzen gegenüber anderen Nationen und der eigenen Bevölkerung als etwas durchweg Positives dar und versuchen keine allzu große Angriffsfläche für Kritik zu bieten. Dieses taktische Vorgehen verschleiert oft die eigentliche Motivation hinter der Bundespolitik und verkompliziert so eine offene Diskussion. Doch hier hilft ein Blick auf die Aussagen der politischen Berater_innen der Bundesregierung. Denn diese lassen meist eine klarere Agenda erkennen als die Politiker_innen selbst. Einer der einflussreichsten deutschen Thinktanks zur Außenpolitik, die *Stiftung Wissenschaft und Politik* (kurz: *SWP*) stellte beispielsweise 2013 die wichtigsten Eckpunkte der deutschen Außen- und Sicherheitspolitik in einer Studie vor (vgl. [SG13]): Mit der „neue[n] Macht“ komme der BRD auch „neue Verantwortung“ zu. Noch sei Deutschland „eine Gestaltungsmacht im Wartestand“, es müsse aber „künftig auch öfter führen“ (ebenda, S. 9). Außerdem mache „Deutschlands Offenheit und Verflechtung in weltweite Handels-, Transport- und Kommunikationsnetzwerke“ das Land „anfällig und verwundbar für alles, was diese

Netzwerke stört. [...] Wenn Deutschland die eigene Lebensweise erhalten und schützen will“, dann „mit allen legitimen Mitteln, die Deutschland zur Verfügung stehen, einschließlich, wo und wenn nötig, den militärischen“ (ebenda, S. 38). Der damalige Außenminister Steinmeier sagte ein Jahr darauf auf der Münchener Sicherheitskonferenz (vgl. [43]): „Deutschland muss bereit sein, sich außen- und sicherheitspolitisch früher, entschiedener und substanzieller einzubringen. [...] Der Einsatz von Militär ist ein äußerstes Mittel. Bei seinem Einsatz bleibt Zurückhaltung geboten. Allerdings darf eine Kultur der Zurückhaltung für Deutschland nicht zu einer Kultur des Heraushaltens werden. Deutschland ist zu groß, um Weltpolitik nur von der Außenlinie zu kommentieren.“ Nach den Terroranschlägen am 13. November 2015 in Paris sprach Bundeskanzlerin Merkel in einem Pressestatement von einem Angriff auf „uns alle“ und kündigte an, dass die europäischen Staaten auch „alle gemeinsam die Antwort geben“ würden (vgl. [44]). Wenige Tage darauf berief sich Frankreich auf die Beistandsklausel des EU-Vertrages: „Im Falle eines bewaffneten Angriffs auf das Hoheitsgebiet eines Mitgliedstaats schulden die anderen Mitgliedstaaten ihm alle in ihrer Macht stehende Hilfe und Unterstützung“ (vgl. [Eur09, Art. 42]). Als vermeintliche Antwort weitete der Bundestag das militärische Engagement beim MINUSMA-Einsatz in Mali aus – eine Aufstockung die allerdings schon Monate vor den Terroranschlägen von Paris im Gespräch war (vgl. [45]).

Bis zur Wiedervereinigung 1990 waren außerparlamentarischer Protest und Widerstand in viele Kleingruppen zerfallen, die eher punktuell auftraten. Vereinigungen der Friedensbewegung, Umweltinitiativen und soziale Bündnisse waren in ihrer Arbeit und ihren Mitgliedern oft regional beschränkt. Gleichzeitig bildeten vor allem *Die Grünen* (später: *Bündnis 90/Die Grünen*) und teilweise auch die *Sozialdemokratische Partei Deutschlands* (kurz: *SPD*) eine nennenswerte parlamentarische Opposition gegenüber den schwarz-gelben Koalitionen der 1990er Jahre unter Helmut Kohl. Mit der rot-grünen Regierung ab 1998 änderte sich dies schlagartig (vgl. [Fau12, S. 122-134] und [46]). 1999 initiierte die Bundesregierung eine deutsche Beteiligung am Kosovokrieg, 2001 – nach einigen hitzigen Debatten – stimmte der Bundestag auch noch der Teilnahme am Krieg in Afghanistan zu. Spätestens mit der 2003 verkündeten *Agenda 2010*, die erhebliche Einschnitte in die Sozialleistungen und eine vermehrte Wirtschaftsförderung vorsah, wurden SPD und Grüne von vielen nicht mehr als „linke“ oder „alternative“ Parteien wahrgenommen. Bei den Bundestagswahlen ab dem Jahr 2005 konnte sich die Partei *Die Linke* als neues parlamentarisches Sprachrohr gegen den zunehmenden Neoliberalismus und Militarismus in der bundesdeutschen und allgemein westlichen Politik etablieren.

Auch außerhalb des Parteienspektrums wurde die Kritik an der neoliberalen Innen- und Außenpolitik, den vermehrten Kriegseinsätzen der Bundeswehr und der immer drastischeren Ausbeutung der Natur lauter. Es gründeten sich Interessensgruppierungen, die bis heute mit ihren Forderungen und großem Rückhalt in der Bevölkerung Einfluss auf die Politik nehmen wollen. So mobilisiert beispielsweise das globalisierungskritische Netzwerk *attac* regelmäßig tausende Menschen zu Aktionen und De-

monstrationen gegen ungerechten Handel, gegen Kriegseinsätze, für den Atomausstieg und vieles mehr (vgl. [47]). Auf themenspezifischen Akademien und Kongressen werden außerdem immer wieder die inhaltlichen Grundpfeiler des Bündnisses diskutiert. Die Plattform *campact* arbeitet noch etwas näher an den politischen Entscheidungsträger_innen und versucht durch Appelle, Unterschriftenlisten, Großdemonstrationen und symbolische Aktionen ihren Forderungen für einen gerechten Welthandel, eine nachhaltige Klimapolitik sowie ein tolerantes und solidarisches Miteinander Ausdruck zu verleihen (vgl. [48]). Eine gewisse Zwischenrolle nehmen dagegen Gruppen der Friedensbewegung wie etwa die *Deutsche Friedensgesellschaft - Vereinigte KriegsdienstgegnerInnen* (kurz: *DFG-VK*) und *Aktion Aufschrei* ein (vgl. [49] und [50]). Auch sie stellen Forderungen an die Bundesregierung, wie etwa den Stopp des Waffenhandels oder die Abschaffung der Bundeswehr. Allerdings versuchen sie gleichzeitig investigativ zu Verflechtungen zwischen Militär und Industrie zu recherchieren oder Bürger_innen zum zivilen Ungehorsam und direkten Aktionen gegen Rüstungskonzerne und Bundeswehr zu bewegen. Neben jenen großen Organisationen existieren in Deutschland auch zahlreiche kleine Bürger_inneninitiativen zum Naturschutz oder gegen die militärische Nutzung öffentlicher Räume. Sie engagieren sich vor allem kommunalpolitisch, was im Vergleich zur bundesweiten Arbeit schneller zu kleinschrittigen Ergebnissen führen kann.

Abseits des Mittels der parlamentarischen Einflussnahme befassen sich Aktivist_innen vor allem mit dem Kampf gegen staatliche Strukturen und dem Aufbau einer alternativen Gesellschaft. So greifen beispielsweise autonome Gruppen immer wieder Einrichtungen oder Fahrzeuge von Staat, Polizei und Militär an, sabotieren Castor-, Kohle- oder Waffentransporte und schaffen sich Freiräume in Form von Kulturzentren oder besetztem Wohnraum (vgl. [51]). Linksradikale Bündnisse wie beispielsweise die *Interventionistische Linke* (vgl. [52]) blockieren dagegen regelmäßig durch spektakuläre Großaktionen und -demonstrationen politische Gegner_innen wie etwa bei Protesten gegen Braunkohleabbau, bei internationalen Gipfeltreffen oder bei Naziaufmärschen. Und die sogenannte *Graswurzelbewegung* setzt sich mit gewaltfreien Mitteln für den Aufbau einer herrschaftslosen, gerechten Gemeinschaft ein (vgl. [53]).

3.3.1 Wissenschaftspolitik in Deutschland

Die deutsche Innen- und Außenpolitik orientiert sich sehr stark an marktwirtschaftlichen Grundsätzen; einer der zentralen Aspekte ist dabei der Wettbewerb. Inländische Unternehmen sollen untereinander konkurrieren, gleichzeitig sollen der deutsche und der europäische Wirtschaftsraum gegenüber internationalen Konzernen immer wettbewerbsfähiger werden. Außerdem hat sich in Deutschland in der jüngeren Vergangenheit ein neuer Schwerpunkt in der Wirtschaftspolitik herausgebildet: Als hochtechnologisiertes und sehr reiches Land setzt die Bundesrepublik vermehrt auf eine Profilierung durch die Bereiche „Innovation“ und „Forschung“. In diesem Zusammenhang wird von Wirtschaft und Politik auch immer wieder ein drohender „Fachkräftemangel“ angemahnt (vgl. [Deu16c]), dem es entgegenzuwirken gilt. All diese Aspekte haben

erheblichen Einfluss auf die hiesige Wissenschaftspolitik und diese wiederum auf die Hochschulen und externen Forschungseinrichtungen.

Viele der politischen Entscheidungen, die für die heutige Entwicklung der deutschen Hochschulen besonders ausschlaggebend waren, wurden um die Jahrtausendwende gefällt. Ein Beispiel hierfür ist der *Bologna-Prozess* seit 1999 (vgl. [54] und [55]). Die Umstellung deutscher Studiengänge von den früheren Diplom- und Magister-Abschlüssen hin zu einem in den USA und Großbritannien üblichen Bachelor/Master-System war hierzulande einer der umstrittensten Punkte der europäischen Bildungsreform. Die im Bachelor weitaus kürzere Studiendauer (sechs Semester) als in den früheren Diplom- und Magister-Studiengängen (neun bis zehn Semester) lässt vermuten, dass Absolvent_innen als Unterstützung für europäische Unternehmen nun früher auf den Arbeitsmarkt gebracht werden sollen. Dieser Verdacht erhärtet sich durch die teilweise enormen Hürden bei der Aufnahme eines Masterstudienganges wie zu erbringende Vorleistungen oder ein gewisser Notendurchschnitt im Bachelorstudium. Ein Jahr nach dem Start des Bologna-Prozesses wurde die Lissabon-Strategie der EU verabschiedet, die vorsah die Union durch Forschung und Innovation innerhalb von zehn Jahren „zum wettbewerbsfähigsten und dynamischsten wissensbasierten Wirtschaftsraum der Welt“ zu machen (vgl. [56]). Als Konsequenz dieses Entschlusses wurde beispielsweise in Deutschland im Jahr 2005 die *Exzellenzinitiative* gestartet, die einzelnen Universitäten und Forschungsbereichen einen Elitestatus und zusätzliche Förderung zuerkannte (vgl. [57]). Der Fokus der Förderentscheidung lag im Sinne der Lissabon-Strategie primär auf der Qualität und der Wirtschaftlichkeit der dort erarbeiteten Forschungsergebnisse und damit immer auf der Wettbewerbstauglichkeit deutscher Hochschulforschung.

Doch nicht nur die Politik, sondern auch die Wirtschaft und die Industrie können Einfluss auf deutsche Hochschulen nehmen. Einer der wichtigsten Mechanismen ist dabei die Finanzierung von Forschungsprojekten und Hochschulstellen. Über sogenannte *Drittmittelkooperationen* haben Unternehmen beispielsweise die Möglichkeit gegen Bezahlung eine Vereinbarung für Auftragsforschung mit staatlich angestellten Wissenschaftler_innen zu schließen. Während Auftraggeber_innen damit der Zugang zu neuesten Forschungsergebnissen ihrer Wahl ermöglicht wird, können die Forscher_innen durch die Drittmittel ihre staatlich bereitgestellten Grundmittel aufstocken, neue Stellen für wissenschaftliches Personal und Doktorand_innen schaffen und ihre Reputation verbessern. Doch war diese Zusammenarbeit zwischen den Hochschulen und der Wirtschaft anfangs noch eine attraktive Option, um die staatliche Grundfinanzierung zu ergänzen, ist sie inzwischen zu einem regelrechten Zwang geworden (vgl. z. B. [Lie15]). Denn für Professor_innenstellen ist die Rate der eingeworbenen Drittmittel längst ein gängiges Einstellungskriterium. Eine weitere Form der Drittmittelkooperation ist eine aus der Wirtschaft finanzierte *Stiftungsprofessur*. Ein Unternehmen bezahlt dabei eine Professor_innenstelle an einer staatlichen Hochschule und sichert sich so den Zugang zu modernsten wissenschaftlichen Erkenntnissen, die eigens auf die Bedürfnisse des Unternehmens zugeschnitten sind. Staatliche Forschungseinrichtungen öffnen sich also immer mehr für privatwirtschaftliche Fragestellungen. Gleichzeitig wird auf die Hochschulen Druck von Seiten der Politik aufgebaut: Seit Jahren sinken

die staatlich bereitgestellten Grundmittel, viele Lehrstühle werden aufgrund fehlender Finanzierung sogar ganz geschlossen. So finden die Geldgeber_innen aus der Wirtschaft mit Auftragsforschung und eigenen Stiftungprofessuren noch viel leichter Anklang. Zusätzlich bleiben in dieser Entwicklung gerade Fachbereiche aus den Geistes-, Kultur- und Sozialwissenschaften hinter den wirtschaftlich bedeutenderen mathematischen, informatischen, naturwissenschaftlichen und technischen Fächern (kurz: *MINT*-Fächern) zurück (vgl. [58]). Die wirtschaftsfreundliche Politik im deutschen Wissenschaftssektor hat damit oft einschneidende Auswirkungen auf Forschungspraxis und Hochschulstruktur.

Neben politischen Entscheidungsträger_innen und den Akteur_innen aus Wirtschaft und Industrie gibt es einige weitere Organisationen, die durch subtilere Interessenspolitik erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der wissenschaftlichen Institutionen in Deutschland haben. Als prominente Beispiele seien an dieser Stelle die *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (kurz: *DFG*) und der *Wissenschaftsrat* genannt. Die *DFG* ist ein staatlich getragener Verein, der Forschungsprojekte in Deutschland und die Vernetzung zwischen Wissenschaftler_innen weltweit fördert. Noch vor Bund und Ländern ist sie die größte Drittmittelgeberin an deutschen Hochschulen (vgl. [59]). Neben der Finanzierung von Grundlagenforschung, die einen großen Teil der Fördermenge ausmacht, „berät [die *DFG*] Parlamente und im öffentlichen Interesse tätige Einrichtungen in wissenschaftlichen Fragen und pflegt die Verbindungen der Forschung zu Gesellschaft und Wirtschaft“ (vgl. [60]). Einen Anreiz für die Annäherung zwischen Hochschulen und Wirtschaft bilden beispielsweise die von der *DFG* finanzierten *Transferprojekte*, die „den Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis in allen wissenschaftlichen Disziplinen“ (vgl. [61]) fördern sollen und oft auch die auf bis zu 12 Jahre angesetzten *Sonderforschungsbereiche*, innerhalb derer „Kooperationen mit außeruniversitären Forschungseinrichtungen [...] ausdrücklich erwünscht“ (vgl. [62]) sind. Der *Wissenschaftsrat* ist dagegen „eines der wichtigsten wissenschaftspolitischen Beratungsgremien in Deutschland“ (vgl. [63]). Als eine zentrale Aufgabe begreift der *Wissenschaftsrat* die „Sicherung der internationalen Konkurrenzfähigkeit der Wissenschaft in Deutschland im nationalen und europäischen Wissenschaftssystem“. So liegt dem Ansatz des Gremiums schon ein Wettbewerbsgedanke zugrunde, der wiederum die Einbettung der Wissenschaft in einen marktwirtschaftlichen Kontext verdeutlicht. Zusammen waren *DFG* und *Wissenschaftsrat* beispielsweise für die Evaluierung der Exzellenzinitiative zuständig. Durch beratende Tätigkeiten und die finanzielle Förderung von Seiten der *DFG* haben beide Institutionen erheblichen Einfluss auf die deutsche Forschungslandschaft.

Die deutsche Forschung wird so also immer weiter für Interessent_innen aus Wirtschaft und Industrie geöffnet, Wissen wird zu einem Gut auf dem Markt, zu „Kapital“. Gerade aus der produzierenden Industrie oder staatlich geförderten Innovationsprogrammen gehen immer mehr Drittmittel und damit Auftragsforschung an die deutschen Hochschulen – allen voran in der Mathematik, der Informatik, den Natur- und den Ingenieurwissenschaften. Dass viele der Forschungsergebnisse dabei direkt oder indirekt militärisch genutzt werden, ist kaum verwunderlich. Zum

einen haben sich das militärische Engagement Deutschlands wieder als legitimes politisches Mittel und Rüstungsexporte als lukrativer Wirtschaftszweig etablieren können. Vor allem für die hochtechnisierten und neuartigen Methoden der modernen Kriegsführung werden ständig aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung benötigt, die mit staatlichen Geldern – beispielsweise des BMVg oder des *Pentagons* – finanziert werden (vgl. z. B. [Deu16a], [Goh16] und [64]). Zum anderen haben viele Unternehmen des produzierenden Gewerbes sowohl zivile als auch militärische Sparten – das eingeworbene Wissen dient anschließend meist beiden Bereichen. Wie schon in der Zeit des Kalten Krieges sind die Ingenieurwissenschaften und die Physik vor allem für die Luft- und Raumfahrt sowie den Waffenbau unabdingbar; Chemiker_innen befassen sich mit der Entwicklung von Treib- und Sprengstoffen. Während die Mathematik und die Informatik nach wie vor für kryptologische Konzepte und zeitaufwändige Bahnberechnungen benötigt werden, sind gerade die zunehmende Computerisierung und Autonomisierung von Militärtechnologie sowie die immer breitere Vernetzung von Einheiten Schlüsselkonzepte der modernen Kriegsführung, die nicht ohne mathematische und informatische Forschung machbar wären. Insgesamt kommt der zunehmende wirtschaftliche Druck auf Wissenschaftler_innen und Hochschulen also ebenso der Platzierung militärischer Fragestellungen in zivilen Forschungseinrichtungen zugute.



Abbildung 3.4: Demonstration zum Bildungsstreik 2009 in Göttingen.

Mit den neoliberalen Reformen der 2000er Jahre in der Wirtschafts-, Sozial-, Arbeits- und Wissenschaftspolitik begannen auch die Kritik und der Protest aus betroffenen Gruppen der Gesellschaft lauter zu werden. Gewerkschaften, linke Parteien, Einzelpersonen des öffentlichen Lebens und kleinere politische Initiativen sprachen sich beispielsweise vehement gegen die Hartz-Reformen der Agenda 2010 aus, gegen die nur befristete oder teilweise ausbleibende Übernahme von Auszubildenden und gegen die zunehmende Leiharbeit (vgl. [65] und [66]). Im Bildungs- und Forschungssektor erreichte der Protest einen Höhepunkt mit dem *Bildungsstreik* im Jahr 2009. Studierende kamen bundesweit zu Großdemonstrationen zusammen, veranstalteten kleinere regionale Kundgebungen und besetzten Hörsäle an vielen Hochschulen. Ihnen schlossen sich teilweise auch wissenschaftliches Personal, Schüler_innen und Auszubildende an und gemeinsam protestierten die Streikenden zum Beispiel gegen die Verschulung der Hochschulbildung im Rahmen des Bologna-Prozesses, die Prekarisierung wissenschaftlichen Personals, die in den 2000er Jahren neu eingeführten *Studiengebühren*, den Einfluss der Wirtschaft auf die Forschung, das neue achtjährige Gymnasium und das dreigliedrige Schulsystem. Die umfassenden neoliberalen Reformen der Bundesregierung waren damals ohnehin ein präsent Thema in der öffentlichen Diskussion und der Presse. Der Bildungsstreik, der sich in seiner Hochphase auch international ausweitete, bekam daher viel mediale Aufmerksamkeit. Dennoch blieben große Bildungs- oder Arbeitsmarktreformen aus, die Befristung wissenschaftlicher Stellen ist nach wie vor Praxis und in den Bachelor- und Master-Studiengängen drohen Höchststudierendauer sowie Orientierungsprüfungen. Einzig die allgemeinen Studiengebühren wurden nach und nach wieder abgeschafft – dabei fielen sie jedoch meist Wechseln in den Landesregierungen zum Opfer, in denen die *Christlich Demokratische Union Deutschlands* (kurz: *CDU*) die Regierungsmehrheit verlor und mussten in Bayern noch 2013 durch ein mühsames Volksbegehren bekämpft werden (vgl. [67]). Inzwischen gibt es in vielen Bundesländern wieder Gebühren für Langzeitstudierende, für das Zweitstudium, berufsbegleitende Studiengänge, Seniorenstudiengänge und neuerdings auch häufiger für Studierende, die nicht aus der EU stammen.

Direkt im Anschluss an den bundesweiten Bildungsstreik entwickelte sich auch ein Diskurs über militärrelevante Forschung an deutschen Hochschulen. Ab dem Jahr 2010 wurde die Idee der *Zivilklausel* (vgl. Abschnitt 3.2) erneut aufgegriffen und es entstand eine regelrechte Bewegung daraus. Bald waren zahlreiche studentische Friedensinitiativen über das ganze Bundesgebiet verteilt (vgl. [BS18]). Auch wissenschaftliche Mitarbeiter_innen, wissenschaftsstützendes Personal und Professor_innen schlossen sich der Bewegung an. Ziel der Hochschulgruppen war es meist, innerhalb der wissenschaftlichen Einrichtungen eine Debatte über die Folgen militärrelevanter Forschung anzustoßen, eine Vernetzung mit städtischen oder bundesweiten Organisationen der Friedensbewegung zu suchen und auf längere Sicht die Verankerung einer Zivilklausel in den Grundordnungen der Hochschulen oder sogar in den Landeshochschulgesetzen anzuregen. Die neuen Zivilklauseln sollten – wie schon ihre Vorgängerinnen in den 1980er Jahren – sicherstellen, dass an den Forschungsinstitutionen „keine Aufträge oder Zuwendungen für rüstungsrelevante Forschung entgegengenommen werden“ (vgl.

[68]). Gegen die Zivilklauseln stellten sich einige Studierende, wirtschaftsliberale und konservative Parteien, einzelne Professor_innen, Wirtschaftsverbände und Universitätsleitungen. Daraus entstand ein lebhafter Diskurs, der in seinen Inhalten und den zentralen Argumenten im Folgenden kurz umrissen werden soll.

Dual-Use

Eines der Hauptargumente der Zivilklausel-Gegner_innen ist die Dual-Use-Problematik: Viele Ergebnisse von Drittmittelprojekten können meist sowohl zivil als auch militärisch genutzt werden. Im Falle von Forschung für das produzierende und das Dienstleistungsgewerbe ist solch eine Doppelnutzung sogar sehr wahrscheinlich, da Betriebe häufig ähnliche zivile und militärische Aufträge bearbeiten. Als Beispiel kann die Entwicklung eines Flugzeugtreibstoffes oder einer Logistik-Software dienen. Manche begreifen eine Zivilklausel daher als umfassendes Forschungsverbot, weil sie davon ausgehen, dass eine solche Doppelnutzung grundsätzlich unterbunden werden soll. So auch Bernhard Kempen, der Präsident des Deutschen Hochschulverbandes (vgl. [21]): „Einige [...] Hochschulen haben ihren Lehrenden und Lernenden eine Verpflichtung zur Friedensförderung auferlegt [...]. Sie unterbinden zugleich jedwede Forschungsaktivität, die militärisch genutzt werden könnte.“ Zusätzlich wird Dual-Use auch häufig in die andere Richtung begriffen und dient als weiteres Argument für rüstungsrelevante Forschung: Auch militärische Technologie kann einem zivilen Nutzen zugeführt werden. Dabei gilt vor allem die Finanzkraft der Geldgeber_innen aus Militär und Rüstungsindustrie als vorteilhaft, da diese oft größere monetäre Risiken bei Förderentscheidungen eingehen als etwa Akteur_innen aus der Privatwirtschaft. Prominente Beispiele für den Rückfluss militärischer Technologie in den zivilen Sektor sind etwa der Sicherheitsgurt oder das Internet.

Auf der anderen Seite sind Zivilklauseln nur selten so konzipiert, dass sie Drittmittelprojekte blockieren können, die eigentlich einem zivilen Nutzen zuarbeiten. Meist wird von den Initiativen versucht, einen primären militärischen Zweck (vgl. z. B. [68] und [69]) von Forschungsvorhaben zu verhindern, was den militärischen Missbrauch einer zivil konzipierten Technologie nie ausschließen kann. Auch das Argument zum gesellschaftlichen Nutzen von Kriegstechnologie weisen Zivilklausel-Befürworter_innen zurück (vgl. [70]): „Ein gezielter Einsatz der gleichen Ressourcen zur Entwicklung von Produktivkraft und Technologie im zivilen Bereich würde sehr viel schneller, produktiver, für die Beteiligten erfreulicher und mit eindeutigem humanen Nutzen Erfolg bringen.“

Gesellschaftliche Werte und rechtliche Aspekte

Ein weiterer Streitpunkt sind die schon in Abschnitt 2.2.1 umrissenen Werte des Friedens und der Wissenschaftsfreiheit. In der Auseinandersetzung um Zivilklauseln werden diesbezüglich vor allem die Ebenen der deutschen Militär- und Wissenschaftspolitik diskutiert.

So sprechen Friedensinitiativen und Recherchegruppen wiederholt von unmenschlichen, völkerrechts- und verfassungswidrigen Einsätzen der Bundeswehr wie beispiels-

weise des Kosovo- und des Afghanistan-Einsatzes. Im Falle des 2015 vom Bundestag beschlossenen Syrien-Einsatzes gingen zudem mehrere Strafanzeigen wegen der *Vorbereitung eines Angriffskrieges* beim Generalbundesanwalt ein, die allerdings 2016 abgewiesen wurden (vgl. [71] und [72]). Auch die Existenzberechtigung der Bundeswehr selbst wird wiederholt in Frage gestellt. Sei es aus pazifistischen Motiven oder weil Kritiker_innen beim Wandel zur „Armee im Einsatz“ eine eindeutige Verletzung des Zwei-Plus-Vier-Vertrages erkennen, der regelt, „daß von deutschem Boden nur Frieden ausgehen“ darf (vgl. [BDF⁺91, Art. 2]). Befürworter_innen der deutschen Militärpolitik stellen sich hinter die Kriegsbeteiligungen der Bundeswehr. Zum einen aus Gründen der westlichen Bündnispolitik und aus Solidarität gegenüber befreundeten Staaten wie etwa beim Afghanistan-Einsatz an der Seite der USA und in Mali zur Unterstützung Frankreichs. Zum anderen sehen viele auch „westliche Werte“ – wie die Demokratie und freie Handelsrouten –, die nationale Sicherheit – wie im Falle von „Anti-Terror-Einsätzen“ – und die Menschenrechte – etwa im Kosovokrieg – durch diese Einsätze verteidigt. Oft verlagert sich die Diskussion um Zivilklauseln und militärrelevante Forschung an deutschen Hochschulen auf diese Themen der Außen- und Verteidigungspolitik.

In den wissenschaftspolitischen Diskussionen geht es vorrangig um die Beurteilung der Forschungsfreiheit. Diese werde als verfassungsmäßiges Recht durch Zivilklauseln eingeschränkt, so die Befürworter_innen von Rüstungsforschung und daher seien diese Selbstverpflichtungen der Hochschulen gesetzeswidrig. Dagegen argumentieren die Friedensinitiativen einerseits, dass es auch notwendige, rechtmäßige Einschränkungen der Forschungsfreiheit geben kann – so etwa das *Embryonenschutzgesetz* (vgl. [Bun91]). Andererseits solle Forschungsfreiheit auch die Freiheit von wirtschaftlichen und militärischen Interessen bedeuten, die durch Drittmittelzwang an den Hochschulen und die großzügige militärische Finanzierung gefährdet würde. Für eine bessere Beurteilung der Sachlage ließen beispielsweise die Hans-Böckler-Stiftung und der *Allgemeine Studierendenausschuss* (kurz: *AStA*) der Universität Kassel externe Rechtsgutachten erstellen, die der Forschungsfreiheit die sogenannte „Friedensfinalität“ des Grundgesetzes gegenüberstellen und schließlich Zivilklauseln als gesetzeskonform bezeichneten (vgl. [Den09] und [Hop12]).

Profilierung und Wirtschaftlichkeit der Hochschule

Auch die Wirtschaftlichkeit der Hochschulen spielt in der Diskussion um Rüstungsforschung eine erhebliche Rolle. Denn die Gegner_innen der Zivilklauseln bangen um die Fördergelder von Staat, Industrie und Wirtschaft. Einerseits würde bei einer solchen Selbstverpflichtung die primär militärische Finanzierung an Hochschulen wegfallen, andererseits könnten Unternehmen aber auch zivile Projekte anderweitig vergeben, da sie die Dual-Use-Problematik fürchten. Insgesamt könnte sich dieser Trend fortsetzen bis die Hochschule als vollständig wirtschaftsfeindlich gilt, was ihr einen bedeutenden Wettbewerbsnachteil beschere würde.

In der Tat stehen viele Mitglieder der studentischen Friedensinitiativen Drittmitteln als wirtschaftlichem Werkzeug grundsätzlich skeptisch gegenüber. Nicht selten

schwenkt daher auch auf der Seite der Zivilklausel-Befürworter_innen eine Diskussion über friedliche Forschung zu einer Grundsatzdebatte über den Einfluss der Privatwirtschaft an deutschen Hochschulen um. Dennoch gehen viele auch auf die vermeintliche Rufschädigung durch Zivilklauseln ein. Es sei durchaus profilbildend, in der jeweiligen Region oft sogar ein Alleinstellungsmerkmal, wenn sich Hochschulen dem Frieden verpflichten würden. Diese klare Positionierung könne regionale und soziale Betriebe anlocken, die Zivilklausel würde dann vielmehr zu einem Standortvorteil (vgl. z. B. [73]).

Transparenz

Die Transparenz von Forschungsergebnissen ist eines der umstrittensten Themen der Zivilklausel-Debatten. Es berührt sowohl die Frage der Wissenschaftsfreiheit als auch die der Wirtschaftlichkeit von Hochschulen, wann und in welchem Rahmen Forschungsergebnisse und -projekte öffentlich gemacht werden müssen. Ein freier Zugang zu wissenschaftlicher Arbeit ist ein hohes Gut – für die interessierte Öffentlichkeit ebenso wie für die Forschungsgemeinde. Der Austausch, die Vernetzung und eine profunde Kenntnis bereits geleisteter Vorarbeit sind Grundpfeiler wissenschaftlichen Wirkens. Doch auch für die Folgenabschätzung und die politische Einordnung von Forschungsprojekten ist das Wissen über deren Inhalte, Geldgeber_innen und Zielsetzung unabdingbar. Dem entgegen stehen die Finanzier_innen aus Industrie, Wirtschaft und staatlichen Einrichtungen, die im Rahmen der von ihnen bezahlten Projekte oft Geheimhaltung fordern. Aus den an öffentlichen Hochschulen erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnissen werden so teilweise wohlgehütete Industrie- und Staatsgeheimnisse.

So sehen die Zivilklausel-Befürworter_innen die Transparenz von Forschungsergebnissen als Voraussetzung für einen öffentlichen Diskurs über deren Folgen (vgl. z. B. [NMH12]). Sie fordern nicht selten – zusätzlich zur friedlichen Selbstverpflichtung – auch einen Transparenz-Passus in die Grundordnung der jeweiligen Hochschule oder in das Landeshochschulgesetz einzufügen, der die Veröffentlichung wissenschaftlicher Arbeit regelt. Die Gegner_innen sprechen sich vehement gegen solche Veröffentlichungszwänge aus. Vor allem weil sie wieder um die Konkurrenzfähigkeit der Hochschulen fürchten: Durch Transparenzverpflichtungen würden „vitale Interessen von Drittmittelgebern massiv beeinträchtigt“ (vgl. [Bre15, S. 14]).

Die politischen Diskussionen der letzten Jahre hatten durchaus auch Auswirkungen auf die Hochschulen und deren Forschungspraxis. Inzwischen haben sich mehr als 60 Hochschulen eine Zivilklausel gegeben und in fünf Hochschulgesetzen steht heute ein entsprechender Passus (vgl. [4]). Dabei reichen die Formulierungen von sehr allgemeinen Bekenntnissen zur Toleranz und einem friedlichen menschlichen Miteinander in den Leitbildern der Hochschulen und Präambeln der Grundordnungen bis hin zu eindeutigen Formulierungen als Passus der Grundordnung, die eine militärische Zielsetzung von Forschungsprojekten verbieten. Zusätzliche Transparenz-Verordnungen wurden in den Hochschulgesetzen Bremens und Nordrhein-Westfalens verankert (vgl. [Han15, §75] und [Min14, §71a]). Dass die reine Festschreibung einer Klausel allerdings

nicht reicht, um militärrelevante Forschung zu unterbinden, ist anhand der aktuellen Verletzungen jener Selbstverpflichtungen erkennbar.⁵ Vielmehr, so der Zivilklausel-Aktivist Dietrich Schulze, bedürfe es einer ständigen Reflexion und Diskussion über Rüstungsforschung innerhalb der Hochschulen und der Gesellschaft – eine Zivilklausel müsse „gelebt“ werden, solle sie erfolgreich sein (vgl. [76]). Raum für einen offenen Diskurs innerhalb der Hochschulen gibt es allerdings wenig, meist stehen Universitätsleitungen geschlossen gegen die Friedensinitiativen. Die Auseinandersetzungen um militärrelevante Forschung finden daher vornehmlich in der Presse oder bei politischen Veranstaltungen statt.

3.3.2 Mathematik und Informatik in der modernen Kriegsführung

Die starke wirtschaftliche Prägung der deutschen Wissenschaftslandschaft ist heute auf allen Ebenen des Forschungsbetriebes sichtbar: Im Wettbewerb zwischen den Hochschulen, unter den Fachbereichen und innerhalb der Fächer. So werben beispielsweise Hochschulen mit MINT-Schwerpunkt oder großer medizinischer Fakultät weit mehr Drittmittel ein als der Durchschnitt. Innerhalb der Forschungseinrichtung haben dann die besonders stark geförderten Fachbereiche – wie eben die MINT-Fächer oder die Medizin – einen besseren Stand und Ruf als die schwächer geförderten – wie etwa die Geistes-, Sozial- und Kulturwissenschaften. Und in den Fachbereichen selbst wiederholt sich das Spiel: Wirtschaftlich verwertbare Forschung bekommt immer mehr Raum in den Fakultäten, während die Grundlagenforschung schrittweise an Bedeutung verliert. Auch in der Mathematik und der Informatik ist diese Entwicklung schon länger zu beobachten. An den Universitäten entstehen neue Lehrstühle für *Technomathematik* oder *Finanzmathematik*, die passgenau auf die Interessen aus Wirtschaft und Industrie zugeschnitten werden. Fächer wie die Analysis, die Algebra oder die Stochastik können nicht mit einem entsprechenden Marktwert auftrumpfen. So gewinnt die angewandte Mathematik an Boden gegenüber ihrer Basis – der „reinen“ Mathematik. Ähnlich verhält es sich auch mit der Informatik: Gerade Teilbereiche der *Technischen Informatik* wie etwa die *eingebetteten Systeme*, *Echtzeitsysteme* oder *autonome Systeme* bekommen aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit oft eigene Lehrstühle – in der *Theoretischen Informatik* wäre die Finanzierung solcher Auskopplungen undenkbar.

Die zunehmende Ökonomisierung des Forschungssektors öffnet deutsche Hochschulen für alle Drittmittelgeber_innen. Abgesehen von der Privatwirtschaft, der Industrie und staatlichen Stellen kann ebenso das Militär Forschungsaufträge an zivile Hochschulen vergeben. Selbstverständlich auch in mathematischen und informatischen Instituten. Und wie in der bisherigen Arbeit bereits häufiger genannt (z. B. in Kapitel 1), finden sich zahlreiche Konzepte aus Informatik und Mathematik in der modernen Kriegsführung wieder. Es kann also festgestellt werden, dass sich an der Bedeutung neuester mathematischer und informatischer Konzepte für die Kriegsführung seit dem Kalten Krieg nicht viel geändert hat. Über die Art der

⁵Vgl. beispielsweise die Anmerkungen zu den Hochschulen in Bonn und der Universität Bremen in den Abschnitten 4.1.4 und 4.3.1 dieser Arbeit sowie die Presseberichte [74] und [75].

Kooperation zwischen Hochschulen und Militär ist hingegen nur wenig bekannt. Die Fragen nach den Formen der Zusammenarbeit und den Wechselwirkungen zwischen mathematischer und informatischer Forschung und der militärischen Anwendung sind daher zentraler Bestandteil der Arbeit und Hauptgegenstand von Kapitel 4.

CC-NM	Non Military
CC-NI	Non Intelligence
CC-CR	Consense Required
CC-Nx	x = Healthcare, Nuclear Plants, Automotive, ...

Abbildung 3.5: Vorschläge für optionale Zusatzklauseln in Open-Source-Lizenzen mit denen Entwickler_innen die Nutzung ihrer Software einschränken können.

Selbstverständlich äußern Mathematiker_innen und Informatiker_innen auch allgemeine Kritik an militärrelevanter Forschung. Gerade in die Debatten um Zivilklauseln waren immer Wissenschaftler_innen und Studierende aller Fachbereiche eingebunden. Im Falle einer fachspezifischen Auseinandersetzung gehen Informatik und Mathematik allerdings stärker auseinander. Denn im Gegensatz zur Mathematik findet in der Informatik zumindest ein Diskurs über die gesellschaftlichen Folgen der Forschung statt. So ist beispielsweise das FIfF nach wie vor als Gruppe kritischer Informatiker_innen an den Universitäten und in der Friedensbewegung aktiv und an einigen deutschen Hochschulen gibt es Seminare und Vorlesungen zum Thema *Informatik und Gesellschaft*, in denen „die ethischen und gesellschaftspolitischen Implikationen verschiedener Bereiche und Anwendungen der Informatik“ behandelt und diskutiert werden (zitiert aus [77], siehe z. B. auch [78] und [79]). Erst 2015 warnten außerdem einige der wichtigsten internationalen KI-Forscher_innen vor der Herstellung autonomer Waffen, da sie befürchten, dass die technologische Entwicklung im Bereich der „künstlichen Intelligenz einen Stand erreicht hat, mit dem der Einsatz solcher Waffen – praktisch, wenn nicht auch rechtlich – in Jahren, nicht erst in Jahrzehnten, möglich ist“⁶ (vgl. [80]). Dieser Schritt würde dann „ein globales Wettrüsten nahezu unausweichlich“⁷ machen. Neben Wissenschaftler_innen diskutieren auch Softwareentwickler_innen und Hacker_innen die militärische Nutzung der Informatik. Immer häufiger wird vom Militär Open-Source-Software verwendet, die aufgrund der Lizenzgebung gut zugänglich und noch

⁶Übersetzung des Autors aus dem Englischen

⁷Übersetzung des Autors aus dem Englischen

dazu kostenlos ist. Dem wollen einige Entwickler_innen entgegensteuern und Open-Source-Lizenzen um eine optionale Zivilklausel erweitern, die den militärischen Einsatz der Software untersagt (siehe Abb. 3.5). In der Community der *GNU General Public License* (kurz: *GNU GPL*) und dem *Chaos Computer Club* (kurz: *CCC*) wird dieser Vorschlag seit einigen Jahren kontrovers diskutiert (vgl. [81]).

Auch wenn die Diskussion um militärrelevante Forschung in der Informatik stattfindet, ist sie – gerechnet auf den gesamten Fachbereich – nicht sehr verbreitet. In der Mathematik fällt die Bilanz noch magerer aus, dort beteiligen sich höchstens Einzelpersonen oder Fachschaften am politischen Diskurs. Eine stetige wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den gesellschaftlichen Implikationen mathematischer Forschung gibt es quasi nicht. Eine der wenigen Ausnahmen stellt die Arbeit des Lehrstuhls *Philosophie und Geschichte der Mathematik* der Universität Siegen dar, an dem unter anderem auch zum Thema *Ethik und Mathematik* geforscht wird (vgl. [82]).

3.4 Mögliche Gründe für die Vernachlässigung des Diskurses innerhalb der Mathematik und der Informatik

Viele der politischen und gesellschaftlichen Entwicklungen seit Ende des Zweiten Weltkrieges haben also einen bis heute sichtbaren Einfluss auf die deutsche Forschungslandschaft – sei es die fehlende Aufarbeitung von NS-Verbrechen in der Nachkriegszeit, die Kämpfe zwischen konservativen und progressiven politischen Kräften während der Zeit des Kalten Krieges oder das heutige deutsche Großmachtstreben. Und jener Mix aus vergangener und aktueller Politik ist es auch, der den momentanen Diskurs um militärrelevante Forschung mitbestimmt; sowohl in der Gesellschaft allgemein als auch innerhalb der einzelnen Hochschulen und Fachbereiche.

Ein wichtiger Faktor in hochschulinternen Diskussionen um Kriegsforschung ist die gesellschaftliche Grundhaltung zu militärischen Auseinandersetzungen, die sich auch in der Wissenschaft widerspiegelt. Die Schrecken des Krieges und der Verlauf aktueller bewaffneter Konflikte haben sich in der deutschen Öffentlichkeit von einer allgegenwärtigen Bedrohung zu einem Randthema entwickelt. Militärische Machtgebaren finden längst nicht mehr vor der eigenen Haustür statt. Zwar ist die Bundeswehr inzwischen in immer mehr Auslandseinsätzen aktiv und auch der Konflikt zwischen Russland und NATO hat sich wieder verschärft; doch diese Konfrontationen finden entweder weit außerhalb der gesellschaftlichen Wahrnehmung wie etwa in Syrien oder in Mali statt oder werden in der Öffentlichkeit als berechtigte Reaktion auf einen militärischen Aggressor dargestellt. Die aktiven antimilitaristischen Gruppen und Friedensinitiativen haben in Deutschland daher oft nicht nur mit der Militärpolitik der Bundesregierung zu kämpfen, sondern auch mit ihrer eigenen Bedeutungslosigkeit. So steht die kritische Auseinandersetzung mit der Militarisierung in Deutschland schon

allgemein auf sehr wackeligen Beinen, der Diskurs um militärrelevante Forschung innerhalb der Mathematik und der Informatik ist da keine Ausnahme.

Eine bedeutende Querverbindung zwischen allgemeinen politischen Entwicklungen und der Forschung ist die deutsche Wissenschaftspolitik. Die immer stärkere Abhängigkeit öffentlicher wissenschaftlicher Institutionen von externen Forschungsgeldern resultiert in einem enormen Druck auf Hochschulforscher_innen und -leitungen, Drittmittel einzuwerben. Gepaart mit der standardmäßigen Befristung wissenschaftlicher Stellen wird ein Klima an den Hochschulen geschaffen, das den Spielraum für gewerkschaftliche oder gar antikapitalistische Kritik mehr und mehr schwinden lässt. So können externe Geldgeber_innen ohne größeren politischen Widerstand an den Hochschulen Auftragsforschung vergeben – seien es beispielsweise Versicherungen in den Wirtschaftswissenschaften, die Pharmaindustrie in der Medizin oder eben Rüstungskonzerne in der Mathematik und der Informatik. Durch diese Forschungspraxis wird aber nicht nur Geldgeber_innen der Zugriff auf staatliche Hochschulen erleichtert – es ändert sich auch die Forschungslandschaft. In der Mathematik und der Informatik gewinnen die angewandten Fachbereiche aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit gegenüber den rein theoretischen an Bedeutung. Und ethische Fragestellungen bezüglich der geleisteten Forschungsarbeit werden immer häufiger als Politikum statt als Teil der Wissenschaft begriffen.

Doch selbst wenn sich Hochschulangehörige zusammenschließen, um eine Reflexion über Drittmittelforschung anzustoßen, stehen sie vor großen Hürden. Zum einen verhindert die oft fehlende Transparenz der Forschungsprojekte eine öffentliche Diskussion über deren Inhalte und Ziele, zum anderen geben sich die Hochschulleitungen und die beteiligten Drittmittelgeber_innen meist große Mühe, erst gar keinen Diskurs aufkommen zu lassen. Die in Abschnitt 3.3.1 bereits genannten Streitpunkte zur Wissenschaftsfreiheit und die Dual-Use-Problematik dienen dabei nicht als offene Diskussionsbeiträge sondern als Totschlagargumente, als letztes Wort. So verlagert sich die Auseinandersetzung um militärrelevante Forschung – unabhängig vom jeweiligen Fachbereich – dann noch weiter aus der Wissenschaft in die Presse, die Öffentlichkeit und die Politik.

Neben den allgemeinen politischen Einflüssen auf die Forschungslandschaft gibt es selbstverständlich auch fachspezifische und -interne Gründe für die Vernachlässigung des Diskurses über militärrelevante Forschung in der Mathematik und der Informatik. Die einfachste Erklärung wäre, dass innerhalb der beiden Fachbereiche schlicht keine militärrelevante Forschung stattfindet. Das ist allerdings aufgrund der zunehmenden Automatisierung und Algorithmisierung der modernen Kriegsführung sowie den dafür benötigten Erkenntnissen aus der Mathematik und der Informatik äußerst unwahrscheinlich. Wie die Verquickung zwischen mathematischer und informatischer Forschung mit der modernen Kriegsführung geartet ist, wird in Kapitel 4 genauer behandelt.

Es dürfte vor allem auch die geschichtliche Entwicklung sein, die den Diskurs innerhalb der beiden Fachbereiche geprägt hat. Wie Abschnitt 3.1 zeigt, gab es nach

dem Zweiten Weltkrieg durchaus Stimmen, die eine Auseinandersetzung mit den ethischen Implikationen mathematischer Forschung befürworteten. Doch die vielen in den Forschungsberufen verbliebenen Günstlinge der Nationalsozialist_innen und eine inkonsequente Entnazifizierungspolitik der Alliierten bereiteten dem ein schnelles Ende. Allein die öffentliche Rezeption von Mathematikern wie Wilhelm Süss, Alwin Walther und Erich Kamke zeigt, wie wenig Bedeutung kritische Selbstreflexion im Vergleich zu fachwissenschaftlichen Errungenschaften in der mathematischen Forschungsgemeinde hatte und bis heute hat. Und auch sonst wird militärrelevante Forschung in Mathematik und Informatik – wie etwa im Operations Research oder der Theorie zur optimalen Steuerung – eher als treibende Kraft, nicht als Streitpunkt angesehen.

Außer der fehlenden Transparenz von Drittmittelprojekten gibt es auch noch andere Faktoren, die eine kritische Analyse der mathematischen und informatischen Forschung erschweren. Die Methoden der modernen Kriegsführung haben sich in den letzten Jahren sehr plötzlich und sprunghaft entwickelt – viele mathematische und informatische Konzepte müssen direkt aus der aktuellen Forschung in die militärische Anwendung geflossen sein. Die Zeit, über militärrelevante Forschung innerhalb der Fachbereiche zu diskutieren und zu reflektieren, ist daher – wenn überhaupt vorhanden – meist äußerst knapp. Zudem sehen sich Mathematiker_innen und Informatiker_innen ausgesprochen oft mit der Dual-Use-Problematik konfrontiert. Gerade bei Aufträgen für die produzierende Industrie (vgl. z. B. Abschnitt 4.3.1), bei IT-Sicherheitskonzernen (vgl. z. B. Abschnitt 4.1.2) oder bei staatlich finanzierten Projekten der zivilen Sicherheitsforschung (vgl. z. B. Abschnitt 4.4.4) ist die Grenze zwischen militärischem und zivilem Zweck fließend. Es ist also häufig unklar, ob die Drittmittelprojekte einem rein zivilen oder auch einem militärischen Zweck dienen, was eine kritische Auseinandersetzung innerhalb der Fachbereiche erheblich erschwert.

Trotz der engen Verwandtschaft beider Fachbereiche unterscheidet sich die Art des Diskurses über militärrelevante Forschung in Mathematik und Informatik merklich voneinander (vgl. Abschnitt 3.3.2). Die Gründe hierfür sind wohl hauptsächlich im Selbstverständnis der Wissenschaftler_innen sowie der Wahrnehmung beider Fächer in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zu suchen. Sowohl bei den einzelnen Forscher_innen als auch gesamtgesellschaftlich wurde die Mathematik oft als sehr theoretische, praxisferne Wissenschaft behandelt, während bei der Informatik schon immer die Anwendung mit im Mittelpunkt stand. Seien es Fortschritte in der Robotik, der künstlichen Intelligenz oder der Datenverarbeitung – stets wurden die neuen Entwicklungen mit großer Skepsis und Vorsicht öffentlich begleitet. Die Angst vor neuen, unberechenbaren Kriegsmaschinen war und ist Teil dieses Prozesses; ganze Regale voll Science-Fiction-Literatur und -Verfilmungen können davon zeugen. Dem gegenüber galt die Mathematik eher als altehrwürdiges Fach, höchstens noch als Hilfswissenschaft, sicher aber nicht als etwas, das die Kriege von morgen bestimmen würde. So mussten Informatiker_innen, im Gegensatz zu Mathematiker_innen, schon früh den gesellschaftlichen Nutzen ihrer Forschung rechtfertigen und waren zur kritischen

Reflexion über ihre Forschung angehalten. Bis heute ist dieser Unterschied im Diskurs um militärrelevante Forschung spürbar.

Kapitel 4 – Verquickung mathematischer und informatischer Forschung mit der modernen Kriegsführung

„All mathematics is divided into three parts: cryptography (paid for by CIA, KGB and the like), hydrodynamics (supported by manufacturers of atomic submarines) and celestial mechanics (financed by military and by other institutions dealing with missiles, such as NASA).“ — *Vladimir Arnold*, russischer Mathematiker (1937-2010)

Selbst für die Zeit des Kalten Krieges wäre diese Beschreibung übertrieben gewesen – die Mathematik hatte schon immer ein starkes Fundament in der universitären Grundlagenforschung und neben den militärischen auch zivile Anwendungen, wie etwa in der Ingenieurtechnik und in der Finanzwirtschaft. Doch ganz unwahr ist Arnolds Aussage auch nicht. Das militärische Interesse an der Mathematik, welches mit den modernen Methoden der Kriegsführung aufkeimte, war zu jener Zeit enorm. Besonders relevant waren dabei die Forschung in der Kryptologie (wie etwa zu neuen Verschlüsselungsschemata oder bisher unbekanntem Angriffen), die Weiterentwicklung von Waffensystemen (wie der Steuerung von Cruise-Missiles), mathematische Arbeit für die Raumfahrt (wie die Flugstabilisierung von Spionagesatelliten) und die Verbesserung der militärischen Planung (wie etwa in Schlachtsimulationen oder der Heereslogistik). Mit den ersten programmierbaren Computern bekam auch die Informatik erhebliche militärische Bedeutung. Zum einen revolutionierte sie die Rechenzeiten für Probleme der Luft- und Raumfahrt, der Schlachtsimulation und der Kryptologie, zum anderen versprachen sich militärische Interessent_innen immer kleinere Computer für hochtechnisierte neue Waffen und schließlich sogar intelligente Systeme. Bis heute wurden die meisten dieser Ansätze der modernen Kriegsführung weiter verfolgt und einige neue kamen hinzu. So sind beispielsweise die militärische Spionage und die technische Weiterentwicklung von Kriegsgerät noch ebenso relevant wie zur Zeit des Kalten Krieges. Gleichzeitig

wurde die Hoffnung auf immer kleinere Computer und zunehmend intelligente Systeme teilweise erfüllt – die Arbeitsfelder der kriegsrelevanten mathematischen und informatischen Forschung wuchsen dabei um die Computerisierung und die immer weitere Automatisierung von militärisch genutzter Technik.

Seit Ende des Kalten Krieges drängen neben den USA und Russland auch die EU-Staaten auf die politische, wissenschaftliche und militärische Weltbühne. Vor allem Deutschland gewinnt in allen drei Bereichen mehr und mehr an Einfluss – sei es in internationalen Bündnisstrukturen, als Vorreiter in den Ingenieurwissenschaften oder durch die Beteiligung der Bundeswehr an NATO- und EU-Einsätzen. Die Situation in Deutschland ist es auch, die Hauptgegenstand dieser Arbeit ist. Denn sie wirft die Fragen auf, wie mathematische und informatische Forschung in Deutschland mit der modernen Kriegsführung in Wechselwirkung stehen und welche Relevanz ein wissenschaftlicher und gesamtgesellschaftlicher Diskurs über die militärrelevante Forschung in Mathematik und Informatik besitzt (vgl. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2). Da diese Themen bisher noch weitgehend unbeforscht sind, wird das vorrangige Ziel der Arbeit ein möglichst umfassender Überblick sein, der als Grundlage und Motivation für weitere wissenschaftliche Analysen dienen kann (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Im Verlauf dieses Kapitels soll abgebildet werden, wie die Mathematik und die Informatik an deutschen zivilen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung verbunden sind. Dabei werden kriegsrelevante mathematische und informatische Forschungsgebiete auf ihre Verquickung mit der militärischen Anwendung untersucht. Besonderer Fokus soll auf den bereits genannten Themenschwerpunkten der modernen Kriegsführung liegen: Spionage und deren Abwehr, technische Weiterentwicklung von militärischem Gerät, Algorithmisierung und Automatisierung. In diesem Sinne werden die Forschungsbereiche *Kryptologie*, *Spieltheorie*, *Technomathematik* (unter anderem *Numerik*, *Optimierung* und *Kontrolltheorie*) und verschiedene Ansätze der *künstlichen Intelligenz* (unter anderem *wissensbasierte Systeme*, *stochastische Systeme* und *maschinelles Lernen*) analysiert. Diese mathematischen und informatischen Teilbereiche haben durch ihre Bedeutung für Verschlüsselungsschemata, für die Automatisierung von Maschinen und Abläufen sowie für die Ingenieurwissenschaften im Allgemeinen potentiell auch einen großen militärischen Nutzen. Die einzelnen Teilgebiete werden in den jeweiligen Unterabschnitten zunächst fachlich in die Mathematik und die Informatik eingeordnet, dann wird ihre Bedeutung für und ihr Bezug zur Kriegsführung – auch historisch – umrissen und schließlich sollen einige konkrete Beispiele aus der Forschung die typischen Formen der Verquickung des Fachbereichs mit der modernen Kriegsführung veranschaulichen.

4.1 Kryptologie

Ein Beispiel: Alice und Bob sind befreundet und Alice will Bob eine private oder geheime Nachricht übermitteln. Beide vermuten, dass sie unter Beobachtung stehen und damit die Nachricht abgefangen werden könnte; die Sicherheit des Kanals der

Kommunikation (beispielsweise Post, Telefon oder E-Mail) kann nicht gewährleistet werden. Sie verständigen sich daher auf ein System zur Ver- und Entschlüsselung von Nachrichten, das ermöglicht, dass Alice ihre Nachricht in einen Geheimentext chiffriert, den Bob mithilfe eines *Schlüssels* entziffern kann.¹ Alice kann nun den unsicheren Kanal der Nachrichtenübermittlung nutzen: Sie schickt einen chiffrierten Brief an Bob. Dieser wird allerdings an der Empfängeradresse von der Angreiferin Eve abgefangen. Sollten Alice und Bob eine sichere Form der Verschlüsselung gewählt haben, wird es Eve nicht gelingen, die Nachricht zu entziffern; das Geheimnis ist also sicher (siehe Abb. 4.1).

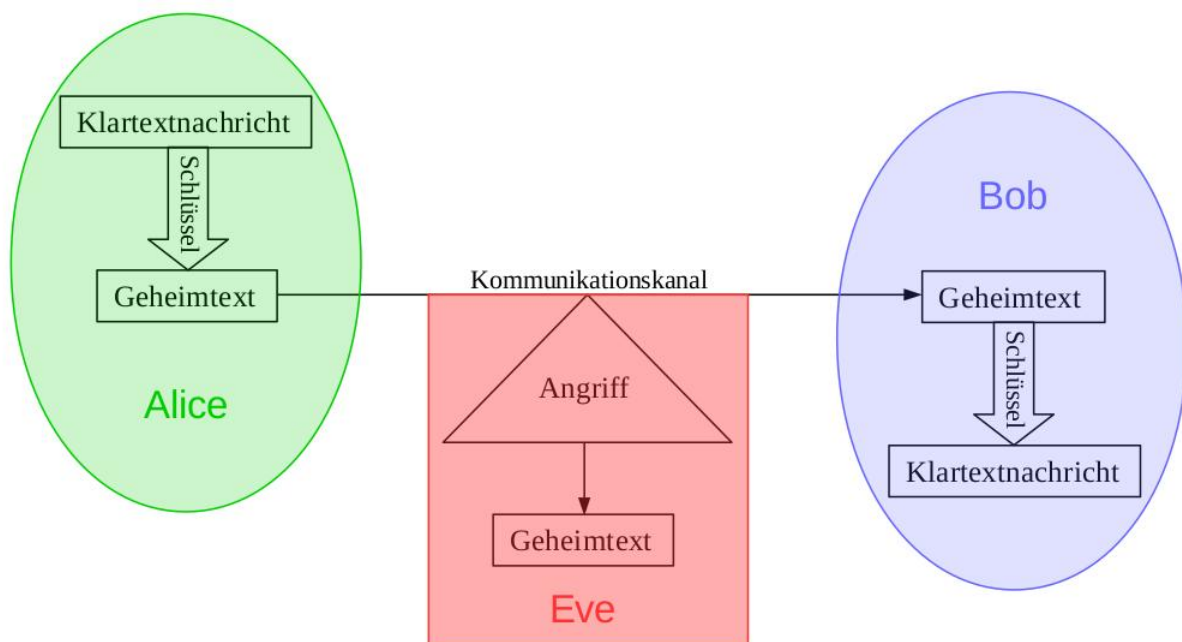


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines symmetrischen Kryptosystems.

In diesem Sinne gilt für jede Form des Umgangs mit sensiblen Daten eine zentrale Prämisse: Was nicht mitgehört und mitgelesen werden soll, wird verschlüsselt. Daher sind Techniken der Verschlüsselung auch in zahlreichen Bereichen des alltäglichen Lebens zu finden: in der privaten Kommunikation, bei bargeldlosen Geldtransfers, bei der Speicherung von personenbezogenen Daten (wie beispielsweise Patient_innenakten) und vielem mehr. Kaum verwunderlich also, dass sich diese Relevanz auch in der Forschungslandschaft widerspiegelt – die Kryptologie ist ein wichtiges Teilgebiet der angewandten Mathematik und der Informatik.

Und ebenso vorstellbar wie der individuelle und zivile Nutzen sicherer Verschlüsselung ist ein staatlicher, wirtschaftspolitischer und militärischer. Die Forschung an neuen Verschlüsselungstechniken wird dabei gepaart mit Angriffen auf bereits etablierte Systeme. Das befähigt zur Abschirmung eigener kritischer Daten und der

¹Die Möglichkeiten zur Wahl eines Verschlüsselungsverfahrens und des Austausches eines Schlüssels sind so unterschiedlich wie zahlreich – die_der Leser_in sei dazu auf die in Abschnitt 4.1.1 genannte Literatur verwiesen.

simultanen Abhörung der gewählten Feind_innen oder Gegner_innen. Im Falle der militärischen Nutzung kryptologischer Konzepte tritt der in Abschnitt 2.1.2 erörterte Informationsvorsprung in den Vordergrund: Nicht selten beeinflusst das Wissen um zukünftige feindliche Aktionen den Ausgang einer Schlacht erheblich.

Was bedeutet diese militärische Verwendbarkeit kryptologischer Konzepte nun im Falle ziviler deutscher Hochschulen? Wie sind hier Kryptologie und moderne Kriegsführung miteinander verquickt? Im Folgenden wird die Kryptologie zunächst als Fachbereich in die Fächer Mathematik und Informatik eingeordnet. Daraufhin werden die Anknüpfungspunkte von militärischen Interessen an die Kryptologie umrissen und schließlich werden die Verbindungen zwischen der kryptologischen Forschung und der modernen Kriegsführung anhand möglichst fachtypischer Beispiele veranschaulicht.

4.1.1 Die Kryptologie in der Mathematik und der Informatik

Fachlich teilt sich die Kryptologie in die Kryptographie, die Forschung zu möglichst sicheren Systemen der Verschlüsselung, und die Kryptoanalyse, die Suche nach erfolgsversprechenden Angriffsschemata und Schwachstellen etablierter Kryptosysteme.² Beide Fachbereiche sind in der Kryptologie allerdings fast untrennbar eng verwoben – mit gutem Grund. Mathematisch lässt sich die Sicherheit eines Kryptosystems nicht beweisen – in endlicher Zeit ist jede Verschlüsselung zu brechen. Mit Hilfe der Kryptoanalyse kann aber verdeutlicht werden, ob dieser endliche Zeitraum für ein Menschenleben realistisch wäre. Das Abwägen, Ausprobieren und die Suche neuer Angriffstaktiken auf Kryptosysteme ist also ein ständiger Legitimationsfaktor für die Güte der Verschlüsselung.

Im Sinne der Abwägung von Sicherheit und Praktikabilität eines Kryptosystems setzt sich die Forschung in der Kryptologie aus der konzeptuellen Ausarbeitung und der konkreten Implementierung eines Verschlüsselungsschemas zusammen. In den aktuell verwendeten Kryptosystemen (wie beispielsweise *AES* oder *RSA*) lässt sich erkennen, dass der theoretische Teil der Kryptologie zum Großteil in der mathematischen Forschung zu verorten ist, während die praktische Umsetzung eher der Informatik obliegt. Zusätzlich ist allerdings auch ein steter fachlicher Austausch zwischen beiden Disziplinen vonnöten; denn was nutzt die sicherste Verschlüsselungstechnik, wenn sie nicht mit einer sinnvollen Rechenzeit arbeitet? Und wer will im Gegenzug ein Kryptosystem verwenden, das zwar überdurchschnittlich schnell Nachrichten verarbeitet, aber dafür leicht zu brechen ist? Diese Verbindung zwischen Theorie und Praxis zeigt auch, warum die Kryptologie nur schwerlich als rein mathematische oder informatische Wissenschaft bezeichnet werden kann – zu stark sind die Abhängigkeiten zwischen Konzept und Umsetzung.

Der Namens- und Definitionsraum kryptologischer Forschung begründet sich weitgehend auf eine mathematisierte Darstellung von Strukturen und Algorithmen zur Ver- und Entschlüsselung von Nachrichten. Dabei sind die verschiedenen Techniken

²Ein Kryptosystem bezeichnet an dieser Stelle ein beliebiges Verschlüsselungsverfahren.

in der Kryptologie so zahlreich wie vielfältig: Es existieren symmetrische (Private-Key) und asymmetrische (Public-Key) Verschlüsselungstechniken, Methoden zum sicheren Schlüsselaustausch, Identifikationsverfahren und vieles mehr. Aber auch kryptoanalytische Angriffe auf gesamte Kryptoverfahren oder auf verwundbare Teile der theoretischen Konzepte nehmen eine zentrale Rolle in der kryptologischen Forschung ein. Die Literatur zur Kryptologie reicht von umfassenden Einführungswerken wie [McA11], [Sti06] und [Swe08] über zahlreiche Konferenzbände wie [Hal09], [SS13], [KH13] und [LLL14] bis hin zur ausführlichen Auseinandersetzung mit spezifischen kryptographischen Anwendungsgebieten wie [RS01], [Ros99] und [BB99].

Während sich die etablierten Kryptosysteme und deren Weiterentwicklung oft zwischen der angewandten Mathematik und der Informatik bewegen, ist die aktuelle Forschung aus der Algebra – genauer dem Forschungsfeld der endlichen Körper – meist die Voraussetzung und der Ursprung neuer Verschlüsselungsverfahren und Angriffe auf diese. Die schon genannten Werke zur Kryptologie werden also von grundlegenden Publikationen über endliche Körper wie [LN97] sowie [Jun93] und mathematisch kryptologischen Abhandlungen wie [Wil08] sowie [KK10] ergänzt. Im Sinne einer Einführung in die Nomenklatur sowie die Aussagen und Errungenschaften der kryptologischen Forschung sei die_ der Leser_in auf die oben genannte Literatur verwiesen.

4.1.2 Kryptologie und Krieg

Schon die Stichworte „Mathematik“ und „Krieg“ verleiten oft zur Assoziation mit der von den Nationalsozialist_innen im Zweiten Weltkrieg genutzten Chiffriermaschine *Enigma* und deren spektakulärer Entschlüsselung durch alliierte Mathematiker_innen in Bletchley Park.



Abbildung 4.2: Skytale mit Lederstreifen.

Und auch sonst ist die Militärgeschichte durchzogen mit der Entwicklung möglichst

sicherer Kryptosysteme und feindlichen Angriffen auf dieselben: der Skytale, die von den Spartanern 404 v. u. Z. benutzt wurde, um Kriegsbotschaften zu übermitteln (vgl. [Bau13b, S. 4-5], siehe Abb. 4.2); der Caesar-Chiffre, mit der der römische Feldherr seine Kommunikation auf dem Schlachtfeld verschlüsselte (vgl. [Bau13b, S. 11-12]); der Nutzung der Vigenère-Chiffre durch die Südstaaten im US-amerikanischen Bürgerkrieg und den erfolgreichen kryptoanalytischen Angriffen der Nordstaaten (vgl. [Kah96, S. 217-218]); der Entschlüsselung des Zimmermann-Telegramms, das zum Kriegseintritt der USA im Ersten Weltkrieg führte (vgl. [Bau13b, S. 185-187]); der kryptoanalytischen Angriffe des US-Militärs auf japanische Militärcodes, die den Kriegsverlauf der 1940er Jahre im Pazifik grundlegend änderte (vgl. [Bau13b, S. 293-311]); und vieles mehr. Zu beachten ist dabei vor allem eine Parallele: Die taktisch relevanten Nachrichten, die innerhalb einer Kriegspartei versandt wurden, sollten so sicher als möglich verschlüsselt sein. Und erfolgreiche feindliche Angriffe auf die verwendete Verschlüsselung veränderten nicht selten den Kriegsverlauf erheblich. Mit der zunehmenden Bedeutung der Kryptographie im zivilen Sektor der Kommunikation gerät oft die Tatsache in den Hintergrund, dass die Kryptologie ein Kind des Krieges ist. Denn die kryptologischen Anwendungen reichten in den ersten Jahrhunderten ihrer Entstehung kaum über die Ver- und Entschlüsselung kriegs- oder staatsrelevanter Nachrichten hinaus.

An der Bedeutung der Kryptologie für die Kriegsführung hat sich selbstverständlich auch in modernen Kriegen nichts geändert. Doch die strenge Klassifizierung und Geheimhaltung von Forschungsergebnissen erschwert einen inhaltlichen Zugang und eine Abschätzung des militärrelevanten Forschungsstandes. Ersten Aufschluss über die militärische Bedeutung der modernen Kryptologie gibt das nationale Interesse an Chiffriertechniken. Allein die NSA dient in ihrer Geschichte und den aktuellen Erkenntnissen über ihr Wirken als exemplarische Stellvertreterin für die zentrale Rolle der Kryptologie im militärischen und wirtschaftlichen Wettstreit zwischen Nationalstaaten (vgl. dazu [Bau13b, S. 342-367] sowie [83]). Die NSA wurde auf Befehl des US-Präsidenten Harry S. Truman im Jahr 1952 unter Geheimhaltung und ohne Rücksprache mit dem Kongress gegründet. Die Gründung des Geheimdienstes war ein Zusammenschluss diverser militärischer Geheimdienste – zunächst zur *Armed Force Security Agency*, dann zur NSA. Zwar blieb die NSA nach wie vor dem US-Verteidigungsministerium unterstellt, doch sollte sie nach Trumans initialer Intention der gesamten US-Regierung dienen – eine Aufgabe, die nach wie vor die Ziele der Behörde bestimmen. Die NSA akquiriert sensible elektronische Kommunikationsdaten, entschlüsselt diese und wertet sie schließlich unter US-amerikanischen militär- und wirtschaftspolitischen Gesichtspunkten aus. Dabei reicht das Spektrum der Arbeitsweise von der kriegsrelevanten über die Wirtschafts- bis zur diplomatischen Spionage – alles im Sinne einer Vormachtstellung der US-amerikanischen Nation. Geschichtlich hat sich allerdings allein die politische Lage, nicht die Zielsetzung der NSA-Arbeit gewandelt: Im Kalten Krieg, dem selbsternannten Kampf gegen den Terrorismus oder der Spionage in „befreundeten“ Staaten – immer war und bleibt das Ziel, mit kryptologischen Mitteln einer militärischen und wirtschaftlichen Überlegenheit der USA zuzuarbeiten.

Auf Unternehmensseite verspricht das taktische Potential der Kryptologie in nationalen Kämpfen enorme Gewinne, verbunden mit einer Günstlingsrolle der Firmen bei diversen Staatsregierungen. Das Vorgehen der IT-Sicherheitskonzerne ist dabei unterschiedlich. Unternehmen wie *Safesoft* (vgl. [84]), *Rohde & Schwarz* (vgl. [85]) und *Utimaco* (vgl. [86]) verkaufen gleichzeitig Verteidigungs- und Angriffsschemata für Kommunikationssysteme. Das ist aus mehreren Gründen wirtschaftlich: Für Sicherheitssoftware und -hardware wird eine genaue Kenntnis der möglichen Angriffe von außen benötigt und umgekehrt stützt sich die Angriffstaktik auf Schwachstellen in Sicherheitssystemen. Da also auf dem Gebiet der IT-Sicherheit ohnehin beide Themen beforscht und entwickelt werden, verspricht der gleichzeitige Vertrieb kryptographischer und kryptoanalytischer Konzepte eine bemerkenswerte Vergrößerung der Gewinnmarge ohne nennenswerten Mehraufwand. Außerdem erhöht das Entwickeln neuer kryptoanalytischer Techniken die Nachfrage an entsprechenden Abwehrsystemen und bessere Sicherheitstechnik verlangt nach innovativeren Angriffsschemata – viele IT-Sicherheitsunternehmen tragen zur Relevanz und Aktualität ihrer Produkte also selbst bei. Andere Konzerne kooperieren schon bei der Entwicklung von Kryptosystemen mit staatlichen Interessent_innen und kompromittieren damit ihre eigenen Produkte. Im Jahr 2013 wurde bekannt, dass *RSA*, eine der renommiertesten IT-Sicherheitsfirmen, eine von der NSA entwickelte Hintertür in ihr *BSAFE*-Toolkit implementierte – der Geheimdienst zahlte dafür 10 Millionen Dollar (vgl. [87] sowie [Fis14]). Die Schwachstelle betraf einen Pseudozufallsgenerator (mit Namen *Dual_EC_DRBG*), der in der *BSAFE*-Bibliothek als Standardverfahren für die Erzeugung möglichst zufälliger Zahlen diente.³ Solche Zufallszahlen werden beispielsweise für den weit verbreiteten Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch verwendet, der, würde er erfolgreich angegriffen, die geheimen Schlüssel der kommunizierenden Parteien und im gleichen Zuge das gesamte Kryptosystem offenlegen würde. Die NSA-Backdoor war dabei so beschaffen, dass der Geheimdienst alle zukünftigen Werte des Zufallsgenerators bestimmen und damit ganze Verschlüsselungssysteme, die sich auf das *BSAFE*-Produkt stützten, brechen konnte. Die Kollaboration zwischen *RSA* und *NSA* hatte nicht nur ein großes Medienecho sondern auch einen lebhaften Diskurs in der kryptologischen Forschungsgemeinde zur Folge. Einige Forscher_innen boykottierten schließlich auch die konzerneigene *RSA Conference* (vgl. dazu [88] und [89]).

Auch in der universitären Forschung zur Kryptologie besteht eine enge Zusammenarbeit zwischen international bekannten Forscher_innen mit Personen und Institutionen aus der Rüstungsindustrie und dem Militär. So zeigt sich die in der Kryptologie einzigartige Selbstverständlichkeit der Kooperation vor allem in der Ausrichtung internationaler Forschungskonferenzen. Teilweise wird das Programmkomitee kryptologischer Konferenzen von Rüstungskonzernen (beispielsweise [Kim12] und [KLK13] von *EADS France*) oder militärischen Forscher_innenzusammenschlüssen (beispielsweise [KLK13] von der chinesischen *University of Defense Technology*) mit besetzt. Das

³Möglichst zufällig deshalb, da ein Computer als physikalisches und daher deterministisches System nie echten Zufall erzeugen kann.

Programmkomitee entscheidet über die thematische Ausrichtung der Konferenz und die Auswahl der angenommenen Paper und wird bei einer solchen Konstellation selbstverständlich auch militärische Interessen einbringen. Und auch unter den Vor- und Beitragenden der Konferenzen finden sich oft Forscher_innen aus Institutionen mit starkem militärischen Bezug wie beispielsweise dem Elektronikkonzern *Rohde und Schwarz* auf [DRS05] oder der US-amerikanischen *Weapon Design Technology Group* mit Sitz in Los Alamos auf [And96]. Die Teilnehmenden der meisten Konferenzen sind verschiedenster Nationalitäten. Und so teilen die Forscher_innen, egal welcher Herkunft, ihr Wissen mit den Zuhörer_innen aus Militär und Rüstungsindustrie. Das nimmt auch Forscher_innen deutscher Universitäten nicht aus, die auf kryptologischen Konferenzen meist sehr zahlreich vertreten sind und Ergebnisse ihrer universitären Forschung direkt an Interessierte aus Militär und Rüstungsindustrie weitergeben. Eine sonst sehr aktive Kooperationspartnerin scheint bei diesem regen Austausch allerdings zunächst zu fehlen: Ein_e Mitarbeiter_in der NSA titulierte im Jahr 1992 bei einem Besuch der *EUROCRYPT* die akademische Forschung in der Kryptologie als für die geheimdienstlichen Interessen irrelevant und uninnovativ (vgl. [NSA94]). Dennoch scheint es weder abwegig noch wäre es verwunderlich, würde die NSA weiterhin die bekannten und renommierten kryptologischen Konferenzen bezüglich des eigenen Nutzens analysieren.

Während die akademische Forschung zur Kryptologie für die NSA immer uninteressanter zu werden schien, keimte ein größeres Interesse an den mathematischen Grundlagen der Kryptosysteme auf.⁴ Schon kurz nach der scheinbaren Abkehr von der akademischen Kryptologie wurden Konferenzen im Forschungsgebiet der endlichen Körper oft von mehreren NSA-Kryptolog_innen und Mitarbeiter_innen von Rüstungskonzernen besucht (wie beispielsweise [CN96] und [MS93]). Teilweise wurde den Geheimdienstmitarbeiter_innen auch die Möglichkeit gegeben, eigene Forschungsfragen in der Gemeinschaft anzuregen (wie beispielsweise J. F. Dillon in [MS93, S. 436-437]). An dieser Form der geheimdienstlich-akademischen Zusammenarbeit hat sich bis heute wenig geändert, wie sich am Beispiel der *International Conference on Finite Fields and Their Applications* erkennen lässt: So wurde die Konferenz im Jahr 2011 von einem Mitarbeiter des Bundesnachrichtendienstes besucht (vgl. [Kom11]), während der NSA-Mitarbeiter J. F. Dillon wie schon in [MS93] auch im Jahr 2009 seine noch offenen Forschungsfragen vorstellen durfte – dieses Mal sogar im Rahmen eines eingeladenen Vortrages (vgl. dazu [MMPS10] und [Kom09]). Neben der direkten Einflussnahme auf mathematische Fachtagungen steht den Interessent_innen aus dem Militär und den Verteidigungsministerien selbstverständlich auch die Auftragsforschung über Drittmittelkooperationen mit den deutschen Universitäten offen. Durch eine kleine Anfrage der Grünen an den sächsischen Landtag wurde bekannt, dass im Auftrag des BMVg an der Universität Leipzig von 2013 bis 2014 eine Studie zur Berechnung des diskreten Logarithmus erstellt wurde (vgl. [Sä13, S. 6] und [Sä15,

⁴Die Verbindung zwischen der reinen Mathematik und der Kryptologie wurde in Form der Forschung zu endlichen Körpern bereits in Abschnitt 4.1.1 genannt.

S. 3]). Die Sicherheit vieler prominenter Kryptoverfahren wie beispielsweise des *Diffie-Hellman-Schlüsselaustauschs*, des *Elgamal-Kryptosystems* oder der *Elliptic Curve Cryptography* beruht auf dem Umstand, dass der diskrete Logarithmus oft nur unter enormem Zeitaufwand zu bestimmen ist. Ein schneller Algorithmus zur Berechnung eines diskreten Logarithmus würde der dem Besitzer_in dieses Wissens (in diesem Fall dem deutschen Verteidigungsministerium) Möglichkeiten zu einer Revolution in der kryptoanalytischen Spionage geben.

Geschichtlich zeichnet sich also für die Kryptologie ein einzigartiges Bild bezüglich der militärischen Kooperation ab: Seit der Geburt des Forschungsfeldes war die militärische Relevanz ein stetiger Begleiter kryptologischer Forschung. Im Weiteren werden die bereits angeklungenen Beispiele zur aktuellen Verquickung zwischen Kryptologie und Krieg weiter vertieft – die Schwerpunkte liegen dabei auf folgenden Aspekten der militärrelevanten Forschung:

1. Militärische Drittmittelkooperationen mit deutschen Universitäten
2. Kriegsrelevante Forschungsprojekte an deutschen Forschungsinstituten mit universitärer Beteiligung
3. Offener Austausch zwischen militärisch und zivil Forschenden auf kryptologischen Fachtagungen
4. Beeinflussung der zivilen Forschungslandschaft durch militärische Interessenträger_innen

4.1.3 Die BMVg-Studie zum diskreten Logarithmus

Die Fragestellung zur Motivation der Logarithmusfunktion gestaltet sich in den reellen Zahlen wie folgt:

Für ein $a \in \mathbb{R}^+$ und ein $b \in \mathbb{R}^+$ finde $x \in \mathbb{R}$, sodass gilt: $b^x = a$.

In Funktionenschreibweise ergibt das: $\log_b a = x$.

Eine reelle Logarithmusfunktion ist mithilfe eines Computers oder händisch in beliebiger Annäherung numerisch lösbar. Auf der Grundlage des reellen Logarithmus lässt sich eine analoge Problemstellung für endliche zyklische Gruppen formulieren – der *diskrete Logarithmus*. Das Konzept einer *endlichen zyklischen Gruppe* ist dem algebraischen Forschungsgebiet der Gruppentheorie entnommen (vgl. [LN97, S. 2-11]); sie bezeichnet eine endliche Menge G , die mit einer Verknüpfung \circ die allgemeinen Gruppeneigenschaften erfüllt und aus einem Element $g \in G$ der Gruppe zyklisch erzeugt werden kann.⁵ Die Eigenschaft der Zyklizität motiviert auch die Schreibweise $G = \langle g \rangle$. Als Analogon des Logarithmus in den reellen Zahlen wird die Fragestellung,

⁵Das heißt genauer: $G = \{g^0, g^1, g^2, \dots, g^{|G|-1}\}$

die den diskreten Logarithmus in der endlichen zyklischen Gruppe $G = \langle g \rangle$ definiert, zu (vgl. [Jun93, S. 84]):

Für $a \in G$ finde $x \in \{0, 1, \dots, |G| - 1\}$, sodass gilt: $g^x = a$.

Oder als Funktion: $\log_g a = x$.

Im Gegensatz zum reellen Logarithmus ist der diskrete allerdings für große Gruppen G keinesfalls mühelos zu berechnen.

Auf dieser Komplexität der Berechnung fußt die Sicherheit vieler moderner Kryptosysteme – ein Umstand, der im Folgenden am Beispiel des weit verbreiteten Diffie-Hellman-Schlüsselaustauschs verdeutlicht werden soll. Für eine geheime Kommunikation zwischen zwei Personen mittels eines symmetrischen Kryptosystems gilt es, sich zunächst auf einen gemeinsamen Schlüssel zu einigen, mit dem die Nachrichten verschlüsselt werden können. Da aber Nachrichtenkanäle (E-Mail, Post, Chat, usw.) oft abhörbar sind, muss eine sichere Methode zum Schlüsselaustausch über jene Kommunikationswege gefunden werden. Der Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch nutzt die diskrete Exponentialfunktion als sogenannte *Einwegfunktion*, also eine Funktion deren Umkehrfunktion – der diskrete Logarithmus – nur unter enormem Rechenaufwand zu lösen ist. Die algorithmische Schreibweise des Austauschverfahrens verdeutlicht die zentrale Voraussetzung einer Unberechenbarkeit der diskreten Logarithmusfunktion (vgl. [Sti06, S. 430]):

1. Alice und Bob wollen einen gemeinsamen Schlüssel finden. Sie einigen sich zunächst öffentlich auf eine zyklische Gruppe G mit primärer Ordnung p und Erzeuger g .
2. Beide wählen eine geheime Zufallszahl a bzw. b aus $\{1, 2, \dots, p - 1\}$.
3. Alice berechnet $A = g^a$ und schickt das Ergebnis an Bob.
4. Bob berechnet $B = g^b$ und schickt das Ergebnis an Alice.
5. Alice berechnet $K = B^a$, Bob berechnet $K = A^b$. Beide besitzen nun den gemeinsamen Schlüssel K zur weiteren Verwendung in der verschlüsselten Kommunikation.

Schnell wird ersichtlich, warum die Berechenbarkeit des diskreten Logarithmus sicherheitskritisch ist: Könnte die Angreiferin Eve in sinnvoller Rechenzeit den diskreten Logarithmus $a = \log_g A$ (bzw. $b = \log_g B$) berechnen, so könnte auch sie mittels $K = B^a$ (bzw. $K = A^b$) den gemeinsamen Schlüssel von Alice und Bob berechnen.

An dieser Stelle knüpft auch die Fragestellung des Bundesministeriums der Verteidigung an, von dem die Universität Leipzig 2013 mit einer Studie zu den „Möglichkeiten und Grenzen der Berechnung des diskreten Logarithmus“ (vgl. [Sä13, S. 6]) beauftragt wurde. Das militärische Interesse an der Berechenbarkeit einer Funktion, mit der die Sicherheit ganzer Kryptosysteme steht und fällt, ist denkbar vielseitig begründet:

Einerseits bietet sie Ansatzpunkte für kryptologische Angriffe auf feindliche Kommunikationsstrukturen in deutschen Kriegseinsätzen oder auf andere selbstgewählte Ziele außerhalb kriegerischer Handlungen wie Privatpersonen, Staaten oder Unternehmen. Andererseits gibt eine solche Analyse Aufschluss über die derzeitige und zukünftige Sicherheit der eigenen Kryptosysteme, mit denen die Kommunikation in ebendiesen Kriegen verschlüsselt wird. Die Auslagerung einer solchen Studie in ein universitäres Forschungsprojekt scheint sinnvoll: Das Thema des diskreten Logarithmus entstammt direkt der theoretischen algebraischen Forschung. Die Leipziger Forscher_innen können daher nicht nur ihre eigenen aktuellen Forschungsergebnisse, sondern die der internationalen Forschungsgemeinschaft abbilden, was meist auch die Erkenntnisse von Forscher_innen der Länder umfasst, die potentielle deutsche Angriffsziele wären. Die in Leipzig beauftragten Forscher_innen können dabei mit Geheimhaltungsklauseln zur Verschwiegenheit verpflichtet werden, was einen für das Verteidigungsministerium bedenkenlosen Austausch innerhalb des Forschungsprojekts und damit eine auftragspezifische Bearbeitung desselben ermöglicht. Außerdem hilft die fertige Studie dem Verteidigungsministerium bei der Bewertung des Potentials militärisch-akademischer Zusammenarbeit und damit bei der Auswahl zukünftiger Themen für kryptologische Forschungsprojekte.

Die Ergebnisse der Studie selbst sind weder öffentlich zugänglich noch wird die Kooperation mit dem BMVg von Universitätsseite benannt. Der aktuelle Forschungsstand zur Berechenbarkeit des diskreten Logarithmus ist allerdings problemlos abzubilden und auf seine Relevanz für die moderne Kriegsführung prüfbar. Dabei scheint es sinnvoll, zwischen der rein mathematischen Komponente des diskreten Logarithmusproblems und der konkreten Implementierung der diskreten Exponentialfunktion in aktuellen Kryptosystemen zu unterscheiden. Die theoretische mathematische Analyse des diskreten Logarithmusproblems ist ein rege bearbeitetes Teilgebiet der algebraischen Forschung. Zu den prominentesten Algorithmen der Bestimmung eines diskreten Logarithmus zählen das *Zahlkörpersieb* (vgl. [LL93, S. 11-42]), der *Babystep-Giantstep-Algorithmus* (vgl. [Swe08, S. 82-83]), der *Pohlig-Hellman-Algorithmus* und der *Index-Calculus-Algorithmus* (vgl. [Sti06, S. 241-246]). Doch obwohl diese Ansätze augenscheinlich zunächst erhebliche Vorteile gegenüber der reinen Brute-Force-Methode bieten, sind sie bei den Größen der zyklischen Gruppen, wie sie auch in der modernen Kryptographie verwendet werden, faktisch wirkungslos. Die Sicherheit eines Kryptosystems hängt allerdings nicht nur von der mathematischen Unberechenbarkeit des diskreten Logarithmus ab, sondern auch von möglichen Schwachstellen der zugrunde liegenden zyklischen Gruppen und der jeweiligen Implementierung des Verschlüsselungsalgorithmus. Während die aktuellen Fortschritte in der algorithmischen Bestimmung des diskreten Logarithmus vernachlässigbar sind, wächst der Erkenntnisstand zur Angreifbarkeit konkreter Implementierungen gewisser Kryptosysteme stetig. Die so erforschten Angriffe auf spezifische Implementierungen sind zahlreich; es sollen daher an dieser Stelle einige ausgewählte aktuelle Angriffsschemata genannt werden, die die Gründe für das momentane militärische Interesse an den diskreten Logarithmen verdeutlichen.

Einige der neuesten Angriffsschemata auf etablierte Kryptosysteme beziehen sich auf die vergleichsweise junge *Elliptic Curve Cryptography* (kurz *ECC*). Dabei ist die konzeptuelle Idee der *ECC*, eine elliptische Kurve für die grundlegende zyklische Gruppe eines Kryptosystems zu wählen (vgl. [Sti06, S. 254-267]). Auf jener elliptischen Kurve wird dabei eine Gruppenstruktur definiert, die den enormen Rechenaufwand zur Bestimmung eines diskreten Logarithmus erhalten soll, während die Länge der verwendeten Schlüssel kürzer und die damit benötigte Speicherkapazität geringer wird. Gravierende Fehler in der Implementierung der *ECC*-Kryptosysteme wären zwar vermeidbar, sind allerdings keinesfalls immer offensichtlich – oft werden unsichere Algorithmen erst in tiefgreifenden mathematischen oder informatischen Forschungsprojekten aufgedeckt. Ein Beispiel für die Ausnutzung einer unzureichenden Implementierung sind sogenannte *Seitenkanalattacken* (vgl. [BT11]): Ein_e Angreifer_in kann bei einem *ECC*-System häufig schon über die Rechenzeit einer Verschlüsselung Informationen über den verwendeten Schlüssel gewinnen. Dies hängt mit dem sich signifikant ändernden Berechnungsaufwand für unterschiedliche Rechenoperationen auf der elliptischen Kurve zusammen. Zwar kann die Gefahr eines solchen Angriffes algorithmisch gebannt werden, doch muss das Problem dazu zunächst von der_dem Anwender_in erkannt werden, was oft erst nach erfolgreichen Angriffen der Fall ist. Ein weiteres Beispiel für eine Schwachstelle in der Implementierung eines *ECC*-Systems ist die Verwendung von unsicheren elliptischen Kurven, wie sie umfangreich in der Dokumentation der Kryptolog_innen Daniel J. Bernstein und Tanja Lange beschrieben werden (vgl. [90]). Diese Form der Angreifbarkeit wurde in der transnationalen Forschungsgemeinschaft vor allem in Bezug auf Kryptostandards, die maßgeblich von der NSA beeinflusst wurden, diskutiert und soll in Abschnitt 4.1.6 ausführlicher thematisiert werden.

Im Oktober 2015 stellten einige Kryptolog_innen auf der *Conference on Computer and Communications Security* einen Angriff auf eine weit verbreitete Implementierung des Diffie-Hellman-Schlüsselaustauschs (namens *DHE_EXPORT*) vor – die *Logjam-Attacke* (vgl. [ABD⁺15]). Es gelang ihnen, durch Vorberechnungen mittels eines Zahlkörpersiebs für eine in den Implementierungen wiederholt und viel verwendete zyklische Gruppe mit der Ordnung einer 512-Bit Primzahl, das diskrete Logarithmusproblem weitgehend zu beseitigen. Damit konnten einige verschlüsselte Verbindungen kompromittiert werden, die das *Transport Layer Security* (kurz: *TLS*) Protokoll nutzen. Diese Vorberechnungen für eine viel verwendete 512-Bit Primzahl ermöglichten es bereits, die Kommunikation mit 7% der eine Million meist besuchten HTTPS-Homepages offen zu legen. Im Sinne einer weiteren Folgenabschätzung sprechen die Autor_innen des Papers auch von *Logjam*-Attacken auf die zwei am häufigsten genutzten 1024-Bit Primzahlen. Aufgrund des erheblichen Rechenaufwands mit einem Zahlkörpersieb für diese Größenordnung kommen für solcherlei Angriffe nur staatliche und geheimdienstliche Institutionen in Frage. Die Analyse geleakter NSA-Dokumente legt nahe, dass der amerikanische Geheimdienst diese Aufgabe bereits bewältigt hat, was bedeuten würde, dass die NSA Zugriff auf die verschlüsselte Kommunikation via 66% aller IPsec-VPNs und 26% der SSH-Server hätte. Aus diesem Grund empfehlen die Forscher_innen

die Nutzung von 2048-Bit Primzahlen oder den Übergang zu einem Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch auf der Basis von elliptischen Kurven (kurz: *ECDH*).⁶

Insgesamt zeichnet sich also eine erhebliche militärische und geheimdienstliche Relevanz einer Studie zur Berechenbarkeit des diskreten Logarithmus ab. Die vom BMVg verwendbaren Informationen sind dabei vielseitig:

1. Eine sichere Verschlüsselung unter Verwendung der diskreten Exponentialfunktion als Einwegfunktion ist möglich, solange Schwachstellen in der Implementierung der Kryptosysteme vermieden werden.
2. Angriffe von deutscher Seite auf zivile und militärische Verschlüsselung sind bei ausreichender Rechenleistung möglich und damit militärisch, geheimdienstlich oder anderweitig polizeilich nutzbar. Ein für die moderne Kriegsführung oft äußerst wichtiger Informationsvorsprung gegenüber feindlichen Kriegsparteien scheint damit realistisch.
3. Andere nationalstaatliche Akteure, wie beispielsweise die NSA, nutzen diese Angriffsmöglichkeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits.
4. Eine Kooperation mit Wissenschaftler_innen an deutschen Universitäten verspricht oft einen großen Erkenntnisgewinn. Die Geheimhaltung der Forschungsergebnisse ist dabei aus einem nationalstaatlichen Blickwinkel sinnvoll.

4.1.4 Entwicklung eines Kommunikationssystems für den Militäreinsatz am FKIE

Weitaus offener als im universitären Kontext wird Kriegsforschung an externen Forschungseinrichtungen kommuniziert. Institute zur Förderung angewandter Forschung – wie beispielsweise die Fraunhofer- oder Leibnitz-Institute – verstehen sich meist als Dienstleister_innen für Staat, Militär, Industrie und Wirtschaft, in deren Kreisen sie Forschungsergebnisse als Produkte vermarkten und vertreiben. Allerdings überschneidet sich nicht selten die personale Besetzung eines Instituts stark mit nahegelegenen Hochschulen – viele Projekte überlagern sich in die staatlich finanzierte Bildungseinrichtung und die Forschungsinhalte werden von den Lehrstuhlinhaber_innen zur Weiterbearbeitung an wissenschaftliche Mitarbeiter_innen und Studierende herangetragen. So wird auch eine unproblematisierte Form der Rüstungsforschung an deutschen Forschungseinrichtungen möglich, die Mitglieder der Hochschulen mit einbezieht und einen Verweis auf den außeruniversitären Charakter der Projekte bei kritischen Nachfragen über kriegsrelevante Forschung zulässt.

Kryptologisch relevant ist in diesem Sinne beispielsweise die Zusammenarbeit zwischen der Arbeitsgruppe *Cyber Analysis and Defense* des *Fraunhofer-Instituts für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie* (kurz: *FKIE*) mit Sitz

⁶Wobei bei der Nutzung von elliptischen Kurven ebenso auf eine fehlerfreie Implementierung zu achten ist, wie die obenstehenden Ergebnisse zeigen.

in Wachtberg-Werthhoven und den Hochschulen in Bonn.⁷ Das FKIE war bis zu seiner Eingliederung in die Fraunhofer Gesellschaft im Jahr 2009 ein Institut der *Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften* (kurz: *FGAN*), das ausschließlich Wehr- und Sicherheitsforschung betrieb.⁸ Inzwischen finden sich große Teile der Angestellten des FKIE und dessen Institutsleitung in der Personalstruktur des Instituts Informatik 4 der Universität Bonn und auch inhaltlich entsprechen sich einige Forschungsbereiche der beiden Einrichtungen (vgl. [91], [92] sowie [93]). Kriegsrelevante Forschungsergebnisse werden über das FKIE beworben, wie beispielsweise regelmäßig auf der stark militärisch geprägten Fachausstellung des *Anwenderforums für Fernmeldetechnik, Computer, Elektronik und Automatisierung* (kurz: *AFCEA*) – im Jahr 2015 unter dem Motto „IT ”organisiert“ – Bundeswehr und Behörden in der digitalen Welt“ (vgl. [94] und [95]).



Abbildung 4.3: Gemeinsames Hinweisschild zum Institut für Informatik der Universität Bonn und dem Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie.

Eines der laufenden kryptologisch orientierten Projekte am FKIE ist die Entwicklung eines Systems für den „sicheren Informationsaustausch zwischen militärischen

⁷Beide Bonner Hochschulen besitzen eine seit 2015 in der jeweiligen Grundordnung verankerte Zivilklausel.

⁸Für eine detaillierte Darstellung jener Eingliederung inklusive der politischen Implikationen vergleiche auch Abschnitt 4.4.3.

Einheiten“ in der „vernetzten Operationsführung“ namens *IDP / MIKE* (vgl. [96]). Die Zusammenarbeit zwischen dem FKIE und den Bonner Hochschulen wird hierbei nicht öffentlich benannt, sie findet sich aber thematisch in mehreren studentischen Abschlussarbeiten wieder (vgl. [97], [98] und [99]).

Das Ziel des IDP-MIKE-Systems ist es, ein *Virtual Private Network* (kurz: *VPN*) zu implementieren, das in militärischen Einsatzszenarien eine fehlerresistente und dynamische private Kommunikation innerhalb einer Kriegspartei ermöglicht. Ursprünglich bildet ein VPN – wie schon der Name sagt – ein privates Netzwerk für ausgewählte Kommunikationspartner_innen, die sich in einem offenen oder unsicheren Netzwerk (z. B. im Internet oder einem öffentlichen lokalen Netzwerk) befinden. Innerhalb des VPN kann schnell und zuverlässig kommuniziert werden, nach außen wird die Kommunikation verschlüsselt. Herkömmliche VPNs fußen meist auf der Annahme eines während der Kommunikation feststehenden Rechners ohne plötzliche Verbindungsabbrüche und der Eigeninitiative der einzelnen Nutzer_innen beim Kommunikationsaufbau. Beide Voraussetzungen sind in Kriegsszenarien nicht immer erfüllbar, der taktische Mehrwert eines VPNs zwischen den militärischen Einheiten wäre allerdings unbestreitbar. Daher stehen bei der Entwicklung der IDP-MIKE-Software drei wünschenswerte Eigenschaften im Mittelpunkt:

- Das VPN soll von fachfremden Nutzer_innen (z. B. Soldat_innen)
- „unter schwierigen Einsatzbedingungen“ (z. B. Krieg)
- möglichst wartungsfrei verwendbar sein (vgl. [96]).

Für die Softwarelösung bedeutet das konkret, dass netzwerkfähige Geräte innerhalb einer Kriegspartei sich selbstständig erkennen, miteinander verbinden und bei einem Netzwerkausfall erneut die Kommunikation aufbauen können – insgesamt also eine mobile, dynamische VPN-Lösung. Das fertige Programm stützt sich auf die Verwendung des weit verbreiteten Sicherheitsschemas *IPSec*, das es zwei Kommunikationspartner_innen ermöglicht, sich zunächst gegenseitig zu identifizieren und den anschließenden Datenaustausch zu verschlüsseln. Die automatische Erkennung von passenden VPNs übernimmt das *IPSec-Discovery-Protocol* (kurz: *IDP*), das die den Nutzer_in mit einem bestehenden privaten Netzwerk in Verbindung setzt. Jenseits der direkten Netzwerkarchitektur arbeitet die Schlüsselverwaltung *Multicast Internet Key Exchange* (kurz: *MIKE*), die bei neuen Kommunikationsteilnehmer_innen oder Verbindungsabbrüchen vom Programm für die Verteilung von Schlüsseln angesteuert werden kann.

Tests zur Praktikabilität des IDP-MIKE-Systems wurden auf dem Kommunikationsserver *QUAKSBw* durchgeführt, der ein Bindeglied zwischen Sprach- und datenbasierter Kommunikation sowie den Fernmeldemitteln der Bundeswehr darstellt (vgl. [97] und [War09]). Schließlich wurde IDP / MIKE auch auf der Rüstungsmesse der AFCEA vorgestellt und als militärische Kommunikationslösung beworben. Insgesamt lässt sich also mithilfe des VPN-Systems am FKIE ein Weg kryptologischer Methoden

und Forschungsansätze von einem externen Institut über die universitäre Forschungslandschaft in die deutsche Kriegsplanung nachvollziehen.

4.1.5 Die Präsenz der NSA auf der *International Conference on Finite Fields and Their Applications 2009*

Neben der direkten Beeinflussung akademischer Forschungsthemen durch Drittmittelkooperationen steht militärischen und geheimdienstlichen Akteur_innen auch der Besuch von internationalen Konferenzen zu den endlichen Körpern offen. Kritische Stimmen aus der mathematischen Forschungsgemeinschaft sind dabei ob der historischen Verquickung zwischen Kryptologie und Militär kaum zu vernehmen. Gerade bei der Suche nach neuen Kooperationsmöglichkeiten bieten die mathematischen Konferenzen einen umfassenden Überblick in die aktuell beforschten Themengebiete. Die Präsenz von Militär und Geheimdiensten reicht dabei von einer bloßen passiven Teilnahme bis hin zur Präsentation der eigenen offenen Forschungsfragen und damit dem Einbringen der militärischen und staatlichen Interessen in die internationale Forschungsgemeinschaft. Diese Form der militärisch-akademischen Zusammenarbeit soll am Beispiel des NSA-Mathematikers J. F. Dillon auf der *International Conference on Finite Fields and Their Applications* im Jahr 2009 (kurz: Fq9) näher ausgeführt werden. Dillon wurde vom Programmkomitee der Fq9 eingeladen, um über seinen Erkenntnisstand zur Existenz von *APN-Polynomen* zu referieren (vgl. dazu [Kom09]). Ein APN-Polynom ist dabei wie folgt definiert (vgl. [KMP15, S. 71]):

Ein *APN-Polynom* ist eine Funktion $f : \mathbb{F}_{2^m} \mapsto \mathbb{F}_{2^m}$, für die gilt: $\forall a, b \in \mathbb{F}_{2^m}$ mit $a \neq 0$ existieren höchstens zwei Lösungen der Gleichung $f(x+a) + f(x) = b$.

Der Nutzen von APN-Polynomen in der Kryptographie besteht vor allem in ihrer Robustheit gegenüber kryptoanalytischen Angriffen. Wird ein APN-Polynom in einem symmetrischen Kryptosystem zur Erzeugung einer *Substitution Box* (kurz: *S-Box*) verwendet, so garantiert es besondere Sicherheit gegen die Differenzielle Kryptoanalyse (vgl. [KMP15, S. 71] und [Rod13]). Dillon stellte in seinem Vortrag die Akquise neuer Erkenntnisse mit einer abschließenden Frage an die Forschungsgemeinde über die Existenz von APN-Polynomen vor (vgl. [Dil09]). Die Sicherheit von Kryptosystemen gegenüber der Differenziellen Kryptoanalyse spielt in der Forschung der NSA-Forscher_innen seit der Implementierung des *Data Encryption Standard* eine zentrale Rolle. Schon im Jahr 1974 legte die NSA dem Unternehmen *IBM* nahe, den diesbezüglichen Entwicklungsstand unveröffentlicht zu lassen, was erst im Jahr 1994 bekannt wurde (vgl. [Cop94]). Die Nutzung des exklusiven Wissens über die Angreifbarkeit und Sicherheit von Kryptosystemen für die moderne Kriegsführung ist leicht nachvollziehbar: Während die NSA selbst sichere Kryptostandards verwendet, können die neu entdeckten Angriffsschemata für eine Kryptoanalyse der feindlichen militärischen Kommunikation genutzt werden. Bis heute hat sich an dieser Praxis

nur wenig geändert – zu groß ist scheinbar der kalkulierte Nutzen von Hintertüren in aktuellen Verschlüsselungsschemata für den Geheimdienst. Dabei beschränkt sich die Beteiligung der NSA allerdings nicht nur auf Verschwiegenheit bei neuen kryptologischen Forschungserkenntnissen, sondern auch auf die Distribution kompromittierter Kryptostandards, die es Angreifer_innen (wie beispielsweise der NSA selbst) ermöglichen, die jeweilige Verschlüsselung zu brechen. In jüngster Vergangenheit waren dabei vornehmlich Public-Key-Systeme oder Methoden zum Schlüsselaustausch betroffen, die auf der Basis elliptischer Kurven arbeiten.

4.1.6 Beeinflussung der zivilen Forschungslandschaft durch militärische Interessenträger_innen

Im Jahr 2014 stellten die Kryptolog_innen Daniel J. Bernstein und Tanja Lange das Prinzip Twist-sicherer Kurven (*twist-secure curves*) am 31. jährlichen *Chaos Communication Congress* vor (vgl. [BL14]). Sie zeigten, dass einige in aktuellen Kryptosystemen verwendeten elliptischen Kurven erhebliche Sicherheitsmängel bergen, da das diskrete Logarithmusproblem durch eine geschickte Attacke umgangen werden kann. Eine Twist-Attacke auf den ECDH lässt sich dabei in zwei Ausprägungen durchführen: mittels *small-subgroup attacks* und *invalid-curve attacks* (vgl. [100]). Beide Angriffsschemata nutzen ausschließlich mathematische Schwächen der verwendeten elliptischen Kurven aus. Bei einer *small-subgroup attack* schickt ein_e Angreifer_in eine vermeintliche Nachricht zum Schlüsselaustausch mithilfe derer sie_er Zusatzinformationen über den Schlüssel der angegriffenen Person erhalten kann. Diese Art der Attacke ist laut Bernstein und Lange noch leicht zu verhindern. Weitaus gefährlicher ist der Angriff via einer *invalid-curve attack*. Die_der Angreifer_in verwendet in diesem Fall wiederholt Punkte anderer, mit der im Kryptosystem genutzten Kurve verwandter, elliptischer Kurven in der Schlüsselaustausch-Nachricht, womit schließlich der geheime Schlüssel der_des Angegriffenen interpoliert werden kann. Auch im Falle einer *invalid-curve attack* würde nur eine kurze rechnerische Überprüfung der fehlerhaften Nachricht zur Überführung des Angriffes genügen, nahezu kein Kryptosystem implementiert allerdings diese Sicherheitsabfragen. Weitaus zielführender ist daher die Implementierung Twist-sicherer Kurven. Bernstein und Lange führen die im Umlauf befindlichen elliptischen Kurven mit Bewertung ihrer Twist-Sicherheit an – bei weitem nicht alle verwendeten Kurven widerstehen einer solchen Attacke. Die Herkunft prominenter elliptischer Kurven gibt überdies deshalb zu denken, da ihre Verwendung vor allem vom NSA-Kryptologen Jerry Solinas propagiert wurde (vgl. [BCC⁺14]), wie beispielsweise die seit 1999 verwendete Kurve *NIST P-224* (vgl. [Nat99]). Die Frage, ob hinter der Bewerbung unsicherer elliptischer Kurven durch die NSA tatsächlich Absicht steht, bleibt hierbei offen. Zumindest verhindert aber die intransparente Generierung und Wahl jener problematischen Kurven zunächst eine eingehende Analyse sicherheitsrelevanter Kriterien.

Außer Zweifel steht hingegen die Absicht der geheimdienstlichen Beeinflussung

bei der Verbreitung eines unsicheren Kryptosystems im Falle des Pseudozufallsgenerators *Dual_EC_DRBG* (vgl. [Fis14]). Zufallszahlen sind essentieller Bestandteil vieler Kryptosysteme – so auch beispielsweise dem Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch. Zusatzwissen über die im Kryptosystem verwendeten Zufallszahlen würde es einem Angreifer_in ermöglichen, geheime Schlüssel der Kommunikationsparteien zu errechnen und damit das gesamte Verschlüsselungsverfahren obsolet zu machen. Der Sonderfall des *Dual_EC_DRBG* zeigt, wie ein Generator von Zufallszahlen in Verschlüsselungsverfahren auf der Basis von elliptischen Kurven erfolgreich manipuliert werden kann: Der *Dual_EC_DRBG* erzeugt Zufallszahlen mittels einer Iteration, die es ermöglicht, bei Kenntnis eines Ausgangswertes alle zukünftigen „Zufallszahlen“ vorherzusagen. Im Falle des ECDH würde ein solches Wissen bedeuten, dass sogar bei mehrmaliger Neuwahl des privaten Schlüssels der beteiligten Parteien keine Sicherheit, sondern im Gegenteil die völlige Offenlegung des Kryptosystems garantiert werden könnte. Für einen erfolgreichen Angriff wäre allerdings eine besondere Zusatzinformation vonnöten, die nicht nur das Einschleusen eines fehlerhaften Generators, sondern auch eine enge Zusammenarbeit zwischen der_dem Angreifenden und der Instanz, die ein solches Kryptosystem implementiert, erfordert. Im Jahr 2013 wurde via eines von Edward Snowden geleakten Dokuments (vgl. [87]) bekannt, dass die Sicherheitslücke im *Dual_EC_DRBG* eine absichtliche Hintertür darstellt, die der Sicherheitsfirma RSA von der NSA mit 10 Millionen Dollar bezahlt wurde (siehe auch Abschnitt 4.1.2 der vorliegenden Arbeit).

Beide oben genannten Beispiele – sowohl von Jerry Solinas gewählte Kurven als auch der Pseudozufallsgenerator *Dual_EC_DRBG* – erlangten internationale Bedeutung in der kryptologischen Anwendung und der akademischen Forschung. Begründet liegt die weite Ausbreitung solch fehlerhafter Standards vornehmlich in der Politik der US-Normierungsbehörde *National Institute of Standards and Technology* (kurz: *NIST*). Das NIST gibt Empfehlungen für die Normierung etablierter Kryptosysteme und beherzigt dabei geheimdienstlich und von Unternehmen entwickelte Implementierungen, wie die der NSA und des Sicherheitskonzerns RSA. Die NIST-Standards sind außerdem weitgehend alternativlos, die einzigen Ausnahmen bilden von Forscher_innen entwickelte, quelloffene Implementierungen, die als Antwort auf die Sicherheitslücken entstehen. Der Nutzen solch weit verbreiteter Sicherheitslücken in viel verwendeten Kryptosystemen für die moderne Kriegsführung ist also noch unmittelbarer als der einer bloßen Zurückhaltung von Informationen: Durch gut getarnte Hintertüren in den jeweiligen Implementierungen, die durch eine Veröffentlichung in NIST-Standards als sichere Verschlüsselungsschemata legitimiert werden, bleiben NSA-Abhöraktionen lange Zeit unbekannt und der Geheimdienst unbehelligt. Die NIST-Kurven und -Algorithmen werden in Kriegen mit amerikanischer Beteiligung auch von feindlichen Staaten genutzt und bieten dem US-Militär damit eine offene Flanke für kryptoanalytische Angriffe.

Gerade die internationale akademische Forschung zur Kryptologie (die mathematische wie die informatische) wird mit den Folgen der NSA-Politik konfrontiert. Dies schlägt sich sowohl durch den einseitigen Informationsfluss der militärisch-

geheimdienstlichen Kooperation mit der kryptologischen Forschungslandschaft als auch durch die beabsichtigten Hintertüren in den propagierten Kryptostandards auf die Forschungslandschaft nieder. Während führende universitär verortete Kryptolog_innen Wissen mit geheimdienstlichen, staatlichen und militärischen Akteur_innen teilen, setzen ebendiese auf eine gänzlich intransparente Informationspolitik und fast vollständige Geheimhaltung ihrer Forschungserkenntnisse. Die in den NIST-Publikationen verwendeten fehlerhaften Implementierungen werden als Forschungsgrundlage verwendet und nur unter erheblichem Forschungsaufwand sowie der regen Nutzung personaler und infrastruktureller Kapazitäten aufgedeckt. Insgesamt zeichnet sich also ein ausgereiftes Interesse staatlicher Institutionen an der Mitentwicklung etablierter Kryptosysteme ab, das zumindest hemmende oder gar destruktive Auswirkungen auf die universitäre Forschung mit Blick auf den eigenen Nutzen toleriert.

4.1.7 Zwischenfazit zur Kryptologie

Ob historisch oder in der aktuellen Forschung – die Kryptologie ist und war stets eine wichtige Informationsquelle staatlicher und militärischer Interessenträger_innen bezüglich der Kommunikationssicherheit und Datenakquise in der modernen Kriegsführung. Dabei zeichnen sich nach den Abschnitten 4.1.2 bis 4.1.6 zwei zentrale Aspekte der Verquickung von Kryptologie und moderner Kriegsführung ab: Neue Ergebnisse der kryptologischen Forschung können starke Auswirkungen auf die Taktik in der Kriegsführung haben und militärische Akteur_innen können erheblichen Einfluss auf die universitäre Forschung zur Kryptologie nehmen. Die dazu bisher genannten Beispiele umfassen direkte Drittmittelkooperationen zwischen Kryptolog_innen und dem Militär (wie die Studie [Sä13, S. 6], [Sä13, S. 3] zur Berechnung des diskreten Logarithmus sowie die Implementierung eines militärischen VPN [96] am FKIE), einen regen wechselseitigen Austausch auf Forschungsebene (wie auf den kryptologischen Fachtagungen [KLK13], [DRS05] und [MMPS10]) und die Kompromittierung aktuell verwendeter Kryptostandards (wie in [87] und [Fis14] beschrieben).

Welche Bedeutung die kryptologische Forschung für die moderne Kriegsführung hat, kann mithilfe des Abschnittes 2.1.3 – also einer Verknüpfung der Kryptologie mit den Mitteln und Zwecken moderner Kriegsführung – genauer dargestellt werden. Im Allgemeinen sind kryptologische Konzepte inzwischen fast in jeder Ausprägung militärischen Wirkens wichtig. Denn in beinahe allen aktuellen Kriegssituationen und Waffensystemen werden digital Daten ausgetauscht, deren Sicherheit und Integrität zu jedem Zeitpunkt des Kommunikationsprozesses gewährleistet sein sollen. Häufig sind feindliche Kommunikationsnetze auch das eigentliche Ziel militärischer Operationen. Und so arbeitet die aktuelle kryptologische Forschung beinahe jedem Mittel der modernen Kriegsführung zu, denn sie ist sowohl für die Entwicklung sicherer Verschlüsselungsschemata als auch für Angriffe auf feindliche Kryptosysteme unabdingbar. Allerdings lässt sich dabei zwischen einer *primären* (oder *direkten*) und *sekundären* (oder *indirekten*) Bedeutung kryptologischer Konzepte für die moderne Kriegsführung unterscheiden. Direkt findet die Kryptologie etwa in den Mitteln der *Informationsak-*

quise – beim Angriff auf feindliche Verschlüsselungssysteme –, der eigenen *Informationssicherheit* und in der *Vermischung des Zivilen und Militärischen* – mittels Dual-Use-Forschung und der militärischen Besetzung des vorwiegend zivil genutzten Cyber- und Informationsraumes – Anwendung. Indirekt wird zuverlässige Verschlüsselung allerdings auch in *neuen Waffensystemen* – etwa Panzern oder Lenkflugkörpern –, bei der *Fernsteuerung und Automatisierung* – zum Beispiel von Drohnen – und beim Einsatz von *Spezialkräften* benötigt. In unterschiedlicher Gewichtung arbeitet die kryptologische Forschung somit allen drei Ansätzen zur Brechung feindlichen Widerstandes zu, die in Abschnitt 2.1.3 genannt wurden.

- Erstens der *Abschreckung* und dem *Demonstrieren von Überlegenheit*: Erfolgreich attackierte Kryptosysteme können einer Kriegspartei Informationshoheit verschaffen, was Überlegenheit suggeriert und den Feind einschüchtert; geheimes taktisches Wissen ist zudem oft zentral für abschreckende Militärschläge.
- Zweitens *schnellen und flexiblen Angriffen*: Sichere Verschlüsselung ist essentiell für den Einsatz von Spezialeinheiten oder die Fernsteuerung von Kampfdrohnen; und Schwachstellen in feindlicher Verschlüsselung befähigen zu schnellen, niedrighwelligen Cyberattacken.
- Drittens *zivilgesellschaftlicher Akzeptanz*: Dual-Use-Forschung wird an zivilen Forschungsinstituten immer normaler; außerdem positioniert sich Militär auch im virtuellen Raum als Beschützer der Zivilgesellschaft (wie etwa die Bundeswehr mittels des neuen Kommandos Cyber- und Informationsraum).

Bei der Analyse militärrelevanter kryptologischer Forschung fällt auf, dass sich Entwicklungen im Forschungssektor oft nur schwer auf einzelne Staaten beschränken lassen. Das liegt zum einen an den internationalen Kooperationsbestrebungen von Forscher_innen, zum anderen am transnationalen Agieren von Geheimdiensten, staatlichen Institutionen und Konzernen. Auch ist es oft nicht mehr möglich, militärische Interessen von staatlichen oder wirtschaftlichen zu trennen – zu nah liegen die (geo)politischen Ziele der jeweiligen Akteur_innen meist beisammen. Staatlich legitimierte (und oft mit der Wahrung von Menschenrechten begründete) Kriege dienen häufig wirtschaftlichen Interessen wie der Sicherung von Handelsrouten und der Absatzmarkterschließung. Besonders eindrucksvoll lässt sich diese Einigkeit an eigens zu diesen Zwecken gegründeten Institutionen wie dem US-Geheimdienst NSA erörtern, der schon seit seiner Gründung als militärischer Geheimdienst explizit auch den amerikanischen Staats- und Wirtschaftsinteressen dienen soll (vgl. auch Abschnitt 4.1.2). Gerade der US-Geheimdienst dominiert auch die öffentliche Wahrnehmung der militärrelevanten Kryptologie. Nicht nur ist er größer als seine deutschen oder anderen europäischen Verwandten, wie beispielsweise der *Bundesnachrichtendienst* (kurz: *BND*); auch seine Informationspolitik und sein Auftreten sind weitaus weniger exklusiv. Dennoch sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass auch der Bundesnachrichtendienst eine ähnliche Struktur und Zielsetzung hat wie die NSA (vgl. [101] und

[102]), sich dagegen aber durch sein eher klandestines Agieren auszeichnet. Außerdem besteht ohnehin eine enge Zusammenarbeit zwischen westlichen Geheimdiensten wie der NSA und dem BND (vgl. [103]). Die Verquickung zwischen der universitären Kryptologie und der modernen Kriegsführung wird daher immer schwieriger geografisch abzugrenzen.

Eine weitere Besonderheit bei Forschungsk Kooperationen in der Kryptologie – unabhängig davon, ob nun staatliche, privatwirtschaftliche oder militärische Akteur_innen beteiligt sind – ist, dass meist ein sehr einseitiger Informationsfluss besteht. Die Angehörigen der zivilen Hochschulen (sowohl Wissenschaftler_innen als auch Studierende) teilen ihr Wissen mit den Geldgeber_innen und Kooperationspartner_innen, welche dann die Forschungsergebnisse nutzen und verarbeiten. Allerdings ist es nicht im Sinne einer staatlichen Institution, eines Konzerns oder einer Armee, ihre eigenen Erkenntnisse zu Schwachstellen oder Fortschritten in der Verschlüsselung von Informationen zu teilen – denn dann könnten auch gegnerische Gruppen von diesem Wissen profitieren. Das hat zur Folge, dass nur äußerst selten auch neue Erkenntnisse zu Kryptosystemen wieder aus Staat, Wirtschaft oder Militär in die zivile Wissenschaft zurückfließen. Es kann dagegen sogar vorkommen, dass von Geheimdiensten gezielt Verschlüsselungsschemata verbreitet werden, die absichtlich mit Schwachstellen versehen sind. Diejenigen polizeilichen, geheimdienstlichen oder militärischen Institutionen, welche von den Backdoors wissen, können dann verschlüsselte Kommunikation offenlegen – private ebenso, wie die eines feindlichen Staates. Doch kompromittierte Kryptosysteme sind nicht nur den Urheber_innen von Nutzen, sondern können natürlich auch von anderen Geheimdiensten entdeckt und verwendet werden. Am meisten Schaden entsteht dabei für die Zivilgesellschaft, denn Privatpersonen erfahren oft als Letzte von den Schwachstellen in der Verschlüsselung.

Die Verquickung zwischen der kryptologischen Forschung und der modernen Kriegsführung hat damit sowohl negative Auswirkungen auf die Zivilgesellschaft als auch auf die eigene Wissenschaftslandschaft. Denn einerseits arbeiten Kryptolog_innen indirekt der Unsicherheit von Verschlüsselungsschemata, dem Ausbau staatlicher und militärischer Überwachung und der Machbarkeit von niedrigschwelligen Cyberattacken zu, andererseits sind militärische Fragestellungen und eine damit einhergehende intransparente Forschungspraxis innerhalb der Wissenschaft oft akzeptiert oder werden zumindest selten problematisiert. Nach den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.5 zur Verantwortung von Forscher_innen und dem Verständnis von Wissenschaft stellen sich damit einige zentrale Fragen, die die Verquickung zwischen Kryptologie und der modernen Kriegsführung betreffen: In welchem Maße können beteiligte Wissenschaftler_innen für die wichtige Funktion, die ihre kryptologische Forschung in der modernen Kriegsführung einnimmt als verantwortlich bezeichnet werden? Wie können sie ihre Verantwortung gegenüber der Gesellschaft wahrnehmen? Sind stark interessen geleitete Forschungsk Kooperationen in der Kryptologie überhaupt noch als wissenschaftlich zu bezeichnen? Und muss die Transparenz von Forschungsergebnissen vielleicht auch als wichtiger Aspekt von Wissenschaftlichkeit gehandelt werden? All diese Fragen sind Teil eines Diskurses der nicht allein innerwissenschaftlich oder gesellschaftspolitisch geführt werden muss, denn

sowohl Wissenschaftler_innen wie Privatpersonen sind von den Entwicklungen in der kryptologischen Forschung auf unterschiedliche Art und Weise betroffen.

4.2 Spieltheorie und künstliche Intelligenz

Algorithmen, die Entscheidungsprozesse unterstützen oder in Gänze übernehmen, sind aus dem täglichen Leben inzwischen nur schwer wegzudenken. Sie finden sich beispielsweise in personalisierter Werbung, den Treffern einer Suchmaschine, in Navigationssystemen zur Wegfindung oder der Früherkennung von Unfallsituationen. Auch in der Marktwirtschaft hat sich längst der finanzielle Nutzen solch intelligenter Systeme herumgesprochen: An der Börse laufen Analyse- und Investitionstools, Banken vergeben algorithmisch Kredit-Scores auf der Basis von Metadaten ihrer Kund_innen und in der Industrie sollen sich intelligente Produktionslinien der ständig wechselnden Nachfrage anpassen. Grundsätzlich scheinen solche Algorithmen immer dann sinnvoll oder wirtschaftlich, wenn menschliche Entscheidungen aufgrund enormer Datenmengen nicht ohne erheblichen Aufwand und nur unter großer Fehleranfälligkeit gefällt werden können. Zudem eröffnen jene Programme Möglichkeiten, die im marktwirtschaftlichen Kontext äußerst erstrebenswert scheinen: eine Entmenschlichung von Versicherungs- und Bankgeschäften und eine gleichzeitige Gewinnmaximierung. Ein Programm kann vollkommen rational, ohne Rücksicht auf Zwischenmenschlichkeit und damit ohne die Krücke ethischer Bedenken über die materielle Grundlage von Privatpersonen sowie den Geldfluss bei Spekulationsgeschäften bestimmen. Kritik an diesen Entscheidungen ist dann nicht mehr an die zuständigen Sachbearbeiter_innen oder Makler_innen zu richten, sondern kann aufgrund der vermeintlich optimalen Arbeitsweise der Algorithmen als nichtig erklärt werden oder ist – wenn überhaupt – bezüglich des „fine tuning“ der Programmparameter angebracht.

Die Hoffnung auf sichere Vorhersagen über den Ausgang von Wettbewerbssituationen und Konflikten oder die Möglichkeit, technische Neuerungen zu automatisieren, lässt auch staatliche und militärische Akteur_innen aufhorchen. Seien es zuverlässige Prädiktorenmodelle über den Erfolg geopolitischer Strategien oder Programme zur Analyse von Schlachttaktiken; seien es verbesserte Überwachungstechnologien, die selbstständig gefährliche Situationen und Äußerungen erkennen oder Kampfdrohnen, die autonom steuern, Ziele finden und abschießen – Algorithmen sollen das leisten, was Menschen wegen einer zu großen Anzahl an Daten und Variablen nicht mehr bewältigen können. Öffentlich begründet wird die Notwendigkeit jener Neuerungen vorrangig mit dem Schutz einer gefährdeten Zivilbevölkerung unter dem Protektorat einer starken Nation und der Möglichkeit „chirurgischer“ Eingriffe in Kriegseinsätzen einhergehend mit der Minimierung eigener Verluste. Dabei stehen zwei Aspekte des nationalstaatlichen Kanons nicht zur Diskussion: Erstens ist der „Schutz“ einer Zivilbevölkerung nicht ohne eine Ausweitung der staatlichen sowie der polizeilichen Kontrolle – und damit auch nicht ohne den gleichzeitigen Schutz des Staates – möglich; zweitens ist die Analyse taktischen Vorgehens im Umfeld mehrerer Akteur_innen ausschließlich in

einen kompetitiven Kontext zu setzen – auf dem politischen Schachbrett bewegen sich Aggressor_innen und Defendor_innen, die um Raumgewinne ringen und nur dann kooperieren, wenn es zum eigenen Vorteil gereicht. Menschliche Eigenschaften wie Empathie, Mitleid oder Solidarität wären unter diesen Voraussetzungen eher hinderlich und hier liegt für das Militär – analog zur marktwirtschaftlichen Wirkweise – wohl ein wichtiger Aspekt von Algorithmen zur Entscheidungsfindung oder zur Autonomisierung von Kriegs- und Überwachungsgerät begründet: Die Programme und Maschinen können entmenschlicht, rational und eigenverantwortlich handeln.

Die Herausforderungen, denen Entwickler_innen bei der Implementierung solch umfassender Konzepte zur Entscheidungsfindung und Automatisierung gegenüberstehen, sind denkbar komplexer Natur. Ihr wissenschaftlicher Ursprung liegt vor allem in der Mathematik und der Informatik: Spieltheoretische Forschungsansätze sollen das Fundament von Voraussagemodellen und taktisch relevanten Tools zur Ablaufplanung bilden; die Forschung zur künstlichen Intelligenz befasst sich mit der Abbildung menschlicher Fähigkeiten, wie der Mustererkennung oder der Steuerung von Geräten und Maschinen. Mit Blick auf das oben genannte militärische Interesse an ebendiesen Methoden aus den Gebieten der Spieltheorie und der künstlichen Intelligenz stellt sich die Frage: In welcher Form sind jene Fachbereiche mit der konkreten militärischen Anwendung verquickt? Im Folgenden werden die Spieltheorie und die künstliche Intelligenz kurz fachlich in die mathematische und informatische Forschung eingeordnet und die Felder der Anwendung historisch umrissen. Anschließend wird auf die Verbindungen spieltheoretischer Forschung und der wissenschaftlichen Arbeit zu künstlicher Intelligenz mit der Kriegsführung eingegangen.

4.2.1 Fachliche und geschichtliche Einordnung der Spieltheorie

Die Spieltheorie ist ein Fachgebiet der mathematischen Forschung, das sich mit der Analyse von strategischen Entscheidungssituationen befasst und diese in den Kontext eines Spieles setzt. Spieler_innen versuchen mittels einer Strategie, die sich innerhalb der Spielregeln bewegt, den größtmöglichen Nutzen zu erzielen. Formell teilt sich das Fach in die kooperative Spieltheorie, in der sich Spieler_innen auf gemeinsame optimale Strategien einigen können und die nicht-kooperative Spieltheorie, die den Spieler_innen eine kompetitive, egoistische Lösung einer Situation abverlangt. Viele spieltheoretische Konzepte eignen sich als Ansatz zur mathematischen Modellierung von realen Situationen, in denen eine möglichst sichere Vorhersage für Entwicklungen oder eine Entscheidungshilfe für strategisches Vorgehen erwünscht sind – sei es die Analyse von Börsenkursen, das Vorgehen in geopolitischen Spannungslagen, das Verhalten egoistischer Agenten in Multiagentensystemen oder die Erforschung evolutionärer Prozesse. Methoden der Spieltheorie finden sich daher in zahlreichen Forschungsfeldern wie den Wirtschafts-, Sozial- oder Politikwissenschaften, dem Operations Research, der Informatik oder der Biologie wieder. Die mathematischen Methoden, welche in diesen interdisziplinären Fragestellungen Anwendung finden, reichen von Forschungsergebnissen der linearen Optimierung über partielle Differentialgleichungen bis zur Theorie dy-

namischer Systeme. Dementsprechend vielschichtig ist auch die einschlägige Fachliteratur zur Spieltheorie: Es existieren umfangreiche Einführungsbände wie [HI09], [BEG10] und [Mor12], Abhandlungen und Konferenzbände über die angewandte, interdisziplinär gerichtete Spieltheorie wie [Ama99], [ACM10] und [KKS10] und Publikationen zu den mathematischen Grundlagen einzelner Ausprägungen von Spielen und Strategien wie [Cur97], [Isa99] und [Kra05]. Zum Zwecke einer grundlegenden Einführung in den Forschungsstand der Spieltheorie sowie für die weiterreichende Recherche aktueller anwendungsbezogener Forschung sei die_der geneigte Leser_in auf die oben genannte Literatur verwiesen.

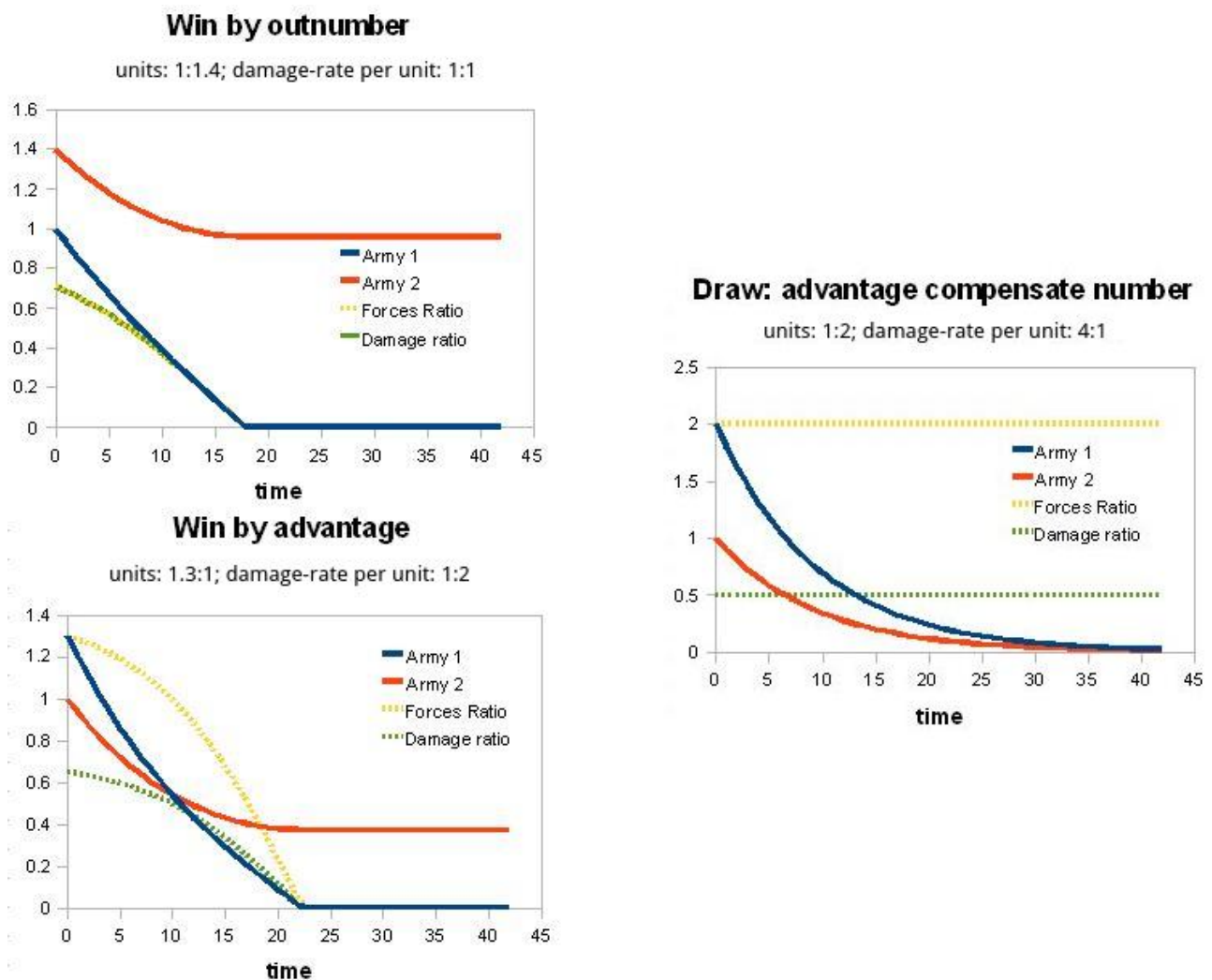


Abbildung 4.4: Simulation von Kampfhandlungen zwischen zwei Armeen nach *Lanchester's Laws*.

Die ersten Überlegungen und Publikationen zur Spieltheorie bewegten sich fast ausschließlich im Kontext strategischen Vorgehens in Spielsituationen ohne größeren Realitätsbezug. Meist wurden taktische Spiele – wie beispielsweise simplifizierte Karten- und Gesellschaftsspiele oder Schach – und damit verbundene Spielstrategien analysiert (vgl. zum Beispiel [Zer13], [Neu28] und [BF15]). Auf der Grundlage jener Überlegungen

entstand Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts der Versuch, spieltheoretische Konzepte auch auf kompetitive Sachlagen in der Privatwirtschaft und in militärischen Fragen zu portieren. Den Wendepunkt der wissenschaftlichen Agenda von einer rein theoretischen, mathematischen Sichtweise hin zur Modellierung realer Problemstellungen kennzeichnet John von Neumanns und Oskar Morgensterns fundamentales Werk „Theory of Games and Economic Behavior“ [NM44] aus dem Jahr 1944. Das Angebot, das die Forscher_innen den privatwirtschaftlichen und militärischen Akteur_innen ab der Mitte der 1940er Jahre machten, war die Bereitstellung eines ganzheitlichen Lösungskonzeptes für komplexe Fragestellungen in Wettbewerbssituationen. Es wurde versucht, mathematische Modelle für das nukleare Wettrüsten im Kalten Krieg, allgemeine Schlachtsituationen mithilfe des „Combat Modeling“ (siehe Abb. 4.4) und gewinnmaximierende Strategien für Unternehmen auf dem freien Markt bereitzustellen (vgl. beispielsweise [Mor59], [Sny61] und [Shu59]). Dabei taten sich zwei Aspekte als besonders problematisch hervor:

1. Die Grundidee der Spieltheorie beschränkt eine errechnete und mathematisch gesicherte optimale Strategie auf ein die Realität abbildendes Modell. Fehler in der Modellierung oder Kritik am Modell (wie beispielsweise Kritik am Wirtschaftssystem oder an einer Kriegssituation) sind nicht Gegenstand der resultierenden Analyse.
2. Meist können nicht alle Variablen einer realen Situation berücksichtigt werden, sei es aufgrund begrenzter Rechenkapazitäten oder unvorhersehbarer Ereignisse.

Damit hätte eine spieltheoretische Modellierung komplexer Problemlagen als zumindest fragwürdig bezeichnet werden können. Sie wurde allerdings trotz ihrer fehlenden Praktikabilität einem politischen Nutzen zugeführt: Die vielfältigen Möglichkeiten zur Modellierung einer konkreten Situation, die bei der Auslassung wichtiger Systemvariablen schon an Willkür grenzen können und die vermeintliche wissenschaftliche Basis einer spieltheoretischen Analyse ermöglichte es politischen, wirtschaftlichen und militärischen Interessenträger_innen, taktische Entscheidungen als unumstößlich und mathematisch eindeutig beste Lösung darzustellen. So diente die Spieltheorie im zwanzigsten Jahrhundert einerseits als Legitimationswerkzeug des Status quo für wirtschaftliche und politische Eliten. Andererseits stand sie den beteiligten Forscher_innen als Quelle des Erwerbs und des wissenschaftlichen Ansehens zur Verfügung (vgl. [Mar78]).

Während militärische Akteur_innen kurz darauf die Hoffnung auf ganzheitliche Prognose- und Analysewerkzeuge fallen ließen, hatte die langjährige politische und interessengeleitete Nutzung der Spieltheorie erhebliche Folgen, die das Forschungsgebiet bis heute maßgeblich prägen: Zum einen wurde der nicht-kooperativen Spieltheorie aufgrund der kompetitiven Fragestellungen weitreichend Vorrang gegenüber kooperativen Konzepten gegeben; zum anderen entwickelte sich in der Sprache der Forschungsprojekte ein überwiegend militärischer und wirtschaftswissenschaftlicher Duktus. Ab den 1970er Jahren wurden schließlich auch spieltheoretische Konzepte

für die militärische Verwendung gangbar gemacht, sie nehmen allerdings im Vergleich zur privatwirtschaftlichen Nutzung der Forschungsergebnisse heute nur noch eine untergeordnete Rolle ein. Dieser Umstand wird in Abschnitt 4.2.3 weiter ausgeführt.

4.2.2 Fachliche und geschichtliche Einordnung der künstlichen Intelligenz

Die künstliche Intelligenz ist ein Teilgebiet der Informatik, welches sich mit dem Verständnis intelligenten Verhaltens sowie der Implementierung und der Programmierung intelligenter Systeme befasst. „Intelligenz“ beschreibt dabei – ohne den Anspruch auf eine ganzheitliche Definition – die Fähigkeit, Situationen und Aufgaben selbstständig zu erfassen, zu bewerten und gegebenenfalls entsprechend zu handeln. In der wissenschaftlichen Bearbeitung der künstlichen Intelligenz finden sich auf dieser Basis Forschungsansätze für Methoden und Programme, die die menschliche Intelligenz nachbilden sollen oder jenseits menschlicher Kapazitäten arbeiten. Dass diese beiden Perspektiven sich in der Forschung zur KI stark unterscheiden, lässt sich vor allem an den Verwendungen intelligenter Systeme erkennen: Die Nachbildung menschlicher Intelligenz wird vorzugsweise als Alternative zu menschlichen Akteur_innen beforscht (wie beispielsweise bei Chat-Bots oder intelligenten Planungssystemen). Konzepte in der KI, die kein menschliches Verhalten implementieren sollen, setzen sich meist mit Fragestellungen auseinander, welche die menschlichen Kapazitäten übersteigen würden (wie etwa die Mustererkennung in großen Datenmengen) oder die Entitäten ohne menschliche Eigenschaften modellieren (wie es beispielsweise in vielen Multiagentensystemen der Fall ist).

Die künstliche Intelligenz ist ein vorwiegend praxisbezogenes Forschungsgebiet; die beteiligten Wissenschaftler_innen bemessen den Nutzen ihrer Arbeitsschwerpunkte meist an der umfassenden Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in der Privatwirtschaft und der Industrie. Die theoretischen Grundlagen künstlich intelligenter Systeme entstammen dagegen größtenteils der mathematischen Forschung oder programmierlogischen Fragestellungen sowie der Erforschung eines Intelligenzbegriffes in den Kognitionswissenschaften oder der Philosophie. Die Literatur zur KI umfasst dementsprechend Einführungswerke bezüglich der informatischen und mathematischen Grundlagen wie [FD03], [RN03] und [Len97], interdisziplinäre Abhandlungen aus den Ingenieurwissenschaften, den Kognitionswissenschaften und der Philosophie wie [Lun16], [Len02] und [ZW94] sowie Konferenzbände wie [HCS93], [AAA94] und [FK10], die die Forschung zur KI mit ihrer realen Verwendung in Verbindung setzen.

Die Geschichte der KI-Forschung ist durchzogen mit Blütezeiten und Existenzkrisen des jungen Forschungsgebiets, mit zahlreichen Ideen für die Verwendung intelligenter Systeme und deren anschließender Verwerfung. Kaum ein Teilbereich der Informatik ist so stark von seiner historischen Entwicklung geprägt worden wie die künstliche Intelligenz. Diese Besonderheit spiegelt sich auch in der wissenschaftlichen Darstellung des Forschungsgebiets wider: Selbst die theoretischen Einführungswerke sind nicht ohne

eine geschichtliche Einordnung der KI-Forschung denkbar (vgl. beispielsweise [FD03, S. 3-7] sowie [RN03, S. 3-28]), sie werden ergänzt durch umfangreiche wissenschaftshistorische Werke wie [Cre93] und [Nil14].

Die Ursprünge der Überlegungen, nichtmenschliche intelligente Entitäten zu erzeugen, entstammen großteils früher Fiktion und sind zeitlich nur schwer einzugrenzen (vgl. [Nil14, S. 3-8]): Schon in der Antike existierten Mythen über verzauberte goldene Diener_innen, im Mittelalter über rituell erzeugte humanoide Kreaturen. Im Übergang vom 19. zum 20. Jahrhundert verlagerte sich der Fokus der Geschichten schließlich von den magischen Ursprüngen künstlicher Intelligenz auf die weitaus technischeren und wissenschaftlich orientierten Ansätze der Science Fiction. Diese literarische Entwicklung geschah etwa zeitgleich mit wissenschaftlichen Fortschritten, die der KI den Weg bereiteten (vgl. [Cre93, S. 1-25] und [Nil14, S. 14-41]). Mit den ersten Überlegungen, ob jedwedes mathematische Schlussfolgern zu formalisieren wäre und dem gleichzeitigen Erstarken von Forschungsthemen der Informatik beziehungsweise der Computerwissenschaften, entstand Mitte des 20. Jahrhunderts die Idee, die menschliche Logik zu automatisieren und in diesem Sinne fortan der Forschung an einem künstlichen Gehirn und damit einer künstlichen Intelligenz Vorschub zu leisten.

Die ersten Methoden, welche die Nachbildung menschlicher Intelligenz behandelten, waren theoretischer Natur und kennzeichnen ein Herantasten der Forscher_innen an die noch junge Wissenschaft (vgl. [Cre93, S. 9-144] und [Nil14, S. 47-205]): Während der frühen Jahre der KI-Forschung entstanden Konzepte intelligenter Systeme und Programme, wie etwa die ersten künstlichen neuronalen Netze, mathematische Beweisführungsprogramme sowie der bis heute immer wieder aktualisierte „Turingtest“, den Alan Turing als Maßstab für eine „denkende“ Maschine formulierte. In den nächsten zwanzig Jahren der Forschung, etwa Mitte der 1950er bis Mitte der 1970er Jahre, erschlossen die Forscher_innen schrittweise neue Ideen für die Implementierung künstlicher Intelligenz: Suchalgorithmen, die Schlussfolgerungen automatisierten und Versuche der Formalisierung menschlicher Eigenschaften, wie zum Beispiel der natürlichen Sprache, bestimmten die KI-Forschung dieser Zeit. Die Erwartungen, die die Forscher_innen in diesem Zug an sich selbst formulierten, waren von der Euphorie eines schnell wachsenden Forschungsgebietes geprägt und dementsprechend optimistisch. Innerhalb weniger Jahre sollten Computer mathematische Theoreme beweisen, Schachweltmeister besiegen und die Intelligenz eines durchschnittlichen Menschen besitzen. Diesen Versprechungen folgten die Geldgeber_innen – Landesregierungen und militärische Institutionen wie die US-amerikanische DARPA investierten erhebliche Summen in die Grundlagenforschung zur künstlichen Intelligenz. Die Hoffnung, schon innerhalb kurzer Zeit intelligente Computer und Programme zu besitzen und damit anderen Nationen im militärischen und wirtschaftlichen Wettstreit voran zu stehen, führte zu einem regelrechten Boom der KI-Forschung in Europa und den USA. In dieser finanziellen Hochphase wurden viele neue Forschungsgruppen, Institute und Lehrstühle geschaffen, die KI wurde immer stärker von Drittmitteln getragen und damit von der Erfüllung ihrer optimistischen Versprechungen abhängig. Als sich nach zwanzig Jahren intensiver Forschungsarbeit herausstellte, dass sowohl die neueste Hardware als auch

viele theoretische Annahmen erheblicher Weiterentwicklung bedurften, um die anfangs formulierten Ziele zu erreichen, schnitten die Geldgeber_innen zu einem großen Teil ihre finanzielle Unterstützung abrupt ab und stürzten damit die künstliche Intelligenz in eine handfeste Krise.

Nach einiger Zeit der Restitution erlebte die KI in den 1980er Jahren wieder Aufwind (vgl. [Cre93, S. 145-216] und [Nil14, S. 207-347]). Grund dafür waren vielversprechende Ergebnisse im Bereich der wissensbasierten Systeme und der künstlichen neuronalen Netze: Während neuartige Expert_innensysteme auf der Basis großer Datenbanken Expert_innenwissen – besonders im marktwirtschaftlichen Kontext – implementieren und ersetzen sollten, rückte die Forschung zu künstlichen neuronalen Netzen vermeintlich immer näher an die Lernweise eines menschlichen Gehirns. Diese neuen Entwicklungen und das damit verbundene privatwirtschaftliche, staatliche und militärische Interesse führte zur zweiten Hochphase der KI-Forschung. Wieder finanzierten Regierungen, zum Beispiel die britische und die japanische sowie militärische Einrichtungen wie die DARPA große Teile der Forschung zur künstlichen Intelligenz. Und wieder brach das Interesse an der KI plötzlich ab. Dieses Mal aufgrund einer Mischung aus politischen Entscheidungen – etwa einer Verlagerung inhaltlicher Schwerpunkte innerhalb der DARPA – und enttäuschten Erwartungen – wie im Falle der Zielsetzung des japanischen KI-Projekts. Bis zur Mitte der 1990er Jahre verflüchtigte sich der Ausdruck „künstliche Intelligenz“ immer weiter aus dem wissenschaftlichen Fachjargon; die zu hoch gegriffenen Forschungsziele wurden korrigiert und die Forschungsbereiche wurden kleinteiliger, spezialisierter und anwendungsbezogener. Jene Entwicklung, welche die KI bis heute prägt, wird im folgenden Abschnitt 4.2.3 mit Blick auf die militärische Verwendung aktueller Forschungsergebnisse veranschaulicht.

4.2.3 Spieltheorie und künstliche Intelligenz in der modernen Kriegsführung

Trotz aller Forschungshemmnisse in der Geschichte der künstlichen Intelligenz und der oftmals attestierten Nutzlosigkeit der Forschungsergebnisse für die militärische Praxis finden sich inzwischen Methoden der KI in Schlüsseltechnologien der modernen Kriegsführung wieder. Analog zur geschichtlichen Entwicklung des Fachgebietes entstammt der Großteil der militärrelevanten KI-Konzepte der Forschung zu wissensbasierten Systemen – wie etwa die Expert_innensysteme –, zum maschinellen Lernen – wie die künstlichen neuronalen Netze – sowie zu stochastischen Systemen. So finden sich beispielsweise Algorithmen auf Basis des maschinellen Lernens, die mithilfe von Handydaten vermeintliche Terrorist_innen identifizieren (vgl. [104]), stochastische Methoden für hochtechnisierte Kampfdrohnen, welche eine autonome Zielverfolgung implementieren (vgl. [CRFT02]) sowie Tools zur wissensbasierten Analyse von Überwachungsvideos, die in Echtzeit die Entstehung „gefährlicher“ Situationen erkennen sollen (vgl. [105] und [106]). Diese Anwendungsfelder prägen die aktuelle Forschungslandschaft der künstlichen Intelligenz nachweislich: Forschungsziele werden

inzwischen weitaus spezialisierter formuliert und die KI-Forschung geht aufgrund der Ausrichtung konkreter Drittmittelprojekte häufig fast vollständig in den Überlegungen zu wissensbasierten und stochastischen Systemen sowie zum maschinellen Lernen auf.

Die spieltheoretische Forschung nahm dagegen eine andere Entwicklung als die KI: Es existieren zwar Prädiktorenmodelle zu getöteten Soldat_innen während einer Gefechtssituation mittels *Lanchester's Laws* (vgl. [CJJ⁺11]), über den Ausgang von Seegefechten mit dem *salvo combat model* (vgl. [XYW10]) oder bezüglich optimaler Trajektorien für Flugzeugabschüsse durch Cruise-Missiles mithilfe von *Pursuit-Evasion*-Spielen (vgl. [PBL10]). Doch diesen spieltheoretischen Methoden kommt in der modernen Kriegsführung nur geringe Bedeutung zu, wie auch militärische Fragestellungen nur marginal Einfluss auf die Forschungslandschaft der Spieltheorie haben. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit des Forschungsbereiches ging die Spieltheorie weitestgehend zu Fragestellungen der Informatik, wie der Multiagentensysteme, der Finanzmathematik, wie der Optimierung und zu kleinen Teilen auch der Ingenieurmathematik, wie der Kontrolltheorie, über. So lebte die militärische Relevanz der künstlichen Intelligenz wieder auf, während die angewandte Spieltheorie eine jeweils kleine Rolle innerhalb der Kontrolltheorie, der Optimierung und den Multiagentensystemen einnimmt. Militärisch weitaus interessanter sind die Methoden der Kontrolltheorie und der Optimierung dagegen in der Ingenieurmathematik.

Aufgrund dieser Entwicklungen der spieltheoretischen und der KI-Forschung scheint – wenn es um die Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung geht – die Betrachtung der oben angeklungenen Forschungsbereiche sinnvoll. Daher werden in den Abschnitten 4.3 und 4.4 die Wechselwirkungen zwischen der modernen Kriegsführung mit der Ingenieurmathematik sowie den neuen, spezialisierten KI-Konzepten näher beleuchtet.

4.2.4 Zwischenfazit zur Spieltheorie und zur künstlichen Intelligenz

Zusammenfassend lassen sich die Verbindungen zwischen der militärischen Praxis, der spieltheoretischen Forschung und der wissenschaftlichen Arbeit an künstlicher Intelligenz aus zwei zentralen Blickwinkeln betrachten: Erstens hatte das militärische Interesse an beiden Forschungsbereichen erhebliche Auswirkungen auf die jeweilige Forschungslandschaft, zweitens sind gerade Konzepte aus dem Kontext der künstlichen Intelligenz maßgeblich an einer modernen Form der Kriegsführung beteiligt⁹.

Sowohl die Spieltheorie als auch die KI entstanden zunächst aus wissenschaftlichen Überlegungen, die keine Agenda bezüglich der Anwendbarkeit oder der Wirtschaftlichkeit von Forschungsansätzen verfolgten. Aufgrund der steten Bemühungen, die theoretischen Konzepte in einen praktischen Kontext zu setzen und damit Attraktivität für Drittmittelgeber_innen zu erzeugen, wurden beide Forschungsbereiche immer stärker

⁹wie in diesem Zusammenhang aktuelle KI-Forschung mit der modernen Kriegsführung verquickt ist, wird in Abschnitt 4.4 weiter ausgeführt

monetär sowie infrastrukturell gefördert und so stückweise von den Vorstellungen ihrer Finanzier_innen abhängig. Den Geldgeber_innen war es daher möglich, die Ausrichtung und die Grundlage von Forschungsansätzen aus der Spieltheorie und der KI maßgeblich mitzubestimmen und an Umstrukturierungen der Forschungslandschaft teilzuhaben. Einhergehend mit dem immer präsenteren Praxisbezug innerhalb der beiden Forschungsbereiche hat diese Abhängigkeit auch zur Verwerfung „unwirtschaftlicher“ wissenschaftlicher Betrachtungen geführt: Überlegungen zur kooperativen Spieltheorie, die Idee durch künstliche Intelligenz auch dem Verständnis menschlicher Intelligenz näher zu kommen sowie eine philosophische und ethische Auseinandersetzung mit den Implikationen intelligenter Maschinen scheinen innerhalb der Forschungslandschaft inzwischen so wenig populär, wie sie Geld einbringen.

Auf Grundlage der Abschnitte 2.1.4 und 2.1.5 zur Wissenschaftsverantwortung und dem Wissenschaftsverständnis lassen sich wieder zwei zentrale Diskursansätze bezüglich einer Verquickung zwischen der Spieltheorie, der KI und der Kriegsführung motivieren: Erstens stellt sich die Frage, was eine interessen geleitete Umstrukturierung und Ökonomisierung beider Fächer für die Wissenschaftlichkeit der Forschungsbereiche bedeuten. Zweitens sollte über die Verantwortlichkeit von Forscher_innen diskutiert werden, welche die neuen, spezialisierten Methoden der KI für die moderne Kriegsführung gangbar machen und wie diese ihre Verantwortung gegenüber der Gesellschaft wahrnehmen können. Gerade der zweite Punkt bedarf allerdings einer tiefergehenden Analyse der Verbindungen zwischen der aktuellen KI-Forschung und der modernen Kriegsführung und wird daher in Abschnitt 4.4 weiter behandelt.

4.3 Technomathematik

Ein zentraler Aspekt in der Entwicklung moderner Militärsysteme ist die Verbesserung von Kriegsgerät, das einem konkreten Zerstörungs- und Tötungszweck dient oder auch allgemeiner in realen Einsatzgebieten genutzt wird. Dabei steht in der Forschungsarbeit zunächst die produktionsnahe Wissenschaft im Vordergrund: Sowohl eine einfache ballistische Rakete als auch eine hochtechnisierte Kampfdrohne, der Panzer am Boden oder der Überwachungssatellit im All – die modernste Militärtechnologie fußt maßgeblich auf ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnissen. Doch je fehlerresistenter, leistungsintensiver und oft auch selbstbestimmter die neuen Technologien arbeiten sollen, desto komplexer werden die Rechengrundlagen der Systeme, desto relevanter wird die mathematische Basis der Ingenieurwissenschaften. Um die technische Anwendung mathematischer Konzepte haben sich daher inzwischen ganze Forschungsbereiche mit Namen wie „Ingenieurmathematik“ oder „Technomathematik“ entwickelt, sie bilden neben den mathematischen Überlegungen zur Algorithmik und der Finanzmathematik die wichtigsten Aspekte der sogenannten *angewandten Mathematik* (siehe beispielsweise [Hig15]).

Die zentralen Themen der Ingenieurmathematik bewegen sich vornehmlich im Kreis dreier „klassischer“ Forschungsbereiche: der Optimierung, der Numerik und

der Kontrolltheorie. Diese Teilgebiete überschneiden sich im technisch anwendungsbezogenen Kontext oft stark, wie beispielsweise in den Konzepten der *numerischen Optimierung* oder der *optimalen Steuerung*. Es scheint daher sinnvoll, ihnen im Rahmen einer Analyse wissenschaftlich-militärischer Kooperationsstrukturen einen gemeinsamen Raum zu geben. In den nachfolgenden Abschnitten wird, nach einer kurzen fachlichen Einführung und einem historischen Überblick des jeweiligen Themenbereichs, die Verquickung der Ingenieurmathematik mit der modernen Kriegsführung anhand möglichst fachtypischer Beispiele veranschaulicht. Der thematische Aufbau gliedert sich dabei wie folgt:

1. Militärrelevante Drittmittelprojekte in der Optimierung
2. Militärisches Interesse an Studierenden der Numerik
3. Kooperationsprojekte zwischen zivilen Forscher_innen und militärischen Interessenträger_innen in der Kontrolltheorie
4. Militärischer Einfluss auf die zivile Forschungslandschaft der Ingenieurmathematik

4.3.1 Direkte Drittmittelkooperationen in der Optimierung

Die Optimierung ist ein Teilgebiet der angewandten Mathematik, welches sich mit der Suche nach optimalen Parametern einer gegebenen Zielfunktion befasst. Eine Optimierung von Parametern bedeutet, die Variablen der Funktion so zu wählen, dass sie – je nach Problemstellung – minimiert oder maximiert wird. Oft existieren in einem Optimierungsproblem auch Nebenbedingungen, das heißt Einschränkungen für die Wahl der Parameter, die eine zulässige Menge von Variablenwerten definieren, über denen der Funktionswert optimiert werden soll. Meist wird das Optimierungsproblem, samt der Zielfunktion und der Nebenbedingungen, von einer realen Fragestellung abgeleitet und damit steht dem Schritt der mathematischen Optimierung die Modellierung eines konkreten Problems voran. Optimierungsmethoden finden in diesem Zuge beispielsweise Anwendung in den Wirtschaftswissenschaften, den Ingenieurwissenschaften und der Physik. Die Vielschichtigkeit der hierbei modellierten Problemstellungen spiegelt sich auch in den verschiedenen Ausprägungen der mathematischen Optimierung wider: Es existieren lineare und nichtlineare, ein- und mehrdimensionale, lokale und globale, kontinuierliche und diskrete Optimierungsaufgaben sowie solche mit oder ohne Nebenbedingungen. Die Literatur zur Optimierung umfasst in diesem Sinne umfangreiche Einführungswerke wie [Lan13], [Alt04] und [RHG13], Publikationen zur konkreten Anwendung von Optimierungsmethoden wie [Rao09], [CI05] und [HR04] sowie intra- und interdisziplinäre Konferenzbände wie [LV14], [DHP09] und [RHS⁺15].

Nahrung	g pro \$	Brennwert	Protein	Ca	Fe
Mehl	12 600 g	44,7 Mcal	1 400 g	2 g	865 mg
Milch	6 000 g	8,4 Mcal	422 g	15,1 g	9 mg
Kohl	5 800 g	2,6 Mcal	125 g	4 g	56 mg
Spinat	4 600 g	1,1 Mcal	106 g	–	188 mg
Bohnen	7 700 g	26,9 Mcal	1 700 g	11,4 g	792 mg

Tabelle 4.1: Tabelle des relativen Preises und der Nährwerte für fünf der 77 Nahrungsmittel.

Nährstoff	Bedarf
Brennwert	3 000 kcal
Protein	70 g
Calcium	0,8 g
Eisen	12 mg

Tabelle 4.2: Tabelle von vier der neun benötigten Nährstoffe.

Ein simples Beispiel zur linearen Optimierung¹⁰: Da die US-Armee während des Zweiten Weltkrieges hunderttausende Soldat_innen ernähren musste und dies gleichzeitig kostengünstig und ausgewogen geschehen sollte, stand sie vor einem logistischen Problem. George Stigler modellierte 1945 die reale Aufgabe als eine mathematische Spielerei in ein Optimierungsproblem (vgl. [Sti45] und [Tic08, S. 18]). Zur Verfügung standen ihm Informationen zu 77 Nahrungsmitteln mit der Angabe der jeweiligen Nährwerte und des Preises (siehe Tabelle 4.1) sowie eine Tabelle von neun erforderlichen Nährstoffen für eine_n durchschnittliche_n Soldat_in (siehe Tabelle 4.2).

Die Aufgabe war es nun – unter Berücksichtigung der in den Tabellen 4.1 und 4.2 gegebenen Werte –, die Kosten der täglichen Nahrungszufuhr zu minimieren und gleichzeitig Nebenbedingungen zu formulieren, die eine ausgewogene Ernährung garantierten. Seien x_1, \dots, x_5 die Mengen der oben genannten Nahrungsmittel Mehl, Milch, Kohl, Spinat und Bohnen in Gramm. Als Minimierungsproblem lässt sich die Zielfunktion dann aus der ersten Tabelle wie folgt formulieren:

$$\text{Minimiere } \frac{x_1}{12\,600} + \frac{x_2}{6\,000} + \frac{x_3}{5\,800} + \frac{x_4}{4\,600} + \frac{x_5}{7\,700}.$$

Die Nebenbedingungen ergeben sich aus den Nährwerten der ersten Tabelle und den Nährstoffanforderungen der zweiten:

$$\begin{aligned} 3,6 \cdot x_1 + 1,4 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,2 \cdot x_4 + 3,5 \cdot x_5 &\geq 3\,000, \\ 1,1 \cdot x_1 + 0,7 \cdot x_2 + 0,2 \cdot x_3 + 0,2 \cdot x_4 + 2,2 \cdot x_5 &\geq 700, \\ 0,2 \cdot x_1 + 2,5 \cdot x_2 + 0,7 \cdot x_3 + &1,5 \cdot x_5 \geq 800, \\ 6,9 \cdot x_1 + 0,1 \cdot x_2 + &x_3 + 4,1 \cdot x_4 + 10,3 \cdot x_5 \geq 1\,200. \end{aligned}$$

¹⁰verkürzt durch den Autor

Als typische Matrix-Vektor-Schreibweise lautet das lineare Optimierungsproblem dann:

$$\begin{array}{ll}
 \min & c^T x \\
 \text{unter} & A \cdot x \leq b \\
 \text{mit} & x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix}, A = - \begin{pmatrix} 3,6 & 1,4 & 0,5 & 0,2 & 3,5 \\ 1,1 & 0,7 & 0,2 & 0,2 & 2,2 \\ 0,2 & 2,5 & 0,7 & 0 & 1,5 \\ 6,9 & 0,1 & 1 & 4,1 & 10,3 \end{pmatrix}, \\
 & b = - \begin{pmatrix} 3000 \\ 700 \\ 800 \\ 1200 \end{pmatrix}, c = \begin{pmatrix} 7,9 \cdot 10^{-5} \\ 1,7 \cdot 10^{-4} \\ 1,7 \cdot 10^{-4} \\ 2,2 \cdot 10^{-4} \\ 1,3 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}.
 \end{array}$$

Da Stigler zur Zeit der Formulierung des Problems noch keine effektiven Algorithmen zur Lösung eines linearen Optimierungsproblems zur Verfügung standen, musste er auf heuristische Methoden zurückgreifen. Er errechnete den folgenden jährlichen Ernährungsplan für eine_n durchschnittliche_n Soldat_in:

Nahrung	Menge	Kosten
Mehl	168 kg	13,33 \$
Milch	57 Dosen	3,84 \$
Kohl	50 kg	4,11 \$
Spinat	10 kg	1,85 \$
Bohnen	129 kg	16,80 \$
Gesamt		39,93 \$

Tabelle 4.3: Ernährungsplan und Kosten pro Jahr.

Während Stiglers Berechnungen eher einen mathematischen Scherz als einen ernstgemeinten Vorschlag an die US-Army darstellten, gewannen Optimierungsmethoden in den 1940er Jahren zunehmend Bedeutung für die wirtschaftliche, industrielle und militärische Anwendung. Im Folgenden soll die Geschichte der Optimierung als Teilgebiet der angewandten Mathematik kurz dargestellt werden.

Die Anfänge der Optimierung liegen größtenteils in der Variationsrechnung, wie sie maßgeblich von Leonhard Euler und Joseph-Louis Lagrange gegen Ende des 18. Jahrhunderts mitbegründet wurde (vgl. [Tic08, S. 1-5]). Zwar lässt sich auch in der analytischen Diskussion von Kurven und der Suche nach Extrempunkten ein Aspekt der Optimierung erkennen, doch waren Euler und Lagrange zwei der ersten Mathematiker_innen, die in ihren Theorien zur Wertmaximierung auch Restriktionen für die verwendeten Parameter zuließen. Viele Jahre wurden die mathematischen

Grundsteine für die bis dato noch weitgehend unbeforschte Optimierung gelegt, bis sich in den 1940er Jahren schließlich eine Anwendungsmöglichkeit für die ersten linearen Optimierungsprobleme eröffnete (vgl. [Tic08, S. 10-19]). Die Mathematiker Kantorovich, Dantzig und Koopmans erkannten, dass sich viele Fragestellungen zur optimalen Ressourcen- und Produktionsplanung in eine Optimierungsaufgabe mit einer linearen Zielfunktion und ein System von Nebenbedingungen aus linearen Ungleichungen überführen ließen. Als eine im Zweiten Weltkrieg beteiligte Armee stand auch die US-Army großen Aufgaben der Ressourcenplanung gegenüber. Staatstreue Mathematiker_innen wie Dantzig traten deshalb in den Dienst der US-amerikanischen Armee und standen mit den neuesten Erkenntnissen aus der Optimierung beratend zur Verfügung. Zu dieser Zeit gelang es Mathematiker_innen, Methoden der Optimierung mit passenden Ideen der Spieltheorie zum Operations Research zu vereinigen, was regen militärischen Anklang fand.¹¹ In dieser frühen Phase der linearen Optimierung wurde aufgrund der leistungsschwachen Rechenmaschinen noch großteils händisch gerechnet, was erhebliche menschliche Kapazitäten forderte und viele Optimierungsprobleme in der Realität unpraktikabel machte.

Mit dem Aufschwung der Informatik und den Computerwissenschaften in den 1960er Jahren änderte sich das schlagartig (vgl. [Tic08, S. 25-31]). Rechenintensive numerische Methoden zur Lösung von Optimierungsproblemen wurden entwickelt und die nichtlineare Optimierung, die auch nichtlineare Nebenbedingungen erlaubt, erlangte mehr und mehr Beachtung. So wurden die Anwendungsbereiche für die mathematische Optimierung sukzessive größer, es entstanden beispielsweise die Fachgebiete der numerischen, der stochastischen und der diskreten Optimierung. Die Ingenieurwissenschaften nahmen in der Regelungstechnik immer stärkeren Bezug auf die Theorien zur optimalen Steuerung (siehe Abschnitt 4.3.3) und besonders die Luft- und Raumfahrtindustrie greift heute in großem Maßstab auf Optimierungsmethoden zurück.

Wie für diesen industriellen Zweig typisch, geht mit einer zivilen Nutzung der technischen Grundlagen meist auch eine militärische einher und so laufen auch die Kooperationsvereinbarungen zwischen zivilen Forscher_innen und der Rüstungsindustrie in der Optimierung größtenteils über Drittmittelprojekte mit sowohl ziviler als auch militärischer Zielsetzung. Analog zu dieser Entwicklung sollen im Folgenden zwei größere Drittmittelprojekte aus der numerischen Optimierung mit Akteur_innen aus der militärisch genutzten Luft- und Raumfahrt analysiert werden.

Die Gewichtoptimierung von Fluggerät ist eine der Kernaufgaben von Ingenieur_innen in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Dabei kann die Bedeutung einer Gewichtsreduktion von der bloßen Minimierung des Treibstoffverbrauchs bis hin zur Gewährleistung der grundsätzlichen Flugfähigkeit des Endproduktes reichen. Neben der immer weiteren Verschlankeung und Verbesserung von Bauteilen steht für Forscher_innen aktuell ein

¹¹Nach den großen Konfliktphasen des Zweiten Weltkrieges und des Kalten Krieges verlor dieser Fachbereich allerdings für das Militär zunehmend an Bedeutung und wird bis heute eher privatwirtschaftlich und in den Wirtschaftswissenschaften genutzt.

weiterer Aspekt zur Gewichtsminimierung im Fokus: Die Applikation von Löchern im Produktionsprozess. Die Aufgabe der Wissenschaftler_innen besteht hierbei darin, die reine Masse der verbauten Materialien durch jene Löcher zu verringern und gleichzeitig die Stabilität und die Sicherheit der Konstruktion zu gewährleisten. Da die Entwicklung von Prototypen mit verschiedenen Aussparungen in den Bauteilen weder kosteneffizient wäre noch eine optimale Konstruktion gewährleisten würde, greift die Industrie zunehmend auf Methoden zur computergestützten Simulation zurück. Das Problem der optimalen Oberfläche von Bauteilen für Fluggeräte geht somit von einem augenscheinlich rein ingenieurwissenschaftlichen in ein mathematisches über. Die Methoden, derer sich Forscher_innen für diese Form der Gewichtsminimierung bedienen, stammen meist aus der hierfür entwickelten *Topologieoptimierung* – einem Teilgebiet der mathematischen Optimierung.

Als Forschungsprojekt dient zu diesem Zweck beispielsweise das in den Jahren 2006 bis 2009 beforschte EU-Projekt *PLATO-N*, welches in einem Verbund ziviler Wissenschaftler_innen sowie eurozentrisch orientierten Konzernen der zivilen und militärischen Luft- und Raumfahrt ein Softwarepaket zur computerbasierten Strukturoptimierung hervorbrachte (vgl. [107] und [108]). Die mathematischen Komponenten der Topologieoptimierung wurden dabei großteils von Forscher_innen der Universitäten Erlangen, Würzburg und Bayreuth bearbeitet (vgl. [109] und [Eur11]).

Das Projekt *PLATO-N* wurde in mehrere Schritte unterteilt, die der Vermittlung zwischen den Industriepartner_innen und den universitären Forscher_innen dienen sollten. Die im Einzelnen behandelten Themen waren:

1. Anforderungen der Industrie an ein Programm der Strukturoptimierung (z. B. grafische Benutzer_innenoberfläche, Stufen des Designprozesses, Spezifizierung und Priorisierung der Aufgaben von Ingenieur_innen während des Prozesses)
2. Stand der mathematischen Forschung und nützliche Methoden für die Strukturoptimierung (z. B. Optimierung mit einer sehr großen Anzahl an Variablen, Techniken der Materialoptimierung)
3. Grenzen der bekannten Methoden und Implementierung problemspezifischer Lösungen (z. B. Verwendung der Topologieoptimierung, Behandlung von Teilproblemen, numerische Approximation der Lösungen)
4. Zusammengefasste Softwareentwicklung, Auswertung und Tests (z. B. Zusammenführung der mathematischen Einzelkonzepte, Programmierung der Rechenkomponenten, Überprüfung der initial formulierten Voraussetzungen)

Die beteiligten Industriepartner_innen *EADS*, *Airbus UK* und *Eurocopter* sind alle Luft- und Raumfahrtunternehmen mit einer stark vertretenen Rüstungssparte.¹² Sie formulierten die Vorgaben des Projektes in Schritt 1 und stellten so den Anwendungsbezug des Vorhabens sicher. Die übrigen Projektschritte bedurften aktueller Methoden

¹²Genauer sind alle drei Unternehmen inzwischen eingegliedert in den weltweit zweitgrößten Rüstungskonzern *Airbus SE*.

aus der numerischen Optimierung sowie der Topologieoptimierung und behandelten die Implementierung dieser Konzepte. Sie wurden am Institut für angewandte Mathematik der Universität Erlangen, dem Institut für Mathematik der Universität Würzburg und dem Institut für Informatik der Universität Bayreuth bearbeitet.

Das Projekt PLATO-N steht somit exemplarisch für industriell orientierte Auftragsforschung an mathematischen und informatischen Instituten deutscher Universitäten, deren Fragestellung genau auf die beteiligten Unternehmen zugeschnitten wird. Finanziell gefördert wurde das Projekt allerdings nicht durch die davon profitierenden Konzerne selbst, sondern durch Drittmittel der Europäischen Union. Die Forschungsergebnisse stehen den beteiligten Unternehmen schließlich frei zur Verfügung. Sie können dann zwar zivil genutzt werden, die äußerst starken Rüstungssparten der Industriepartner_innen implizieren jedoch eine mindestens ebenso präzise militärische Verwendung des PLATO-N-Systems.

Eine weitere populäre Optimierungsaufgabe in der Luft- und Raumfahrt betrifft die Abdeckung von Zielgebieten durch Aufklärungssatelliten. Im Rahmen der Umweltbeobachtung und der militärischen Überwachung aus dem Weltraum soll sichergestellt werden, dass die eingesetzten Satelliten möglichst große Bereiche der Erdoberfläche ohne allzu hohe Redundanz beobachten können. Meist werden Aufklärungssysteme in einer Kombination mehrerer Einzelsatelliten realisiert, die Bildmaterial bestimmter Teile der Erdoberfläche akquirieren und anschließend zu einem möglichst lückenlosen Ganzen zusammensetzen sollen. Zusätzlich soll oft – je nach Priorität und unter Berücksichtigung zeitkritischer Faktoren der Beobachtungen – ein gewisser Anteil des Gebietes in festgelegten Zeitintervallen mehrmals überflogen werden. Dabei ergeben sich verschiedene Einzelprobleme auf der Makro- und Mikroebene, die sich zu einem komplexen Gesamtproblem fügen. Zunächst muss sichergestellt werden, dass die Einzelsatelliten in Umlaufbahnen fliegen, die eine gewünschte Beobachtung des Zielgebietes überhaupt ermöglichen – es wird also an erster Stelle nach einer optimalen Konstellation der Raumflugkörper gesucht. Ist dies geschehen, diktieren zusätzlich die Ressourcen der Einzelsatelliten Einschränkungen der Bildgebung: Begrenzter Speicherplatz für Bilddaten, Stromausfälle bei Sonnenschatten und Totzeiten der Aufnahme während des Kontakts mit Bodenstationen erschweren eine kontinuierliche und lückenlose Erdüberwachung erheblich.

Mit dieser Problematik beschäftigten sich in den Jahren 2007 bis 2008 auch Mathematiker_innen an der Universität Bremen (vgl. [110] und [111]). Der Konzern *Orbitale Hochtechnologie Bremen* (kurz: *OHB*) gab am *Zentrum für Technomathematik* zwei Drittmittelprojekte in Auftrag, die einer Optimierung von Satellitenkonstellationen mehrerer Überwachungssatelliten und den Betriebszeitplänen der eingesetzten Einzelsatelliten zuarbeiten sollten. Die Aufgabe für die beteiligten Mathematiker_innen war daher die Bearbeitung zweier verschiedener Optimierungsprobleme und die entsprechende Implementierung möglichst universell einsetzbarer Software-Tools.

Die erste Problemstellung verlangt nach einem Programm zur Ermittlung einer optimalen Konstellation einer gewissen Anzahl an Satelliten im Sinne einer Ma-

ximierung des beobachtbaren Bereiches der Erdoberfläche. Dabei ergeben sich als Nebenbedingungen der Optimierungsaufgabe beispielsweise das gewünschte Zielgebiet und die Forderung nach ein- oder mehrfachen Besuchen gewisser Bereiche dessen (vgl. [KB10]). Anschließend soll eine Softwarelösung die optimalen Betriebszeitpläne der einzelnen Satelliten festlegen können. Die Beobachtungs- und Sendezeiträume eines Satelliten sollen so getaktet werden, dass vom überflogenen Bereich der Erdoberfläche ein möglichst großer Teil auch in Bilddaten abgespeichert und an die Bodenstationen geschickt werden kann (vgl. [TBK08]). Die Aufgabe ist es daher, das beobachtete Gebiet eines einzelnen Satelliten zu maximieren, diesmal allerdings unter weitaus komplexeren Nebenbedingungen: Nicht nur soll ein Ein- oder Mehrfachbesuch bestimmter Teile der Erdoberfläche möglich sein, es müssen auch in gewissen Intervallen Bodenstationen in Sendereichweite des Satelliten sein und die strombedingten Ausschaltzeitpunkte der Sensorik berücksichtigt werden können. Die Forscher_innen mussten zu diesem Zweck zunächst die reale Fragestellung mit den wichtigsten Restriktionen in nichtlineare Optimierungsprobleme überführen und anschließend iterative Verfahren zur Approximation einer optimalen Lösung derselben implementieren. Nach einem knappen Jahr Forschungszeit stellten die beteiligten Bremer Mathematiker_innen die fertigen Programme für OHB vor – sie vereinfachten damit die Verwendung von Aufklärungssatelliten erheblich und nachhaltig (vgl. [112]).

OHB besitzt neben zivilen Geschäftsfeldern auch eine äußerst präzise Rüstungssparte – so war das Unternehmen beispielsweise leitend für den Bau der Bundeswehr-Spionagesatelliten *SAR-Lupe 1* bis *5* verantwortlich (vgl. [28]). Es ist dabei offensichtlich, dass die Bremer Forscher_innen mit der Auftragsarbeit für OHB auch der Umsetzung militärischer Projekte zugearbeitet haben: Die Optimierungsprogramme wurden erstmals im SAR-Lupe-System eingesetzt (vgl. [113]). Obwohl die Universität Bremen zur Zeit des Forschungsprojektes eine Zivilklausel besaß, berichtete die Pressestelle äußerst freigiebig und positiv über die kriegsrelevante Drittmittelkooperation (vgl. [112]).

4.3.2 Militärisches Interesse an Studierenden der Numerik

Ein weiteres mathematisches Forschungsgebiet, welches sich mit der Modellierung realer Problemstellungen und einer möglichst treffenden rechnerischen Lösung befasst, ist die *numerische Mathematik* (kurz: *Numerik*). Numerische Methoden werden vor allem bei Aufgabenstellungen verwendet, die für eine exakte analytische Bearbeitung ungeeignet sind und daher einer approximativen Lösung bedürfen. Dabei kann sich die Notwendigkeit von Näherungsmethoden sowohl aus der Ungenauigkeit von empirisch erfassten Messwerten als auch aus der Komplexität einer mathematischen Aufgabenstellung ergeben, für die sich entweder keine exakte Lösung finden lässt oder deren Lösung für die reale Problemstellung zu zeitaufwändig wäre. Die diesbezüglichen Arbeitsschritte umfassen typischerweise die Modellierung eines realen Problems in einen mathematischen Kontext, die Entwicklung und Implementierung eines numerischen Lösungsalgorithmus sowie die Validierung der Approximationsmethoden

bezüglich der Genauigkeit ihrer Lösung und der Fehleranfälligkeit im Rechenprozess. Das aktuell durch numerische Lösungsverfahren bediente Spektrum umfasst unter anderem Interpolationsaufgaben auf diskreten Messwerten, algorithmische Methoden zur Integralrechnung sowie die approximative Lösung und Visualisierung von partiellen Differentialgleichungen. Der Schritt der Modellierung beschäftigt sich meist mit ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen oder Problemen aus der Physik; die anschließende algorithmische Lösung und die Fehleranalyse sind größtenteils in der Mathematik und teilweise auch in der Informatik verortet. Somit nimmt die Numerik eine wichtige Rolle zwischen ingenieurwissenschaftlichen und physikalischen Problemstellungen und der algorithmischen Umsetzung einer mathematischen Lösung ein – sie bildet gemeinsam mit informatischen Überlegungen zur Rechenzeit und zu maschinell bedingten Rechenfehlern einen bedeutenden Teil des *Wissenschaftlichen Rechnens*¹³. Die Literatur zur Numerik umfasst zentrale mathematische Einführungswerke wie [SK11], [SWP12] und [Dzi10], Abhandlungen aus dem Wissenschaftlichen Rechnen wie [Tur00], [TLNC10] und [Str07], Publikationen bezüglich numerischer Methoden in den Ingenieurwissenschaften und der Physik wie [DR06], [BM04] und [Won03] sowie intra- und interdisziplinäre Konferenzbände wie [BGH⁺00], [Bä03] und [NTG16].

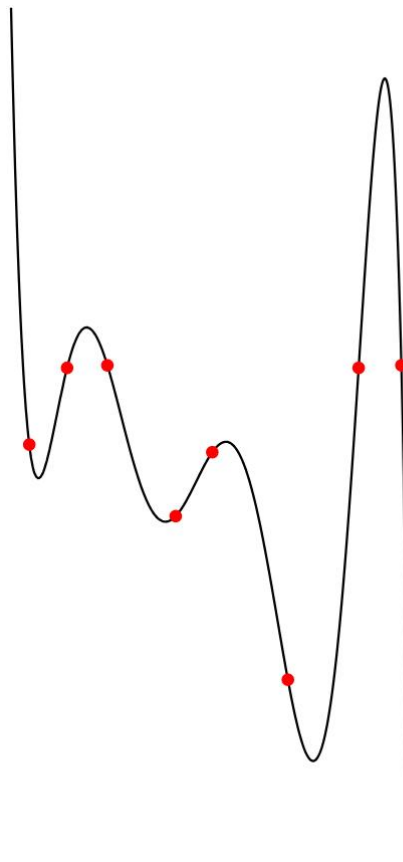


Abbildung 4.5: Interpolationspolynom 7. Grades.

¹³englisch auch: *Scientific Computing* oder *Computational Science and Engineering*

Ein einfaches Beispiel numerischer Aufgabenstellungen ist die Polynominterpolation (vgl. [SK11, S. 92-95]): Gegeben sind $n + 1$ voneinander verschiedene Stützstellen $x_0, \dots, x_n \in \mathbb{R}$ und zugehörige Stützwerte $y_0, \dots, y_n \in \mathbb{R}$. Gesucht ist ein Polynom

$$p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$$

höchstens n -ten Grades, das die Interpolationsbedingung

$$p(x_i) = y_i, \quad i = 0, \dots, n$$

erfüllt. Nach theoretischen Erkenntnissen der numerischen Mathematik existiert zu konkreten Stützpunkten (x_i, y_i) , $i = 0, \dots, n$, stets ein eindeutiges Interpolationspolynom. In der sogenannten *Lagrange-Schreibweise* lautet dieses:

$$p(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x) \quad \text{mit} \quad l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}.$$

Interpolationspolynome lassen sich zum Beispiel für die grafische Darstellung von physikalischen Messwerten oder für eine näherungsweise Bestimmung von Zuständen, die nicht in diskreten Messvorgängen erfasst wurden, verwenden.

Die Geschichte der Numerik beginnt sehr viel früher als die der mechanischen Rechenmaschinen oder Computer. Sie ist so alt wie der Wunsch nach mathematischen Näherungsmethoden für komplexe Rechenprobleme (vgl. [ZZZ07, S. 52-88]). Schon in der Antike formulierte Archimedes (um 250 v. u. Z.) Algorithmen für die approximative Bestimmung der Kreiszahl π und für die Lösung von Integrationsaufgaben. Verfahren zur näherungsweisen Wurzelberechnung sollen sogar bereits vor knapp 4000 Jahren in Mesopotamien bekannt gewesen sein. Im Sinne pragmatischer Approximationsverfahren für händische Rechnungen blieb die Numerik über die Jahrhunderte ein zentraler Aspekt der angewandten Mathematik (vgl. [Gol77, S. 119-260]): In Europa entwickelte Isaac Newton Mitte des 17. Jahrhunderts ein erstes iteratives Verfahren zur Lösung nichtlinearer Gleichungen, Joseph-Louis Lagrange erforschte im Laufe des 18. Jahrhunderts Methoden der Funktionsinterpolation und Carl Friedrich Gauß ergänzte die Werkzeuge der numerischen Mathematik im 19. Jahrhundert um mehrere Algorithmen zur Lösung linearer Gleichungssysteme.

Die Zeit des Zweiten Weltkrieges und die beträchtlichen Fortschritte in der Entwicklung moderner Computer während des Kalten Krieges verhalfen den Methoden der Numerik zu immer größerer militärischer Bedeutung. So entwickelte beispielsweise John von Neumann im Rahmen des Manhattan-Projekts ein erstes numerisches Verfahren zur approximativen Lösung hyperbolischer partieller Differentialgleichungen, das den Bau der Plutoniumbombe beschleunigte, welche schließlich 1945 über Nagasaki abgeworfen wurde (vgl. [Bru15]). Das prestigeträchtige Eifern um die Vormacht im Weltraum zwischen der Sowjetunion und den USA im Laufe des Kalten Krieges leistete der numerischen Betrachtung sogenannter *Wiedereintrittsprobleme* Vorschub,

die sich mit der Trajektorie und Bewegungsrichtung eines Raumflugkörpers beim Atmosphäreneintritt befassen (vgl. [Bab98, S. 149-151]). Trotz der zu dieser Zeit fundamentalen Ergebnisse für militärische Anwendungen blieb an der Numerik ein Image als Hilfswissenschaft innerhalb ingenieurmathematischer Anwendungen haften. Die numerischen Methoden waren meist so allgemein formuliert, dass sie nicht einer bestimmten technischen Fragestellung dienten, sondern in Forschungsprojekten unterschiedlichster Zielsetzung angewandt werden konnten, um die stupide und oft zeitaufwändige Rechenarbeit zu verringern. Das hatte zur Folge, dass Numeriker_innen nur selten mit der konkreten Bearbeitung eines Problems betraut wurden, die Methoden der Numerik aber in technischen Lösungsprozessen meist eine zentrale Rolle spielten.

Nach der Phase des Kalten Krieges wurden die Verfahren zur approximativen Lösung partieller Differentialgleichungen auch für die zivile Luft- und Raumfahrt und ebenso für die Automobil- und Werkstoffindustrie immer wichtiger. So ist beispielsweise die *Finite-Elemente-Methode* (kurz: *FEM*) ein Standardwerkzeug in Entwicklungsprozessen, um Spannungen, Verformungen oder die Wärmeausbreitung in Materialien zu simulieren (vgl. [KW99, S. 1-8]). Doch trotz der Bedeutung numerischer Methoden für die zivile Produktion werden die Approximationsverfahren selbstverständlich auch weiterhin militärisch genutzt. Mit Blick auf den oben genannten hilfswissenschaftlichen Charakter der numerischen Mathematik stellt sich also die Frage, wie präsent das militärische Interesse an der Numerik in der zivilen Forschungslandschaft überhaupt ist.

Bei einer ersten Recherche bezüglich der Drittmittelprojekte in der Numerik fällt auf, dass universitäre Lehrstühle kaum direkte Gelder von rüstungsrelevanten Unternehmen oder militärischen Institutionen erhalten. Die meisten Drittmittel stammen aus Töpfen der Deutschen Forschungsgemeinschaft und viele weitere Forschungs Kooperationen finden in Clustern universitärer Wissenschaftler_innen statt – die Forschungspraxis an den Hochschulen suggeriert damit, dass der Fokus eher auf theoretischen Aspekten der numerischen Mathematik liegt. Diesem Anschein entgegen steht die zentrale Bedeutung, die Methoden aus der Numerik in der militärischen Anwendung zukommt: Die bereits oben genannten Flugbahnrechnungen ballistischer Raketen, Simulationsverfahren mithilfe der Finiten-Elemente-Methode in der militärischen Luft- und Raumfahrt und die Lösung von Wiedereintrittsproblemen für Raumflugkörper sind militärrelevante Aufgabenstellungen, die einer teils sehr tiefgehenden Bearbeitung aus der numerischen Forschung bedürfen. Eine weit verbreitete Taktik von Unternehmen bezüglich der Wissensakquise aus der Numerik ist es, Studierende durch attraktive Praktika, Werkstudierendenstellen oder Themen für Abschlussarbeiten anzuwerben, um damit kostengünstig und projektspezifisch auf ihr Forschungspotential zugreifen zu können. In welcher Form dabei militärische Interessenträger_innen Forschungsergebnisse aus der Numerik einwerben und wie präsent militärische Fragestellungen und Interessen in der Studienlandschaft sind, soll im Folgenden anhand einiger Beispiele verdeutlicht werden.



Abbildung 4.6: Taurus KEPD 350 Marschflugkörper (an der Produktion beteiligt: MBDA) mit einem Eurofighter Typhoon (an der Produktion beteiligt: Cassidian).

Der erste Kontakt von Studierenden mit größeren Konzernen findet oft über ein Praktikum oder einen Nebenjob statt. Mathematikstudent_innen mit Kenntnissen der numerischen Mathematik werden dabei vor allem von Ingenieurbüros oder Unternehmen mit Produktionssparte angeworben. Gerade auch Rüstungskonzerne und Dienstleister_innen für die militärische Luft- und Raumfahrt sehen in diesem Ansatz eine günstige Möglichkeit, fachlich gebildete, billige Aushilfskräfte anzuwerben, diese für militärrelevante Problemstellungen zu begeistern und im Optimalfall auch für den Berufseinstieg an das Unternehmen zu binden. Ein Beispiel für die Präsenz der Waffenindustrie in der zivilen Studienlandschaft ist das Vorgehen bayerischer Rüstungskonzerne in der Nachwuchsgewinnung. Seien es militärische Luft- und Raumfahrtkonzerne wie *Airbus Helicopters* (ehemals *Eurocopter*) in Donauwörth, Testdienstleister_innen wie die *Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft* (kurz: *IABG*) in Ottobrunn oder Hersteller_innen von Lenkflugkörpern wie die *MBDA Missile Systems* in Schrobenhausen:¹⁴ Sie alle werben an den nahegelegenen Universitäten und

¹⁴Airbus Helicopters und MBDA gehören beide zur *Airbus Group*, die sich im Jahr 2014 aus EADS gründete (vgl. [114]).

Hochschulen mit Betriebspraktika und Werkstudierendenstellen. Besonders relevant wird dies an Universitäten, die den Studierenden ein Betriebspraktikum vorschreiben, wie beispielsweise im Falle des Mathematikstudiums an der Universität Augsburg (vgl. [Mat16, S. 26], [Ins11], [Ins12] sowie [Ins13]). Fast kein Jahr vergeht, ohne dass erfolgreich Praktika zwischen der Universität und den Rüstungskonzernen an Studierende der numerischen Mathematik vermittelt werden. Die Angebote für Studierende reichen dabei von einer Initiativbewerbung beim jeweiligen Rüstungskonzern bis zur konkreten Ausschreibung von Tätigkeitsfeldern, oft mit der Aussicht auf eine spätere Festanstellung (vgl. z. B. [115] und [116]). Im Falle einer Praktikumsstelle der MBDA aus dem Jahr 2016 sollten die Studierenden beispielsweise eine Fehleranalyse bei der Konstruktion von 3D-Modellen aus 2D-Zielbildern durchführen. Die Generierung eines dreidimensionalen Oberflächenmodells aus zweidimensionalen Bilddaten ist zentrale Aufgabe für die Zielfindung in Waffensystemen – oft ist die Topologie der Landschaft für die Zielgenauigkeit eines Lenkflugkörpers essentiell, damit die Waffensteuerung eventuelle Bodenerhebungen berücksichtigen kann. Die Berechnungen, die dabei durchgeführt werden müssen, sind aufgrund ihrer Komplexität und der großen Menge an Eingabedaten immer approximativ und damit fehleranfällig. Die Implementierung möglichst genauer Näherungsmethoden und der konstruktive Umgang mit Messfehlern mittels entsprechender Programme des wissenschaftlichen Rechnens wie *MATLAB* oder *Scilab* entstammt direkt dem Studienbereich der Numerik und erklärt die besondere Attraktivität von Mathematikstudierenden für die MBDA.

Eine zweite vielversprechende Möglichkeit für die Waffenindustrie, Studierende quasi unmittelbar aus dem universitären Alltag zu rekrutieren, ist die externe Betreuung mathematischer Abschlussarbeiten oder Dissertationen. Ein in diesem Bereich sehr aktiver Konzern ist wieder die Airbus Group – auch deutschlandweit – und deren Geschäftsbereich *Airbus Defence and Space*, der sich aus den Unternehmen *Cassidian*, *Airbus Military* und *Astrium* zusammensetzt. So wurden beispielsweise am Zentrum für Technomathematik der Universität Bremen in der *AG Numerik partieller Differentialgleichungen* im Jahr 2005 zwei Diplomarbeiten zu Gravitationsproblemen der Raumfahrt und zur Flugmanöversimulation von EADS betreut und im Jahr 2012 am Institut für numerische Mathematik der Universität Ulm eine Dissertation für den Waffenfabrikanten Cassidian angefertigt (vgl. [117] sowie [Spr12]). Die Doktorarbeit für Cassidian befasste sich dabei mit der simultanen Verfolgung mehrerer Ziele durch Überwachungs- und Aufklärungssysteme. In der Dissertation werden verschiedene Algorithmen und Methoden des *Multi-Target Tracking*¹⁵ analysiert, verglichen und schließlich ein neues, vollautomatisiertes Trackingsystem implementiert. Aufgrund der enormen Masse an Sensordaten, die ein Überwachungssystem verarbeiten muss, kann eine sinnvolle Rechenzeit nur durch die Optimierung der verwendeten Rechenoperationen und -methoden gewährleistet werden – eine zentrale Aufgabe der numerischen Mathematik. Während in der Dissertation fast ausschließlich von der Zielverfolgung zu Überwachungszwecken („surveillance systems“) gesprochen wird, ist zu beachten,

¹⁵also der gleichzeitigen Verfolgung mehrerer Ziele

dass Cassidian auch mit der Entwicklung offensiver Waffensysteme betraut war (vgl. [118] sowie [119]) und die Implementierung des Programmes daher mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ebenso einer Zielauswahl für Kampfflugzeuge und Lenkwaffen galt. Weiter war die Verfasserin der Doktorarbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Ulm angestellt und erhielt ein Stipendium des Landes Baden-Württemberg für die Zusammenarbeit mit dem Rüstungskonzern (vgl. [Spr12, S. 265] und [120]). Das bedeutet, dass die von Cassidian beauftragte und auf die Unternehmensbedrfnisse zugeschnittene Kriegsforschung von einer zivilen Universität und zusätzlichen Fördertöpfen des Landes finanziert wurde. Dem Unternehmen war es somit möglich, auf aktuellste Forschungsergebnisse der Numerik zuzugreifen und sie gleichzeitig äußerst kostengünstig auf seine spezifischen Anforderungen zuschneiden zu lassen.

Die Möglichkeit zur Kooperation mit Studierenden der numerischen Mathematik wird Rüstungsunternehmen an vielen zivilen Hochschulen gegeben. Oft befürworten Professor_innen die Eigeninitiative der Studierenden bei der Wahl des Abschlussarbeitsthemas und teilweise haben die Dozierenden auch Verbindungen zur Industrie, auf die sie interessierte Student_innen hinweisen können. Auf die ethischen Fragen, die sich bei militärrelevanter Forschung ergeben, wird dabei von Lehrstuhlseite nur äußerst selten eingegangen; viel häufiger bewerben mathematische Institute und Fakultäten die einmaligen Chancen, die sich den Studierenden bei einem Praktikum oder einer externen Abschlussarbeit für den Berufseinstieg bieten.

4.3.3 Wissenschaftlich-militärische Kollaboration in der Kontrolltheorie

Ein wichtiger Bestandteil der Ingenieurwissenschaften ist die Entwicklung sogenannter *Regler*. Bei technischen Systemen ist es oft wünschenswert, gewisse Zustände herbeizuführen, diese zu halten und eventuelle Störungen auszugleichen. Im Optimalfall werden jene Aufgaben von einem automatischen Regler erfüllt, der anhand eines momentanen Systemzustandes und des ihm bekannten Soll-Zustandes einen korrigierenden Einfluss (auch: *Feedback*) auf das Gesamtsystem nimmt. Solche Regler finden sich beispielsweise in der Flugstabilisierung von Luftfahrzeugen und Lenkflugkörpern, dem Druckausgleich in einem Dampfkochtopf oder der Temperaturregulierung eines Heizkörpers durch ein Thermostat. Die Regelungstechnik (auch: technische Kybernetik) stellt die ingenieurwissenschaftliche Grundlage für einen Reglerentwurf dar. Dabei ist der Aufgabenbereich der Regelungstechnik so groß, wie die realen Anwendungsgebiete komplex sind: Oft soll ein System sogar unter eingeschränkter Beobachtbarkeit der Zustände beliebig steuerbar oder stabilisierbar sein und gleichzeitig sollen die Kosten oder ungewünschte Ausreißer der Regelung minimiert werden.

Statt allerdings versuchsweise Regler für ein System zu entwerfen, mehrere Prototypen zu entwickeln und den besten zu verwenden, ist es weitaus sinnvoller das System zunächst modellhaft zu betrachten und mit möglichst umfassenden theo-

retischen Überlegungen den konkreten Entwurf zu vereinfachen. Zu diesem Zweck entstand das mathematische Pendant zur Regelungstechnik: die Kontrolltheorie. Sie befasst sich allerdings nicht nur mit technischen Gegebenheiten, sondern beispielsweise auch mit Fragestellungen aus den Wirtschaftswissenschaften oder den experimentellen Naturwissenschaften. Dort, wo die Auswirkungen eines Eingriffes in ein bestehendes oder geplantes System betrachtet werden, sollen die Methoden der Kontrolltheorie helfen zu abstrahieren, die Systemeigenschaften zu analysieren und gegebenenfalls einen geeigneten Regler zu konstruieren. Die mathematischen Arbeitsschritte bei einem konkreten Problem umfassen dabei meist die Modellierung einer realen Situation in ein dynamisches System – wie etwa ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem –, die anschließende Analyse der relevanten Systemeigenschaften – beispielsweise Beobachtbarkeit, Steuerbarkeit oder Stabilisierbarkeit – und die Entwicklung eines Reglermodells unter gewissen Voraussetzungen – wie etwa einer Kostenminimierung mithilfe der optimalen Steuerung. Damit stellt die Kontrolltheorie nicht nur ein stark interdisziplinär verortetes Fachgebiet der Mathematik dar, sondern auch eines, das sich so sehr wie fast kein anderes an der konkreten Anwendung der theoretischen Methoden orientiert und misst. Die Fachliteratur zur Kontrolltheorie besteht in diesem Sinne aus mathematischen Grundlagenwerken wie [KK85], [Lei04] und [Vin10], interdisziplinär geprägten Publikationen wie [Ro73], [JSD15] und [Rei14] sowie zahlreichen Konferenzbänden wie [BPOZ15], [DLLR94] und [HCPM09].

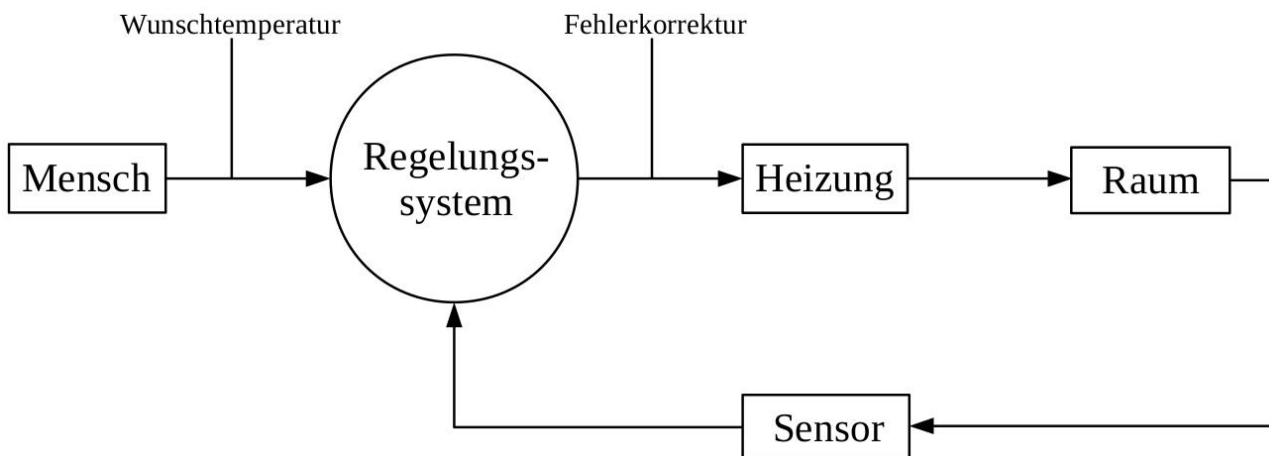


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung einer Heizungsregelung.

Ein weit verbreitetes Einführungsbeispiel zur Kontrolltheorie ist die Darstellung einer Heizungsregelung mittels eines linearen Kontrollsystems (vgl. [Gru05, S. 2, 28-29]). Zunächst wird die Problemstellung der Heizungsregelung mathematisch modelliert: In einem Raum soll die Temperatur x_1 zu einem bestimmten Messpunkt geregelt werden. Der gewünschte Wert sei dabei auf $x_1^* = 0$ normiert. Im Raum befindet sich ein Heizkörper mit der Temperatur x_2 , der mit einem Thermostat versehen ist und so durch eine Kontrolle u geregelt werden kann. Die Veränderung von x_2 sei durch die Differentialgleichung $\dot{x}_2(t) = u(t)$ beschrieben, der Regler u sorgt also für eine

Zunahme (falls $u > 0$) oder eine Abnahme (falls $u < 0$) der Heizungstemperatur. Angenommen für die Temperatur x_1 im Messpunkt gelte die Differentialgleichung $\dot{x}_1(t) = -x_1(t) + x_2(t)$. Für eine konstante Heiztemperatur x_2 ergibt sich dann

$$x_1(t) = e^{-t}x_1(0) + (1 - e^{-t})x_2,$$

das heißt die Raumtemperatur x_1 konvergiert im Messpunkt exponentiell gegen die Temperatur des Heizkörpers.¹⁶ Aus den obenstehenden Modellannahmen lässt sich nun ein lineares Kontrollsystem formulieren:

$$\text{Für } x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} \text{ gilt } \dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(t).$$

Die Wahl der Kontrolle u ergänzt den Aspekt der Modellierung um logische Überlegungen zu einer sinnvollen Regelstrategie. Ein simpler erster Ansatz für das Thermostat wäre es etwa, die Kontrolle u linear von der Raumtemperatur x_1 abhängen zu lassen. Im Falle eines zu warmen Raumes ($x_1 > x_1^* = 0$) sollte die Heiztemperatur x_2 vermindert werden, also $u < 0$ gelten, im Falle eines zu kalten Raumes $u > 0$. So lässt sich u beispielsweise als $u = -\lambda x_1$ mit $\lambda > 0$, in Matrix-Schreibweise als $u(t) = \begin{pmatrix} -\lambda & 0 \end{pmatrix} x(t)$, wählen. Das lineare Kontrollsystem wird dann vereinfacht zu

$$\dot{x}(t) = Ax(t), \text{ mit } A = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ -\lambda & 0 \end{pmatrix}.$$

Um die Güte der Kontrolle u zu überprüfen, können schließlich kontrolltheoretische Überlegungen wie solche zur Stabilität des Systems herangezogen werden, die ihren Ursprung in der Theorie zu gewöhnlichen Differentialgleichungen haben. Im Beispiel der Heizungsregelung ist anhand der Eigenwerte der Matrix A zu erkennen, dass die Kontrolle $u = -\lambda x_1$ die Raumtemperatur x_1 bei beliebigen Anfangswerten exponentiell schnell gegen $x_1^* = 0$ konvergieren lässt. Bezüglich einer Wahl der offenen Parameter und damit einer Empfehlung für den konkreten Reglerentwurf bestimmen meist modellspezifische Forderungen das weitere kontrolltheoretische Vorgehen. Im Falle der Heizungsregelung könnte beispielsweise der Parameter λ mithilfe von Optimierungsmethoden so bestimmt werden, dass Temperaturschwankungen während des Regelvorganges möglichst gering gehalten werden.

Geschichtlich ist die Kontrolltheorie ebenso eng an die ingenieurwissenschaftliche Entwicklung konkreter Regler gebunden wie die aktuelle Forschung. Seit der Verwendung erster Regelungstechniken in der Antike wechselten sich Phasen der mathematischen Analyse und des experimentellen Reglerentwurfs ab, ergänzten sich und werden heute simultan betrieben (vgl. z. B. [DB11, S. 5-9] und [Nof09]). Die frühesten Regler wurden

¹⁶Selbstverstandlich ist die Temperaturänderung von x_1 stark situationsabhängig und in diesem Falle exemplarisch. Je nach Beschaffenheit des Raumes, des Heizkörpers, der Außentemperatur und weiteren physikalischen Faktoren müsste die Differentialgleichung also eventuell noch an die realen Gegebenheiten angepasst werden.

vermutlich im antiken Griechenland während des dritten Jahrhunderts v. u. Z. zur Steuerung des Flüssigkeitspegels in Wasseruhren und Ollampen entwickelt (vgl. [Nof09, S. 53-54]). Ingenieur_innen wie Heron von Alexandria (erstes Jahrhundert n. u. Z.) und später auch arabische Forscher_innen wie Al-Jazari (13. Jahrhundert) hielten ihre Funktionsweise in Büchern fest.

Die ersten Steuerungsmechanismen im Europa der Neuzeit entstanden im Laufe des 17. und 18. Jahrhunderts zum Zweck der Temperatur-, Druck- und Geschwindigkeitsregulierung und gipfelten in einem Fliehkraftregler, der ab Ende des 18. Jahrhunderts die Arbeitsgeschwindigkeit der Dampfmaschine kontrollierte (vgl. [Nof09, S. 54-57] und [DB11, S. 5-6]). Während des 19. Jahrhunderts traten allerdings wiederholt Stabilitätsprobleme innerhalb der geregelten Systeme auf. Viele Ingenieur_innen versuchten, den neuen Aufgaben mit immer ausgefeilteren mechanischen Konstruktionen zu begegnen; Forscher_innen wie der schottische Physiker Maxwell und der russische Ingenieur Vyshnegradskii stießen schließlich eine erste mathematische Stabilitätsanalyse mithilfe von Differentialgleichungssystemen an, die bis ins 20. Jahrhundert verfeinert wurde.

In den ersten drei Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts wurden in der Forschung zur Kontrolltheorie und der Regelungstechnik wichtige Grundsteine für die im Zweiten Weltkrieg genutzte Infrastruktur und einen Teil des modernen Waffenarsenals gelegt (vgl. [Nof09, S. 57-60] und [DB11, S. 6-7]). Während in den USA der Fokus auf der praktischen Komponente der Steuerung lag – wie einer Storungsreduktion im Telefonnetz, der Entwicklung von Autopiloten für Schiffe und Flugzeuge sowie der Tiefenregulierung von Torpedos –, konzentrierten sich die Bemühungen von Forscher_innen in der UdSSR auf die kontrolltheoretische Analyse dynamischer Systeme.

Mit dem Beginn des Zweiten Weltkrieges wurden die Anwendungsbereiche für automatisierte Regler immer zahlreicher. Wurde die mathematische Theorie zuvor noch abgegrenzt zur Trial-and-Error-Taktik der Ingenieurwissenschaften behandelt, steigerten die militärischen Aufgabenstellungen das Ansehen der Kontrolltheorie erheblich und verschränkten sie immer weiter mit der Regelungstechnik (vgl. [Nof09, S. 60-63] und [DB11, S. 7-8]). Neben der schon vor dem Zweiten Weltkrieg begonnenen Forschung zu Reglern in Kommunikationsnetzen und in Autopiloten, richtete sich der Fokus ab Mitte der 1930er Jahre auf automatische Feuerleitanlagen in Flugabwehrkanonen, Aufgaben der Flugstabilisierung und die Steuerung von Lenkflugkörpern in bewegliche Ziele. Dabei war eine enge Zusammenarbeit zwischen Militär, Forschungseinrichtungen und der Industrie sowohl in den USA und Großbritannien als auch in NS-Deutschland sehr verbreitet. In der UdSSR waren industriennahe Forschungsgruppen zur Kontrolltheorie zwar vergleichsweise rar, doch die meisten offen publizierten westlichen Forschungsergebnisse waren auch dort bekannt und flossen in die technischen Entwicklungen von Waffensystemen ein.

Mit der Zeit des Kalten Krieges wurde die Relevanz einer mathematischen Analyse mittels der Kontrolltheorie für den Reglerentwurf unumstößlich (vgl. [Nof09, S. 63-65], [DB11, S. 8] und [Tic08, S. 20-24]). Im Wettlauf um die militärische Raumfahrt waren USA und UdSSR mit einigen komplexen Steuerproblemen konfrontiert: Raumfahrzeuge sollten beispielsweise storungssicher Objekte im All ansteuern oder ihnen kurzfristig

ausweichen können, Satelliten sollten in einem gewünschten Orbit gehalten werden und dies alles musste – aufgrund der strengen, gewichtsbedingten Rationierung von Treibstoff – möglichst sparsam geschehen. Die kontrolltheoretischen Methoden wurden zu diesem Zweck um Werkzeuge aus der mathematischen Optimierung erweitert und es entstand die Theorie zur *optimalen Steuerung*. Den Erfolg der optimalen Steuerung ermöglichten neben militärischen Geldgeber_innen allerdings erst die revolutionäre Erfindung des digitalen Rechners sowie Verbesserungen und Vereinfachungen im problemspezifischen Modellentwurf, wie beispielsweise die Zustandsraumdarstellung dynamischer Systeme. Ohne diese technischen und theoretischen Neuerungen wäre die optimale Steuerung zu rechenaufwändig gewesen, um praktikabel zu sein. Wie eng die Kontrolltheorie zu dieser Zeit mit militärischen Fragestellungen korrelierte, zeigt beispielsweise die Formulierung eines Maximumprinzips durch den russischen Mathematiker Pontrjagin (vgl. [BH03, S. 160-173]). Motiviert durch eine Fragestellung zweier sowjetischer Luftwaffen-Offiziere wurde vom Universitätsprofessor Pontrjagin ein zentrales Kriterium zu notwendigen Bedingungen für die Optimalität von Reglern und gleichzeitig eine Hilfestellung für eine konkrete Berechnung jener geschaffen. Noch heute ist dieses Maximumprinzip ein essentieller Bestandteil der Kontrolltheorie.

Inzwischen wurden die Anwendungsfelder von Reglern um viele nicht-militärische Fragestellungen, etwa aus der Automobilentwicklung, der Robotik oder den Wirtschaftswissenschaften, erweitert. Dennoch steht die moderne Kontrolltheorie historisch fast ausschließlich auf einem militärischen Fundament – die optimale Steuerung mit ihrem Ursprung im Kalten Krieg ist momentan das wohl am meisten beforschte Teilgebiet. Außerdem ist gerade neuere Waffentechnologie – wie etwa (teil)autonome Land-, Wasser-, und Luftfahrzeuge oder moderne Lenkwaffensysteme – weder ohne die jüngeren noch ohne die historischen Erkenntnisse zur optimalen Steuerung und zur Regelungstechnik denkbar.

Anders als bei Fragestellungen zur numerischen Optimierung (vgl. Abschnitt 4.3.1) geht dem Reglerentwurf häufig schon ein sehr konkretes Anliegen voran, das eine Unterscheidung zwischen zivilen und militärischen Forschungsprojekten möglich macht. Gerade Projekte aus der militärischen Luft- und Raumfahrt werden dabei oft mit Geheimhaltungsklauseln versehen. Jene Vereinbarungen zur Verschwiegenheit der Forscher_innen erlauben die Teilveröffentlichung von Ergebnissen meist erst einige Zeit nach dem Projektende (vgl. Musterverträge wie [121] und [Tec13, S. 58-61]). Aus diesem Grund wird der Bezug kontrolltheoretischer Forschung zu militärischen Fragestellungen vor allem auf Konferenzen und in Fachpublikationen sichtbar, die die ingenieurwissenschaftliche Komponente des Reglerentwurfs mit der mathematischen Theorie verbinden.

Bei einem Blick auf die aktuelle anwendungsbezogene Forschung zur Kontrolltheorie fällt auf, dass hierbei Probleme zur optimalen Steuerung sehr populär sind. Diesbezügliche Konferenzen und Journals lassen sich oft in den USA verorten, wo die Forscher_innen weitaus freizügiger den Militarbezug einzelner Projekte kommunizieren als in europäischen Ländern (vgl. z. B. [122] und [123] sowie [PBL10] und [HCPM09]). Die Aufgabenstellungen in Publikationen mit Beteiligung von Mathematiker_innen an

deutschen Hochschulen sind dagegen häufig in den Kontext militärischer Verteidigung eingebettet. Im Folgenden sollen drei Paper zur optimalen Steuerung vorgestellt werden, die eine Kooperation von Mathematiker_innen an deutschen Universitäten mit militärischen Interessenträger_innen exemplarisch veranschaulichen.

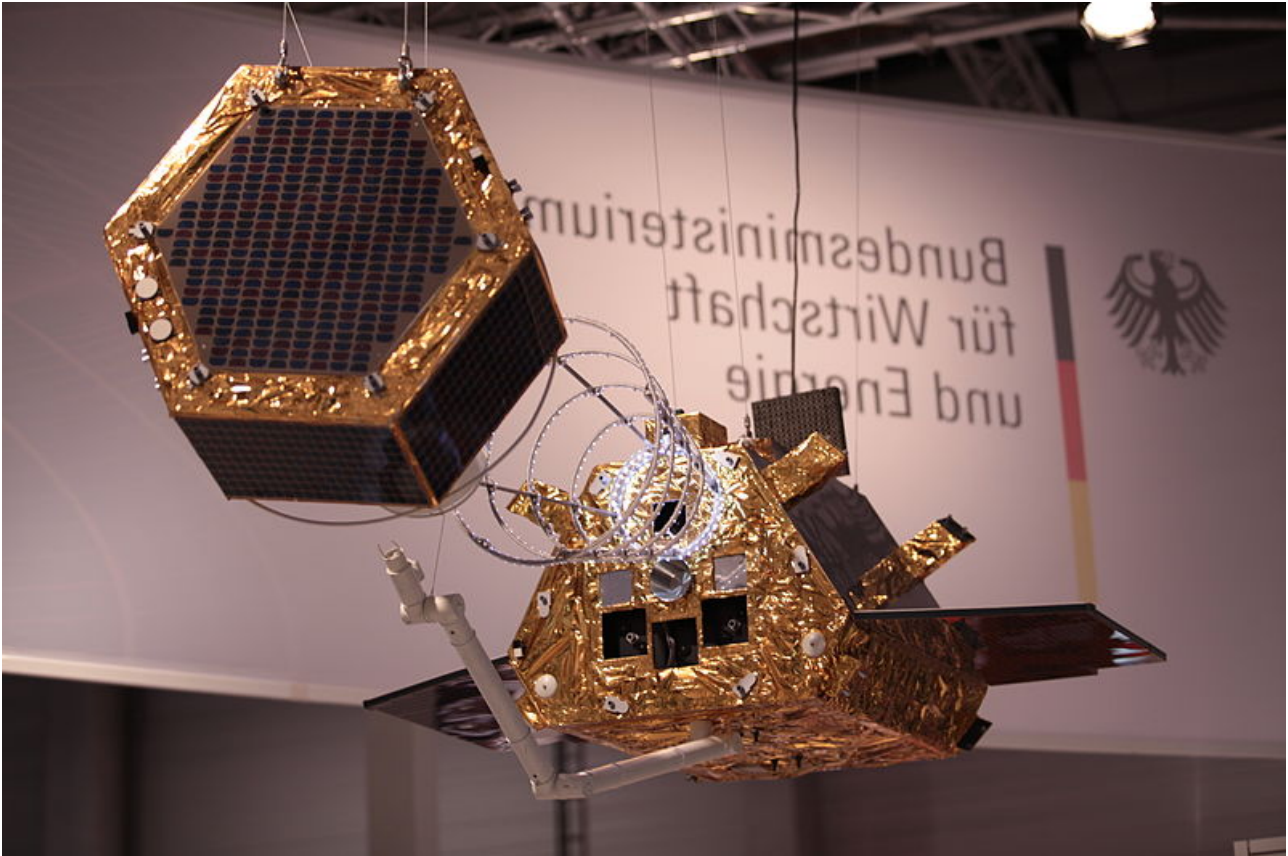


Abbildung 4.8: Ein Exponat der *Deutsche Orbitale Servicing Mission* (kurz: *DEOS*).

Ein populärer Anwendungsbereich optimaler Steuerungsmethoden ist die Kontrolle von Satelliten. Mit minimalen Kosten für Treibstoff soll ein Satellit in möglichst kurzer Zeit ein gewünschtes Verhalten zeigen – sei es das Aufrechterhalten des Erdumlaufes, das Anfliegen eines Zieles im All oder die Bewegung entsprechend eines bestimmten Flugmusters. Im Jahr 2012 stellten Mathematiker_innen der Bundeswehruniversität München und der Universität Bayreuth ihr Forschungsthema *Modelling and Optimal Control of a Docking Maneuver with an Uncontrolled Satellite* auf der *Vienna International Conference on Mathematical Modelling* (kurz: *MATHMOD*) vor (vgl. [MCP12]). Ziel des Projekts war es, ein optimales Steuerungsproblem für einen Satelliten zu formulieren, der einen Anflug für die anschließende Entfernung unkontrollierter Satelliten oder anderer ungewünschter Körper aus der Erdumlaufbahn vornimmt. Das Szenario wurde zunächst mathematisch modelliert: Die Autor_innen bildeten ein System von 21 Differentialgleichungen erster Ordnung, das die relative Position der Satelliten, deren Orientierung im Raum und die durch Triebwerke gesteuerte Kontrolle am anfliegenden Satelliten darstellt. Unter Berücksichtigung notwendiger

Nebenbedingungen – wie einem Minimalabstand zwischen den beiden Satelliten während des Zielfluges und einer Beschränkung für die Triebwerksleistung des Reglers – wurde dann ein Kostenfunktional formuliert, das mithilfe von Optimierungsmethoden den Kraftstoffverbrauch und die Anflugszeit minimieren soll. Auf Grundlage einer Zeitdiskretisierung konnte schließlich ein Programm implementiert werden, das das Optimierungsproblem bei gewählten Anfangswerten approximativ löst. Schließlich simulierten die Forscher_innen verschiedene Szenarien des Anflugs, was angeblich die Güte der vorgestellten Verfahren nachweist.

Die entwickelten Methoden sollten konkret dem deutschen Raumfahrtprojekt DEOS zuarbeiten, das eine Machbarkeitsstudie der Satellitenentfernung mit anschließender Testmission vorsah. Finanziert wurde das DEOS-Projekt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Auftragnehmer waren das DLR und Rüstungskonzerne wie *OHB* und *Airbus Defence and Space*. Im Jahr 2014 wurde die DEOS-Mission nach sechs Jahren Bearbeitungszeit und Ausgaben von 31 Millionen Euro frühzeitig beendet – im Moment wird eine mögliche Fortführung in Kooperation mit der *European Space Agency* (kurz: *ESA*) geprüft (vgl. [124]). Das DEOS-Projekt wurde also weder vom BMVg finanziert noch wurde der Mission eine militärische Problemstellung zugrunde gelegt. Woher kommt also das Interesse von Forscher_innen der Bundeswehr an der Entfernung von Satelliten? Zum einen betreibt das deutsche Militär selbst sowohl Kommunikationssatelliten (*COMSATBw*) als auch Aufklärungssatelliten (*SAR-Lupe*) (vgl. [125] und [126]), die eine Wartung im Erdorbit oder eine kontrollierte Entsorgung benötigen könnten. Zum anderen ist ein System, das Objekte aus der Umlaufbahn entfernen kann, die nicht von der Bundeswehr kontrolliert werden, immer auch eine potentielle Antisatellitenwaffe.

Ein weiterer militärischer Ansatz der optimalen Steuerung, der sich auf konkrete Waffensysteme bezieht, ist die Kontrolle von Lenkwaffen. Dabei ist eine weit verbreitete Frage in der Kontrolltheorie, welche Voraussetzungen Regler von Cruise-Missiles erfüllen müssen, damit sie ein Ziel (z. B. eine ballistische Rakete oder ein feindliches Flugzeug) auch bei Störungen und Ausweichmanövern treffen. Zwei Beispiele zu Veröffentlichungen, die sich mit der Navigation von Lenkflugkörpern beschäftigen, sind das *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference Paper Multiple Shooting Condensing for Online Gain Scheduling in Interceptor Guidance* sowie der Beitrag *Robust Missile Feedback Control Strategies* im *Journal of Guidance, Control and Dynamics* (vgl. [WST⁺14] sowie [TSWV10]). Das erste Paper beschreibt ein Projekt von Mathematiker_innen der Technischen Universität München, der Universität Marburg und Forscher_innen des *Deutsch-Französischen Forschungsinstituts Saint-Louis* – ein binationales Institut zur Kriegs- und Rüstungsforschung. Der Schwerpunkt der Forschung lag in diesem Projekt auf der Formulierung eines Algorithmus, der die Proportionalnavigation, mit der Cruise-Missiles klassischerweise in ein bewegliches Ziel gesteuert werden, um Methoden zur Anpassung des dabei verwendeten Reglers während der Laufzeit (*Online Gain Scheduling*) erweitert. Die Autor_innen stellten zunächst das Problem der optimalen Steuerung eines Lenkflugkörpers auf, das an-

schließlich mit dem sogenannten *Mehrfachschiefverfahren* in ein nichtlineares Optimierungsproblem umgewandelt wurde, welches dann anhand des *sequential quadratic programming* (kurz: *SQP*) approximativ gelöst werden konnte. Eine Simulation des Verfahrens wurde am Beispiel der Abwehr einer Interkontinentalrakete außerhalb der Erdatmosphäre vorgenommen, was in den labormäßig vereinfachten Bedingungen zu sinnvollen Ergebnissen führte. Insgesamt erhielten die Forscher_innen aufgrund der Möglichkeit, den Regler während des Fluges anzupassen, ein sehr dynamisches Modell der optimalen Steuerung, mit dem ihrer Meinung nach noch weit mehr Aufgaben als die Abwehr ballistischer Raketen bewältigt werden können. In der Tat scheint eine so verbesserte Proportionalnavigation gerade auch für komplexere Abschusszenarien – wie etwa die Verfolgung eines ausweichenden Flugzeugs – geeignet. Die Simulation des Verfahrens für andere Problemstellungen wurde allerdings in der Publikation nicht weiter ausgeführt, was vermuten lässt, dass der hierfür benötigte Rechenaufwand noch nicht praktikabel ist.

Das zweite Paper wurde von Forscher_innen der Technischen Universität Delft, des niederländischen Kriegsforschungsinstitutes *TNO Defence*, der *Netherlands Defence Academy* und des Lehrstuhles für mathematische Systemtheorie der Universität Stuttgart verfasst. Das Forschungsprojekt behandelte die Verbesserung bisher verwendeter Navigationsmodelle von Lenkflugkörpern im Sinne der Robustheit gegenüber Störungen und Ausweichmanövern des Zielobjektes. Die dabei verwendeten mathematischen Methoden sind eher technischer Natur: Zuerst wurde das Modell eines Kontrollsystems gebildet, dessen Regler von den Störungen (statt wie sonst üblich vom Systemzustand) während des Zielflugs abhängt. Dieser Ansatz hätte zwar schon zu einem besseren Verfolgungsflug der modellhaften Rakete geführt, die Rechenzeit wäre allerdings nur unter der Voraussetzung linearer Störungseinflüsse praktikabel gewesen. Da diese Störungen oft nichtlinear in das System eingehen, stellten die Forscher_innen ein Approximationsverfahren – die *full-block S-procedure* – vor, das mit dieser Nichtlinearität umgehen kann und die Anwender_innen gleichzeitig das Verhältnis zwischen Approximationsgüte und Rechenzeit bestimmen lässt. Die Autor_innen hofften, mit diesen Ergebnissen viele Abschusszenarien, die mit klassischen Methoden zuvor nicht realisierbar waren, möglich zu machen. Der Vergleich einiger Navigationsmethoden in einer anschließenden Simulation sprach für diese Vermutung. So können die Ergebnisse des Forschungsprojektes eine erhebliche Verbesserung konkreter Waffensysteme darstellen, die erst durch die Mitarbeit von Mathematiker_innen an einer zivilen deutschen Universität ermöglicht wurden.

4.3.4 Militärische Einflüsse auf die zivile Forschungs- und Studienlandschaft

Forscher_innen aus dem Bereich der Ingenieurmathematik prägen also auf unterschiedliche Weise Methoden der modernen Kriegsführung. Doch während das Bild einer militärischen Nutzung von Konzepten aus der Numerik, der Optimierung und

der Kontrolltheorie schärfer wird, stellt sich die Frage, wie sich jene wissenschaftlich-militärische Kooperation auf die einzelnen Forschungsbereiche auswirkt. Mithilfe der vorhergehenden Abschnitte lässt sich die Betrachtung von drei zentralen Aspekten militärischen Einflusses auf die Ingenieurmathematik motivieren: strukturelle Veränderungen an den Hochschulen, die Präsenz militärischer Ansätze im Studium und die Platzierung militärrelevanter Fragestellungen in der wissenschaftlichen Arbeit.

Die zunehmende Ökonomisierung deutscher Hochschulen führt zu einschneidenden strukturellen Veränderungen der zivilen Wissenschaftslandschaft (vgl. z. B. [BBB⁺10], [127] sowie [128]). Schon lange werden monetär gewinnbringende Forschungsbereiche im Vergleich zu anderen wissenschaftlichen Disziplinen bevorzugt – der Wirtschaftsfaktor von Auftragsforschung und ein damit einhergehender elitärer Ruf von Hochschulen sind hierbei wichtige Motivatoren, angeregt durch die deutsche Wissenschaftspolitik (vgl. dazu auch Abschnitt 3.3.1). Inzwischen stehen zahlreiche Vollprofessuren, beste infrastrukturelle Voraussetzungen und umfangreiche Forschungsgelder in den MINT-Fächern sowie den Rechts- und Wirtschaftswissenschaften akutem Stellen- und Raummangel, teilweise prekarierten Arbeitsbedingungen sowie dem zunehmenden Prestigeverlust in den Geistes-, Kultur- und Sozialwissenschaften gegenüber. Am Beispiel der Mathematik lässt sich diese Entwicklung auch intradisziplinär erkennen (vgl. z. B. [Ilc15, S. 28] und [Bun12]): Forschungsbereiche der angewandten Mathematik – wie etwa die Ingenieurmathematik – werden weit mehr gefördert und beworben als jene der reinen Mathematik – wie etwa die Algebra oder die Analysis. Diese Umstrukturierung der Forschungslandschaft ist zwar eine allgemeine Folge der Ökonomisierung von Hochschulen und damit nicht ausschließlich militärischen Ursprungs. Im Falle der Mathematik sind es allerdings ebenjene militärischen Fragestellungen, die den historischen „Aufstieg“ und die aktuelle Bedeutung der Ingenieurmathematik erklären.

Ein weiterer wichtiger Anknüpfungspunkt für militärische Interessen in der Ingenieurmathematik ist die Studienlandschaft. Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 dargestellt, sind Fragestellungen zur Kriegsführung vor allem in den Werkstudierendenstellen, den Betriebspraktika und den Abschlussarbeiten mit Bezug zur numerischen Mathematik präsent. Aber auch im Studium der Optimierung und der Kontrolltheorie fehlt die militärische Komponente nicht. Oft im Zusammenhang mit der geschichtlichen Entwicklung oder der aktuellen Anwendung ingenieurmathematischer Methoden wird in den Vorlesungen anhand von Beispielen der militärische Nutzen der Forschung veranschaulicht. Geschieht dies unreflektiert und ohne offene Diskussion mit den Studierenden wird das Bild vermittelt, die Rüstungsindustrie und militärische Institutionen seien vollkommen normale Arbeitgeber_innen für Mathematiker_innen. So sorgen die an dieser Praxis beteiligten Hochschulen und Professor_innen – bewusst oder unbewusst – dafür, dass militärische Fragestellungen für die Studierenden zu einem wichtigen Teil der angewandten Mathematik werden.

Das dritte große Feld der militärischen Einflussnahme auf die Ingenieurmathematik ist die Platzierung von kriegsrelevanten Themen in der zivilen Forschung. Während die zuvor genannten Abschlussarbeiten in der Numerik einen Teil davon darstellen, findet sich ein anderer in den Forschungsprojekten, den Veröffentlichungen und den

Konferenzen zur Optimierung und der Kontrolltheorie. Was die beteiligten Wissenschaftler_innen, Unternehmen und Institutionen mit diesen Kooperationen erreichen ist aber weit mehr als nur die Gangbarmachung von mathematischen Methoden für die moderne Kriegsführung: Master- und Diplomarbeiten prägen als wissenschaftliche Arbeiten (vgl. [Kul03, S. 3]) das Verständnis der Studierenden von Wissenschaft mit, Fachkonferenzen und -publikationen erzielen eine ähnliche Wirkung in der gesamten Forschungslandschaft.

4.3.5 Zwischenfazit zur Technomathematik

In der Geschichte der Ingenieurmathematik spielen militärische Fragestellungen eine zentrale Rolle. Denn Überlegungen zur militärisch genutzten Luft- und Raumfahrt sowie zur Waffenproduktion haben einige bedeutende Forschungsansätze in der Kontrolltheorie und der Numerik erst hervorgebracht. Noch heute arbeitet die Ingenieurmathematik neben dem zivilen produzierenden Gewerbe vorwiegend jenen militärischen Industriezweigen zu. Ob über Drittmittelprojekte mit Dual-Use-Charakter in der Optimierung, die Förderung kriegsrelevanter Studienleistungen in der Numerik oder die militärisch-wissenschaftliche Kooperation in der Kontrolltheorie – die Ingenieurmathematik bildet das theoretische Fundament für wichtige Technologien der modernen Kriegsführung. Die optimale Ablaufplanung von Prozessen in militärischen Spionagesatelliten, numerische Verfahren zur Zielbildgenerierung für Kampfflugzeuge oder die optimale Steuerung eines Lenkflugkörpers mit Tötungszweck: Sie alle wären in ihrer derzeitigen Form ohne die Mithilfe von Mathematiker_innen undenkbar. Gleichzeitig öffnen die zunehmende Ökonomisierung der Hochschulen und ein fehlender Diskurs über Forschungsfolgen die Wissenschafts- und Studienlandschaft in der Ingenieurmathematik für militärische Fragestellungen. Dabei haben Militär und Rüstungskonzerne – ebenso wie zivile Kooperationspartner_innen – durch die Vergabe von Drittmitteln nicht selten auch erheblichen Einfluss auf die Strukturierung der Forschungslandschaft in der Ingenieurmathematik.

Einige Mittel der modernen Kriegsführung sind direkt von Erkenntnissen aus der Ingenieurmathematik abhängig, für andere militärische Methoden hat sie eher einen unterstützenden Charakter. Bei einer systematischen Betrachtung auf Basis des Abschnittes 2.1.3 lässt sich also wieder zwischen einer *primären* (oder *direkten*) und *sekundären* (oder *indirekten*) Bedeutung ingenieurmathematischer Forschung für die moderne Kriegsführung unterscheiden. Gerade für die *technische Entwicklung und Verbesserung von Waffen und Kriegsgerät* – wie etwa bei der Optimierung von Gewicht-, Flug-, oder Fahreigenschaften – und die *Automatisierung von Methoden, Waffen und Gerät* – wie beispielsweise der automatischen Stabilisierung in der Fortbewegung oder der Zielsuche in Waffensystemen – ist die Forschung aus der Optimierung, der Numerik und der Kontrolltheorie unabdingbar. Indirekt sind ingenieurmathematische Methoden aber auch für die *Informationsakquise* – etwa durch die Entwicklung funktionierender Spionagesatelliten –, die *Vermischung des Zivilen und Militärischen* – vor allem in der Forschungslandschaft und der Industrie – und die hochtechnisierte Ausrüstung

von *Spezialkräften* mitverantwortlich. So arbeitet auch die Ingenieurmathematik in verschiedener Gewichtung der in Abschnitt 2.1.3 gegliederten Brechung feindlichen Widerstandes zu.

- Erstens der *Abschreckung* und dem *Demonstrieren von Überlegenheit*: Neue Waffensysteme und Militärgeräte suggerieren höhere Gefahr für den Feind; die ferngesteuerte und automatisierte Kriegstechnik erzeugt zudem ein Klima ständiger Bedrohung.
- Zweitens der *schnellen und flexiblen Einsetzbarkeit*: Teilautonome und ferngesteuerte Systeme können ohne Gefahr für die eigenen Soldat_innen in der Nähe von Kriegsgebieten gelagert und bei Bedarf schnell eingesetzt werden; schnellere Transportmittel und eine bessere Reichweite von Waffen erhöhen außerdem den Wirkungsradius einer Armee enorm.
- Drittens der *gesellschaftlichen Akzeptanz*: Die Verwendung ingenieurmathematischer Methoden für militärische Zwecke wird in der zivilen Forschung und der Industrie immer selbstverständlicher; ferngesteuerte und automatisierte Technik führt zu weniger menschlichen Verlusten auf der eigenen Seite.

Insgesamt spielen Ergebnisse aus der Ingenieurmathematik also eine bedeutende Rolle in der modernen Kriegsführung. Auf der einen Seite bei der Entwicklung konkreter Waffentechnik, auf der anderen in Unterstützungssystemen wie der Erdüberwachung mit Satelliten. Dass die Ingenieurmathematik damit indirekt negative Auswirkungen auf die Zivilgesellschaft hat, liegt in der Natur von kriegsrelevanter Forschung und Krieg selbst. Gleichzeitig hat die interessensgeleitete Nutzung der ingenieurmathematischen Konzepte auch erhebliche Auswirkungen auf die zivile Wissenschaftslandschaft. Nach den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.5 zur Wissenschaftsverantwortung und dem Wissenschaftsverständnis ergeben sich daher wieder einige wichtige Fragen für einen gesamtgesellschaftlichen Diskurs über die Verquickung zwischen der Ingenieurmathematik und der modernen Kriegsführung: Inwieweit können Forscher_innen aus der Ingenieurmathematik für die negativen Auswirkungen, die ihre Arbeit auf die Zivilgesellschaft hat, verantwortlich gezeichnet werden? Wie können sie ihre gesellschaftliche Verantwortung wahrnehmen? Und welche Folgen hat die anwendungsbezogene Prägung und Umstrukturierung der Forschungslandschaft in der Ingenieurmathematik für die Wissenschaftlichkeit des Fachbereiches?

4.4 Aktuelle Forschung zur künstlichen Intelligenz

Einige der wichtigsten Aspekte künstlicher Intelligenz, die heute in Forschung und Anwendung präsent sind, sind die Mustererkennung und die Klassifizierung in Datenmengen sowie Trackingverfahren zur Objektverfolgung. Die dabei bemühten Methoden aus dem Forschungsbereich der KI umfassen wissenschaftsbasierte Systeme, stochastische Verfahren und Überlegungen zum maschinellen Lernen. Jene Ansätze dienen so der

Gangbarmachung ursprünglicher KI-Konzepte. Und obwohl sie inzwischen getrennt beforscht und oft verschiedenen Fachbereichen untergeordnet werden, lassen sie sich grob unter den Begriffen *spezialisierte, neue* oder *aktuelle Methoden der künstlichen Intelligenz* zusammenfassen.

Ein Beispiel des maschinellen Lernens, das sich vergleichsweise intuitiv motivieren lässt, ist das des *künstlichen neuronalen Netzes* (kurz: *kNN*). Für ein kNN wird zunächst eine Struktur erzeugt, die sich am biologischen Modell von Nervenzellvernetzungen bedient. In einer sehr rudimentären Betrachtung des Gehirns oder des Rückenmarks besteht ein natürliches neuronales Netz aus mehreren Neuronen, die über Synapsen miteinander verbunden sind. Das Netz hat an verschiedenen Stellen Eingangs- und Ausgangsneuronen, die beispielsweise mit den Sinnesorganen, den Muskeln oder mit Neuronen innerhalb des Netzes via elektromagnetischer Impulse kommunizieren. Dabei lässt sich jene Kommunikation prototypisch anhand eines Eingangssignals darstellen: Einige der Eingangsneuronen erreicht ein Signal aus einem oder mehreren Sinnesorganen. Wenn das Signal (in Form eines elektromagnetischen Impulses) stark genug ist, „feuern“ die Neuronen; das heißt sie geben das Signal über ihre synaptischen Verbindungen zu anderen Neuronen im Netz weiter. Das Signal setzt sich so im Netz fort und verlässt es, sofern es an Ausgangsneuronen gerät, an geeigneten Stellen wieder oder versiegt. Ein Ausgangssignal führt dann zu einer Handlung, einem Gedanken, einem Gefühl oder einer anderen Reaktion.

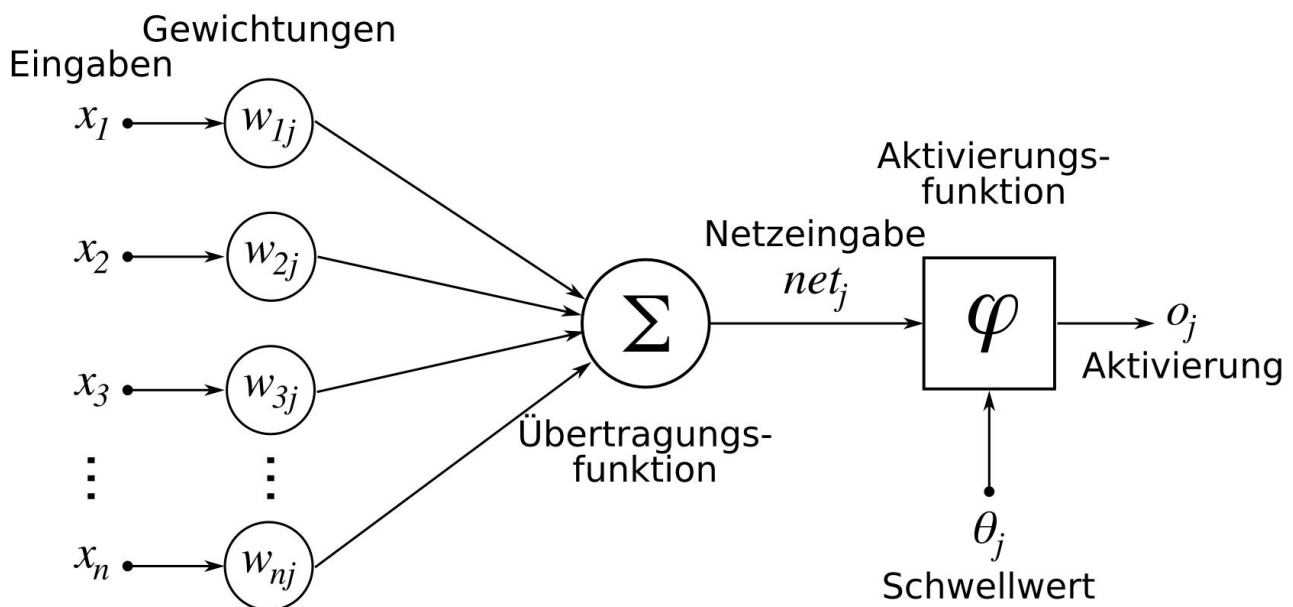


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung eines künstlichen Neurons.

Mathematisch wird dieses Konzept wie folgt umgesetzt: Ein Neuron wird dargestellt als eine Funktion, die ihre Eingabewerte zunächst gewichtet, dann addiert und, falls das Ergebnis einen gewissen Schwellenwert überschreitet, schließlich eine positive reelle Zahl zurückgibt (siehe Abb. 4.9). Dabei werden die synaptischen Verbindungen

zwischen einzelnen Neuronen so dargestellt, dass der Rückgabewert eines Neurons wieder Eingabewert eines anderen Neurons sein kann (siehe Abb. 4.10). Je stärker dieser Wert dann vom zweiten Neuron gewichtet wird, desto stärker ist die synaptische Verbindung. Die Definition eines solchen Netzes ist allerdings nur ein Teil eines funktionierenden lernfähigen Programmes. Der andere ist die Wahl der Gewichtungen und der Schwellenwerte der einzelnen Neuronen, was – im Terminus wieder angelehnt an die biologische Funktionsweise – im Lernmodus geschieht.

Während des Lernens sollen innerhalb des Netzes anhand eines Satzes von Trainingsdaten die Gewichtungen zwischen den Neuronen definiert werden. Die älteste Lernregel für künstliche neuronale Netze orientiert sich an der Theorie des kanadischen Psychologen Donald Hebb über das Lernverhalten natürlicher neuronaler Netze (vgl. [Len97, S. 54-62]). Er formulierte die These, dass die synaptische Verbindung zwischen zwei Neuronen, die im „Normalbetrieb“ häufig simultan feuern, zunehmend gestärkt wird, die Verbindung von Neuronen, zwischen denen ein Signal verebbt, dagegen geschwächt wird. Für die Überführung des Konzeptes in ein künstliches neuronales Netz bedeutet dies, dass die Gewichtungen zwischen den künstlichen Neuronen während des Durchlaufs der Trainingsdaten entsprechend des Hebbschen Prinzips erhöht oder verringert werden.

Je nach Aufgabenstellung variieren sowohl die Netzarchitektur als auch der Lernmodus stark. Da sich so zu verschiedensten Problemen lernfähige Algorithmen formulieren lassen, mutet die Idee der kNNs als sehr mächtig an: Nach der Lernphase steht ein trainiertes Netz, das neue Eingabewerte im Optimalfall anhand der Beispieldaten bewerten, einordnen und eine entsprechende passende Ausgabe liefern kann. In der Theorie der ersten kNNs wurde zudem keinerlei Einschränkung an die Trainingsdaten formuliert – idealtypisch hätte das Netz also beliebiges Wissen erlernen und in der anschließenden Ausführung abbilden sollen.

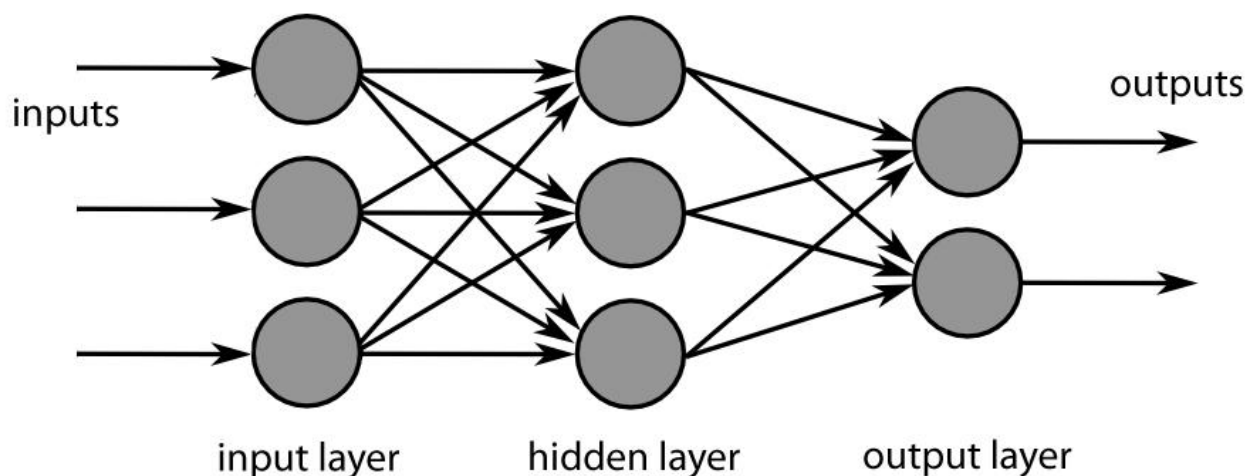


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung eines künstlichen neuronalen feedforward-Netzes.

Methoden des maschinellen Lernens beinhalten stets eine Trainingsphase, auf deren

Ergebnisse sich die Funktionalität des Algorithmus zur Laufzeit stützt. Im Vergleich dazu implementieren stochastische Systeme beispielsweise Schätzverfahren, die zukünftige Zustände eines Objektes vorhersagen und damit den Suchrahmen für eine Objektverfolgung erheblich einschränken können. Wissensbasierte Systeme bestehen dagegen aus einem Pool aus Wissen, auf dessen Grundlage algorithmisch logische Schlussfolgerungen gezogen werden können, die dann wieder in die Wissensbasis übergehen. Die Verwandtschaft dieser Ansätze mit dem Forschungsbereich der künstlichen Intelligenz ist augenscheinlich: Systeme, die Situationen abstrahieren oder vorhersagen, Ähnlichkeiten erkennen und daraus passende Handlungen ableiten, können bereits als intelligent bezeichnet werden. Ursprünglich waren diese Forschungsbereiche Teilgebiete der künstlichen Intelligenz. Diese untergeordnete Stellung sind sie allerdings los – inzwischen dominieren die spezialisierten Methoden des maschinellen Lernens, der stochastischen und der wissensbasierten Systeme über den allgemeineren Ansatz der künstlichen Intelligenz. Die Gründe hierfür sind weitgehend in der Geschichte des Forschungsgebietes zu finden. Sie wurden in Abschnitt 4.2 aus dem Blickwinkel der KI bereits angedeutet und sollen im Abschnitt 4.4.2 wieder aufgegriffen werden.

Auch die Hoffnungen, die privatwirtschaftliche, staatliche und militärische Institutionen in wissensbasierte Systeme, stochastische Modelle und lernfähige Algorithmen setzen, sind eng verwandt mit den Anforderungen an die KI: Programme sollen meist ohne Empathie, vollkommen rational und in eigener Verantwortung handeln können. Da diese neuen Methoden der künstlichen Intelligenz zudem besonders spezifisch auf Problemstellungen zugeschnitten werden, lässt sich vermuten, dass die verschiedenen Anwendungsgebiete in der Forschungslandschaft äußerst prominent sind. Dabei gilt es im Sinne dieser Arbeit zu klären, wie präsent die militärische Nutzung wissensbasierter Systeme, stochastischer Modelle und des maschinellen Lernens ist. Und weiter, wie sich diese Präsenz einerseits auf die moderne Kriegsführung, andererseits auf die zivile Forschungslandschaft dieser Fachgebiete auswirkt.

Zur besseren Übersicht über die Schwerpunktthemen der spezialisierten KI-Forschung und deren geschichtlicher Entwicklung werden die Fachbereiche im Folgenden zunächst kurz in die Wissenschaftslandschaft eingeordnet und historisch umrissen. Anschließend sollen verschiedene Aspekte einer Militarisierung der Forschungsgebiete durch möglichst fachtypische Beispiele veranschaulicht werden.

4.4.1 Fachliche Schwerpunkte der spezialisierten KI-Forschung

Die Forschungsbereiche, mithilfe derer heute zentrale Forderungen der künstlichen Intelligenz erfüllt werden, sind zwar nach wie vor in der Informatik verortet, sie unterscheiden sich jedoch in ihren fachlichen Grundlagen erheblich. Die wissensbasierten Systeme treten in gewissem Sinne das direkte Erbe der klassischen KI-Forschung an: Eine Wissensbasis aus Fakten und Regeln bestimmt den logischen Rahmen des Systems, eine im Programm enthaltene Inferenzmaschine zieht aus dem Wissen dann logische Schlussfolgerungen und lässt diese wieder in die Wissensbasis einfließen. So arbeiten die wissensbasierten Systeme zum einen auf der mathematischen Grundlage von logischen

Aussagen, Regeln und Schlussfolgerungen, zum anderen erfordert die algorithmische und programmierlogische Umsetzung der Systembausteine sowie die Präsentation der logischen Komponente eine enge Bindung an die Informatik. Stochastische Systeme entstammen dagegen direkt der mathematischen Theorie dynamischer Systeme. Die im Rahmen ihrer konkreten Anwendung oft bemühten Schätzverfahren sind wichtiger Bestandteil der mathematischen Statistik. Die Aufgabe der Informatik besteht im Falle stochastischer Systeme meist in der Implementierung anwendungsspezifischer Programme – die Trennung zwischen Theorie und Praxis ist hier also viel strenger als im Falle der wissensbasierten Systeme. Die Forschung zum maschinellen Lernen basiert wieder größtenteils auf Methoden der Informatik: In einem Zusammenspiel aus Hardware- und Software-Architektur wird ein System geschaffen, das mithilfe eines Lernalgorithmus Trainings- beziehungsweise Beispieldaten verarbeitet und so anwendbares Wissen generiert. Konkrete Methoden des maschinellen Lernens, wie etwa die künstlichen neuronalen Netze oder die Support Vector Machine, basieren auf Konzepten der Stochastik, der Statistik oder haben eine biologische Motivation. Dennoch werden diese interdisziplinären Ansätze meist in die Informatik portiert und dort weiter beforscht.

Trotz ihrer unterschiedlichen fachlichen Grundlagen und Abgrenzungen besitzen die drei Forschungsbereiche erhebliche Parallelen und Schnittpunkte. Erstens sind die entwickelten Programme und Algorithmen fast immer sehr problemspezifisch. Das Ziel ist eine möglichst breite Anwendbarkeit der Konzepte und so umfasst die Forschung zu den aktuellen Ansätzen der KI ein weites Spektrum an fallspezifischen Methoden. Jene Methoden beziehen sich dann – je nach Anwendungsbezug – auf zahlreiche andere wissenschaftliche Disziplinen wie etwa die Wirtschaftswissenschaften, die Ingenieurwissenschaften oder die Medizin. Zweitens überschneiden sich die Themen verschiedener Forschungsbereiche teilweise stark: Eine Objektverfolgung kann beispielsweise sowohl mithilfe stochastischer Systeme als auch lernfähiger Algorithmen implementiert werden, die Mustererkennung und Klassifizierung in Datenmengen kann anhand wissensbasierter Verfahren, stochastischer Systeme oder des maschinellen Lernens vorgenommen werden.

Das Phänomen unterschiedlicher Methoden und ähnlicher Anwendungen schlägt sich auch in der universitären Forschungslandschaft nieder: Die wissenschaftliche Struktur und die beteiligten Lehrstühle gliedern sich nicht nach den Forschungsbereichen der wissensbasierten Systeme, der stochastischen Modelle oder des maschinellen Lernens. Thematische Schwerpunkte werden vielmehr anhand der Anwendungsgebiete zusammengefasst, die sich dann in ihren Methoden überschneiden. So existierten beispielsweise Lehrstühle zu *Eingebetteten Systemen*, *Kognitiven Systemen*, der *Robotik* oder der *Mustererkennung*, die jeweils auf Grundlage problemspezifischer Algorithmen arbeiten. So werden die Methoden der spezialisierten KI-Forschung zu einem notwendigen Bindeglied zwischen mathematischen und informatischen Grundlagen mit den jeweiligen Bereichen ihrer Anwendung. Eine Vernetzung der vielen Wissenschaftler_innen mit unterschiedlichen Forschungsansätzen findet meist auf internationalen Konferenzen, in Workshops oder in Seminaren statt. Die Besonderheiten und der stark interdisziplinäre

Charakter der modernen KI-Forschung schlagen sich auch in der Fachliteratur nieder: Es existieren sowohl fachspezifische Einführungswerke wie [TJ14], [ZU14] und [Bis06] als auch anwendungsbezogene Konferenzbände, die weit über die Grenzen einzelner Disziplinen hinausgreifen, wie [CSF13], [FPST14], [ARC⁺15] und [HKH10].

4.4.2 Entwicklung des Forschungsgebietes

Die Entwicklung der aktuellen Forschung zur künstlichen Intelligenz lässt sich nicht ohne die historischen Hintergründe der klassischen KI erklären. Zunächst waren wissensbasierte und stochastische Ansätze sowie Methoden des maschinellen Lernens nur Teilgebiete der weitaus allgemeineren Forschung zu künstlicher Intelligenz. Und während der ersten Blütezeit der KI zwischen 1950 und 1970 waren diese Ansätze auch Teil der illusorischen Versprechungen von Forscher_innen gegenüber privatwirtschaftlichen und staatlichen Interessent_innen (vgl. Abschnitt 4.2). Gerade die bedächtigen Fortschritte auf den Gebieten der stochastischen Systeme und dem maschinellen Lernen waren es schließlich, die die Geldgeber_innen staatlicher, privatwirtschaftlicher und militärischer Institutionen dazu veranlassten, die Finanzmittel für die KI-Forschung zu kappen und damit das Forschungsgebiet in eine Krise zu stürzen.

Als Konsequenz ließen die KI-Forscher_innen die stochastisch motivierten Methoden und die Ansätze des maschinellen Lernens weitgehend fallen und konzentrierten sich fortan auf wissensbasierte Ansätze wie etwa die Expert_innensysteme. Die Forschung zum maschinellen Lernen und zu stochastischen Systemen musste sich daher neu formieren und tat dies beispielsweise in Überlegungen zur Mustererkennung, zur Klassifizierung und zum Konnektionismus (vgl. z. B. [RN03, S. 18-28] und [129]). Bis Mitte der 1980er Jahre war die Forschung zu neuronalen Netzen wieder restituiert – vor allem die Entwicklung der *Backpropagation* lieferte vielversprechende neue Lernmodi, deren Genauigkeit mithilfe von Optimierungsmethoden verbessert werden konnte. Stochastische Systeme waren ohnehin stark in der Mathematik verwurzelt. Sie konnten so auf einer theoretischen Basis weiter beforscht und immer wieder in die praktischen Überlegungen zur Mustererkennung oder der Klassifizierung einbezogen werden. Als die künstliche Intelligenz also auf ihre zweite Krise zusteuerte, war die Forschung zu stochastischen Systemen und zum maschinellen Lernen schon weitgehend von der KI gelöst. Stochastische Systeme und lernfähige Algorithmen wurden so zentrale Aspekte neuer Forschungsbereiche, die seit den 1990er Jahren ohne großes Aufsehen bedeutende Schritte in Richtung intelligenter Maschinen machen. Auch die wissensbasierten Systeme lebten in Teilgebieten der Informatik wieder auf – der Ausdruck „künstliche Intelligenz“ verschwand zunehmend aus dem Fachjargon und die modernen Methoden der KI entledigten sich so des negativen Brandings. Dabei ist der Erfolg der aktuellen Forschung zur KI vor allem in ihrem kleinteiligen Ansatz zu suchen: Während in den klassischen Überlegungen zur künstlichen Intelligenz noch hohe Erwartungen wie die vollständige Nachbildung menschlicher Intelligenz dominierten, befasst sich die neuere Forschung mit machbaren und realistischeren Ideen.

Moderne Methoden der künstlichen Intelligenz werden inzwischen in Prognose-

modellen der Finanzwirtschaft, zur automatisierten Beschreibung von Nutzer_innenverhalten im Marketing und für die unterstützende medizinische Diagnose genutzt. Militärische, geheimdienstliche und polizeiliche Akteur_innen schielen dagegen auf die Fortschritte, die jene Algorithmen aktueller Überwachungs-, Repressions- und Waffentechnologie ermöglichen: Programme zur Spracherkennung in Abhörtechnologie, zur automatischen Zielerfassung und -verfolgung in (teil)autonomen Waffensystemen und zur Identifizierung „gefährlicher“ Situationen auf der Basis von Überwachungsvideos wären ohne die Ansätze der wissensbasierten Systeme, der stochastischen Modelle und des maschinellen Lernens nicht realisierbar. Das maschinelle Lernen hat sich zudem zu einem prominenten Thema der militärrelevanten zukunftsorientierten Forschungsarbeit entwickelt. Welche Form und welche Folgen die Verquickung zwischen militärischen Interessen und der zivilen Forschung in diesen Fachbereichen hat, soll im Weiteren anhand möglichst fachtypischer Beispiele geklärt werden. Der thematische Aufbau jener Analyse gliedert sich dabei wie folgt:

1. Der Weg kriegsrelevanter KI-Projekte in die zivile Forschung
2. „Zivile Sicherheitsforschung“ – militärisch genutzt
3. Wissensakquise durch Konferenzen, Wettbewerbe und Crowdsourcing
4. Beeinflussung der zivilen Forschungs- und Studienlandschaft durch militärische Interessenträger_innen

4.4.3 Dual-Use I: Fraunhofer-Institute und Universitäten

Der Begriff *Dual-Use* wird im Wortsinn meist für zwei Phänomene verwendet: Die Nutzung ziviler Forschungsergebnisse für militärische Zwecke und die Verwendung militärischer Forschung in zivilem Kontext. Weitaus wichtiger scheint neben der rein deskriptiven Bedeutung des Begriffes allerdings eine taktische Komponente zu sein. Denn die beidseitige Nutzbarkeit von Forschung ist ein explizites Ziel militärischer Akteur_innen. Dabei geht es nicht allein darum, zivile Forschungsergebnisse militärisch gangbar zu machen. Mindestens ebenso verlockend ist die Platzierung kriegsrelevanter Forschungsthemen im zivilen Sektor und damit einerseits die Nutzung universitärer Kapazitäten für Militärforschung, andererseits die Vergrößerung des Absatzmarktes für ursprünglich militärische Technologie.

Dass diese Strategie gerade auch in Deutschland Anklang findet, ist an der Interessenspolitik des BMVg zu erkennen (vgl. [Wis07] und [Mar17]). Im Mai 2003 legte das Verteidigungsministerium der Bundesregierung ein Planungspapier zur „Neuordnung der grundfinanzierten Forschung und Technologie im Rüstungsbereich“ vor, das sich mit der Umstrukturierung der *Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften* (kurz: *FGAN*) befasste. Die *FGAN* bestand aus drei Instituten, die fast ausschließlich wehrtechnische Forschung betrieben: einem *Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik* (kurz: *FHR*), einem für *Kommunikation, Informationsverarbeitung*

und *Ergonomie* (kurz: *FKIE*) und einem für *Optronik und Mustererkennung* (kurz: *FOM*). Diese wehrtechnische Prägung hatte zur Folge, dass die FGAN-Forschung zwar in militärischen Kreisen sehr angesehen war, im zivilen Kontext allerdings nie wirklich Fuß fasste. Die Idee des BMVg war es daher, die FGAN-Institute in die Fraunhofer Gesellschaft zu integrieren und so die Militärforschung um die Vorteile der zivilen Forschung zu bereichern: größere Absatzmärkte, ein besserer Zugang zu wissenschaftlichen Netzwerken und leichtere Nachwuchsgewinnung im akademischen Umfeld. Mit diesen Ideen wandte sich das Verteidigungsministerium im Jahr 2004 in Abstimmung mit dem *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (kurz: *BMBF*) an die für Bund und Länder wichtigste beratende Instanz für Wissenschaftspolitik: den Wissenschaftsrat. Dieser schloss sich der Einschätzung des Verteidigungsministeriums an und stützte im Jahr 2007 in einer „Stellungnahme zur Neustrukturierung der Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e.V. (FGAN)“ die Eingliederung der FGAN-Institute in die Fraunhofer Gesellschaft, damit das Verteidigungsministerium verstärkt die Möglichkeiten von Dual-Use-Forschung nutzen könne. Im Jahr 2009 wurden die FGAN-Institute schließlich in die Fraunhofer Gesellschaft integriert.

Im Rahmen dieser Eingliederung fusionierte das FGAN-Institut für Optronik und Mustererkennung in Ettlingen bei Karlsruhe mit dem *Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung* (kurz: *IITB*) in Karlsruhe zum *Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung* (kurz: *IOSB*). Da das Fraunhofer IITB schon lange eng mit dem *Karlsruher Institut für Technologie* (kurz: *KIT*) zusammenarbeitet, stellte die Fusion zwischen FOM und IITB eine unweigerliche Annäherung von Kriegsforschung an die universitäre Forschungslandschaft dar. Besonders gut wird dies am Beispiel des *Lehrstuhls für Interaktive Echtzeitsysteme* (kurz: *IES*) am Institut für Anthropomatik des KIT sichtbar. So haben das IOSB und der Lehrstuhl für IES teilweise sehr ähnliche Forschungsschwerpunkte: Maschinensehen, automatische Sichtprüfung, Umweltmodellierung und Mensch-Maschine Interaktion – ein Großteil davon erforscht auf Basis stochastischer und wissensbasierter Systeme sowie dem maschinellen Lernen (vgl. [130]). Außerdem überschneiden sich beide stark in der Personalstruktur (vgl. [131], [132] und [133]): Die Leitung der Institutionen ist identisch, die Dozierenden am Lehrstuhl für IES sind teilweise Angestellte des IOSB und bei den Doktorand_innen ist eine Zuordnung oft überhaupt nicht mehr möglich, da sie ihre Dissertationen zwar offiziell an der Universität anfertigen, aber Fragestellungen des IOSB behandeln. Damit besteht eine große Ähnlichkeit der Forschungspolitik am IOSB mit der am FKIE, welche in Abschnitt 4.1.4 bereits beschrieben wurde. Im Vergleich zum FKIE wurde das FOM allerdings mit einem Fraunhofer-Institut fusioniert, statt einfach nur als bestehende Einrichtung in die Fraunhofer Gesellschaft integriert. Dies ermöglicht es den Forschenden des ehemaligen FOM zum Zwecke der kriegsrelevanten Forschung auf die bereits etablierte zivile Institutsstruktur des IITB zurückzugreifen. Um die Beteiligung von Wissenschaftler_innen des KIT an kriegsrelevanten Projekten des IOSB zu veranschaulichen, werden im Folgenden die vom IOSB beworbenen Produkte *Automatisierte Bildauswertung für Unbemannte Luftfahrzeuge* (kurz: *ABUL*) und *Digitaler Lagetisch* dargestellt.



Abbildung 4.11: Darstellung einer Verarbeitungsstufe in der automatisierten Bildauswertung.

Überwachungsdrohnen¹⁷ schicken meist in einem Livestream Kameradaten zur Bodenstation, anhand derer menschliche Bildauswerter_innen in Echtzeit Aufgaben wie die Erkennung von Zielobjekten und eine Verfolgung dieser erfüllen sollen. Aufgrund eines unsteten Fluges oder einer zu niedrigen Auflösung der Kamerabilder ist es aber nicht möglich, die Auswertung anhand von Rohdaten durchzuführen. Außerdem erfordert die Bildauswertung die ständige Konzentration eigens dazu ausgebildeten Personals – im ökonomischen Sinne sind diese Aufgaben also sehr teuer. Aus diesem Grund versuchen militärische Entscheidungsträger_innen schon lange, einzelne Komponenten der Bildauswertung zu automatisieren. Das am IOSB entstandene Produkt ABUL ist ein unterstützendes System für die Auswertung von Drohnen­daten, das mehrere solcher Komponenten zusammenfasst (vgl. [134]). So realisiert ABUL zum einen wichtige Vorbedingungen für eine Bildanalyse, wie etwa die Bildstabilisierung und -drehung sowie die Verbesserung der Auflösung. Zum anderen automatisiert es einige zentrale Aspekte der Überwachung und der Lokalisierung, wie die automatische Indikation von bewegten Objekten und eine Verfolgung von markierten Zielen. Gerade die automatische Zielerkennung und -verfolgung sind zwei der bedeutendsten Aufgaben militärrelevanter KI-Systeme.

ABUL wurde in einer engen Kooperation zwischen Forscher_innen des Lehrstuhls für IES und des IOSB entwickelt. Im Jahr 2000 noch am IITB als namenloses Projekt für eine Fusion verschiedener Sensordaten, für Suchverfahren auf Kamerabildern und eine modellbasierte Objekterkennung gedacht, waren die möglichen Anwendungsgebiete

¹⁷die Drohne wird im Folgenden auch als *Unpiloted Aerial Vehicle* (kurz: *UAV*) bezeichnet

te sehr allgemein formuliert: Das Konzept war beispielsweise für die Bildauswertung in Satellitenbodenstationen, für die Zielverfolgung oder für die Navigation von Drohnen gedacht (vgl. [MKH00]). Nach der Gründung des IOSB wurde offenbar die Attraktivität des Ansatzes für die Drohnentechnologie der Bundeswehr sichtbarer – das Projekt wurde daher konkretisiert. In einer Dissertation im Jahr 2013 zum Dr.-Ing. beschreibt der Informatiker Michael Müller, einer der Initiatoren des ursprünglichen Konzeptes, zum ersten Mal das System ABUL (vgl. [Mü13]). In der Promotionschrift werden zentrale Aspekte der Bildstabilisierung und der Bildverbesserung beschrieben. Die *Bildregistrierung* – eine Form der Stabilisierung – nutzt dabei rudimentäre Ansätze der modernen KI: Eine Software sucht in einer Abfolge von Kamerabildern Merkmale wie Punkte oder Kanten, die sie miteinander abgleicht und dann mithilfe stochastischer Methoden die Parameter einer Transformationsfunktion schätzt. Diese Funktion soll dann die Bilder registrieren können, also automatisch in den gleichen Blickwinkel rücken und so Verwacklungen verhindern.

Auch die Komponenten zur Bewegungsindikation und Zielverfolgung im ABUL-System wurden in enger Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für IES und dem IOSB realisiert. Eine Person, die von Seiten der Universität maßgeblich an der Entwicklung beteiligt war, ist der Informatiker Michael Teutsch. Teutsch forschte bis 2010 hauptsächlich an Klassifizierungsmethoden für Schiffe und Boote, die in der militärischen und polizeilichen Bekämpfung von Migration, Piraterie oder Drogenhandel eingesetzt werden sollen (vgl. [135]). Ab 2011 verlagerte sich sein Forschungsschwerpunkt auf die Arbeit zur Bewegungsdetektion, Objektverfolgung und Klassifizierung in UAV-Kamerabildern. Sein erstes Paper zum ABUL-System veröffentlichte Teutsch mit zwei Kollegen am IOSB als Co-Autor (vgl. [TKH11]). Die Forscher schlagen dabei ein stochastisches Verfahren zur Bewegungsdetektion von Objekten vor, das mithilfe der Ergebnisse der Bildregistrierung die relative Geschwindigkeit von Bildpunkten bestimmt und so erkennen kann, ob sich diese am Boden bewegen. Zusätzlich werden verschiedene Ansätze zur Klassifizierung verglichen, die es der Drohne ermöglichen sollen, zwischen Menschen und Fahrzeugen zu unterscheiden. Zu diesem Zweck untersuchen die Autoren drei Methoden des maschinellen Lernens – eine *Support Vector Machine* (kurz: *SVM*) und das *k-Nearest-Neighbour-Verfahren* mit $k = 3$ und $k = 9$ –, wobei es mit dem 9-Nearest-Neighbour-Verfahren gelingt, gut 96% der Objekte korrekt zu klassifizieren. In seiner Dissertation am KIT zum Dr.-Ing. aus dem Jahr 2014 beschäftigt sich Teutsch weiter mit der Bewegungserkennung und daraus abgeleiteten Problemen, wie etwa der automatischen Verfolgung mehrerer Ziele (vgl. [Teu14]). Dabei beschreibt Teutsch wie auf Basis der Bewegungsdetektion und mithilfe von Zustandsschätzungen durch einen *Kalman-Filter* mehrere Ziele über UAV-Kameradaten verfolgt werden können. Betreuer der Dissertation war Jürgen Beyerer, Lehrstuhlinhaber für IES und zugleich Leiter des IOSB.

Eingesetzt werde das ABUL-System, so heißt es auf der Internetpräsenz des IOSB, in der Überwachungsdrohne *Luna* der Bundeswehr und den Ranger-Drohnen der Schweizer Armee (vgl. [134] und [Beh17, S. 4]). Allein die *Luna*-Drohne wurde und wird von der Bundeswehr und ihren Partner_innen zu verschiedenen militärischen

und polizeilichen Zwecken genutzt. Sie dient beispielsweise der Migrationsbekämpfung in Saudi-Arabien (vgl. [And16, S. 10]) und als Aufklärungsdrohne während der Bundeswehreinsetze in Afghanistan und Mali (vgl. [Mar17, S. 8]), wo mithilfe der Luna Ziele gesucht, markiert und somit zum Abschuss freigegeben werden. Der Weg der KI-Forschung aus Karlsruhe in die moderne Kriegsführung ist im Falle von ABUL somit übersichtlich und nachvollziehbar. Die beteiligten Forscher_innen schneiden die Methoden und Algorithmen exakt auf die militärische Anwendung zu.

An der militärischen und polizeilichen Einsatzplanung sind oft viele Personen mit unterschiedlichem Wissenshintergrund und Aufgabenspektrum beteiligt, die gemeinsam eine meist sehr dynamische Situation beurteilen sollen. Für ein planungsunterstützendes System scheint es daher sinnvoll, die Vielschichtigkeit der Bedürfnisse und Aufgaben zu berücksichtigen und gleichzeitig ein intuitives Arbeitsumfeld zu schaffen. Der *digitale Lagetisch* ist ein Konzept des IOSB zur Unterstützung der Einsatzplanung, das der Komplexität dieser Aufgabe gerecht werden soll (vgl. [136]): Das System besteht aus einem horizontalen Bildschirm, der als Lagetisch dient und Geodaten anzeigt, aus einem vertikalen Bildschirm, der Zusatzinformationen zu den jeweils betrachteten Objekten des Lagetischs listet und aus jeweils einem Tablet pro Benutzer_in, an denen individuell gearbeitet und von denen relevanter Inhalt direkt auf den Lagetisch übertragen werden kann. Die auf dem Lagetisch angezeigten Kartendaten sind dabei beweglich, vergrößerbar, verkleinerbar und es können Teilaspekte wie Gebäude oder andere Orte von besonderem Interesse ausgewählt werden. Im Sinne einer intuitiven Bedienung wurde für den Lagetisch ein Multi-Touchscreen gewählt, der gleichzeitige Berührungen erkennt und somit komplexere Aufgaben wie das Drehen, das Verkleinern oder das Vergrößern einer Karte ermöglicht¹⁸. Da bei einer Einsatzplanung üblicherweise viele Personen an einem Lagetisch arbeiten, auf das Kartenmaterial deuten und dabei den Bildschirm anfassen, muss das System erkennen können, ob die Berührung eine Interaktion intendiert oder ob nur auf etwas gedeutet wurde. Zu diesem Zweck wurde zusätzlich eine Handgestenerkennung entwickelt. Die Hände der Personen, die den Lagetisch berühren, werden gefilmt und ein Programm ordnet während der Laufzeit eigenständig die Handgesten der Nutzer_innen ein. Eine Aktion wird nur dann autorisiert, wenn das Programm die Handpose auf eine bereits bekannte zurückführen kann. Die Arbeitsweise des digitalen Lagetischs beinhaltet damit ein Klassifizierungsproblem, welches am IOSB in Kooperation mit dem Lehrstuhl für IES behandelt wurde.

Ein ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, der in der Forschung zum digitalen Lagetisch besonders präsent war, ist der Informatiker Thomas Bader. In der Entstehungsphase des Produktes forschte er umfassend zur Blick- und Handgestenerkennung am Beispiel des digitalen Lagetischs und war damit zentral an dessen Entwicklung beteiligt (vgl. [137]). Während die allgemeinen Publikationen zum digitalen Lagetisch von mehreren seiner

¹⁸wie es beispielsweise auch bei Smartphone- und Tabletanwendungen der Fall ist

Kolleg_innen verfasst wurden (vgl. [138]), sticht Bader als Erstautor beinahe aller Publikationen zur videobasierten Handgestensteuerung des IOSB hervor (vgl. [139]). Neben den Papern und Konferenzbeiträgen gibt vor allem Baders Dissertation zum Dr.-Ing. Aufschluss über die Arbeitsweise des Systems (vgl. [Bad11]). Die Bedienung des digitalen Lagetisches sieht vor, dass Benutzer_innen bei der Berührung des Displays mit verschiedenen Handposen bestimmte Veränderungen der Kartendaten bewirken. So kann beispielsweise das Bewegen einer Hand mit ausgestreckten Fingern bedeuten, dass die Karte mit Fixpunkt auf dem Handmittelpunkt verschoben wird, zwei diagonal voneinander wegbewegte Hände mit ausgestrecktem Zeigefinger könnten die Vergrößerung der Kartendaten, zwei zueinander bewegte eine Verkleinerung bewirken. Die Aufgabenschritte für ein Programm, das Handgesten selbstständig einordnen soll, sind denkbar komplex: Zunächst müssen aus den Daten der Kamera, die den Lagetisch filmt, all jene Segmente ausgelöst werden, die Hände zeigen könnten. Da dabei oft noch Teile des Armes einbezogen werden, müssen diese von der Hand gelöst werden. Anschließend werden Merkmale für Hände extrahiert und mit deren Hilfe Skalarwerte – sogenannte Signaturen – berechnet. Auf dieser Basis kann das Programm dann die Lage der Fingerspitzen bestimmen, mittels derer die Signaturen bezüglich der Fingerlänge normiert werden. Abschließend werden die Handgesten klassifiziert – nur wenn eine gefilmte Hand mit einer bekannten Pose in Verbindung gebracht werden kann, wird eine Interaktion autorisiert. Die Methoden, die Bader zum Zwecke der Klassifizierung untersucht, entstammen der Stochastik und dem maschinellen Lernen (vgl. [Bad08, S. 431-434] und [Bad11, S. 54-59]). In einem Artikel aus dem Jahr 2008 beschreibt er eine Klassifizierung mithilfe des *Nearest-Neighbour-Verfahrens*, in seiner Dissertation im Jahr 2011 vergleicht er schließlich komplexere Lern- und Schätzalgorithmen wie den *Bayes-Klassifikator*, ein *künstliches neuronales Netz* sowie eine *Support Vector Machine*. Die SVM schneidet bei Baders Evaluation am besten ab, sie erkennt im Klassifikationsschritt über 90% der getesteten Handgesten. Wie schon im Falle von Teutsch wurde auch Baders Dissertation von Jürgen Beyerer, dem Leiter des IOSB und Lehrstuhlinhaber für IES, betreut.

Anwendung findet der digitale Lagetisch im überwachungstechnischen, im polizeilichen und im militärischen Kontext. So wirbt beispielsweise das *Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe* (kurz: *BBK*) mit der modernen Ausstattung des *Gemeinsamen Melde- und Lagezentrums* (kurz: *GMLZ*), zu der auch ein digitaler Lagetisch gehört (vgl. [140]). Das GMLZ wurde im Jahr 2002 im Nachklapp des 11. September ins Leben gerufen und informiert Kooperationspartner_innen wie nationalstaatliche Institutionen, die NATO und die EU „umfassend über relevante Ereignisse im Bevölkerungsschutz“. Auch das deutsche Militär arbeitet mit dem digitalen Lagetisch: Die Führungsakademie der Bundeswehr nutzt den digitalen Lagetisch zur Ausbildung von hochrangigem militärischen Personal und zeigt sich begeistert von den Möglichkeiten, die das System im Wargaming – also dem Durchspielen von Kriegssituationen – bietet (vgl. [141]). In einem Vorstellungsvideo zum Tag der Bundeswehr 2016 in Hamburg stellt ein Ausbilder der Führungsakademie den Lagetisch vor und beschreibt, wie das Produkt in enger Zusammenarbeit zwischen Bundeswehr

und IOSB entstand und stetig weiterentwickelt wird (vgl. [142]). Wie schon beim ABUL-System ist der Zusammenhang zwischen der zivilen Forschungslandschaft am KIT und der militärischen Anwendung des digitalen Lagetisches gut nachzuvollziehen. Die beteiligten universitären Wissenschaftler_innen betreiben damit wohlwissend Militärforschung.

ABUL und der digitale Lagetisch sind bei weitem nicht die einzigen kriegsrelevanten Produkte, die am IOSB in Zusammenarbeit mit der Universität beforscht werden. Weitere Beispiele sind die militärische Analyse von Infrastruktur durch das Projekt *SiteAnalyst* oder die maritime Situationsanalyse *WiMAAS* (vgl. [143] und [144]). Beide Produkte des IOSB stützen sich maßgeblich auf wissensbasierte Systeme, deren Grundlagen am Lehrstuhl für IES entwickelt wurden – in Dissertationen zur/zum Dr.-Ing., wieder betreut von Jürgen Beyerer (vgl. [Bau13a] und [Fis15]). Während *SiteAnalyst* die Satellitenbildaufklärung und Situationsanalyse in kritischer Infrastruktur unterstützt, wird beim *WiMAAS*-Projekt unmissverständlich klar gemacht, dass die Arbeit der Forscher_innen der Migrationsbekämpfung mithilfe von Satellitenbildern und Drohnen dienen soll.

Insgesamt scheint die Strategie des BMVg zur Umstrukturierung der FGAN-Institute im Falle des IOSB aufgegangen zu sein: Zahlreiche Absolvent_innen einer zivilen Hochschule setzen ihre akademische Karriere in der militärischen Forschung fort – mit einer starken Einbindung in universitäre Forschungsnetze. Außerdem vergrößert sich der Absatzmarkt für die kriegsrelevanten Produkte des IOSB durch das Interesse polizeilicher und staatlicher Institutionen wie etwa der Küstenwache oder dem BBK. Eine wichtige Rolle bei der Verquickung von ziviler und militärischer Forschung spielt dabei die fachliche und strukturelle Verwandtschaft zwischen dem IOSB und dem Lehrstuhl für IES am KIT.

4.4.4 Dual-Use II: „Zivile Sicherheitsforschung“

Militärische Forschung in einen zivilen Kontext zu bringen ist also Teil einer Dual-Use Agenda, die das BMVg seit mehreren Jahren wirksam verfolgt. Ein anderer Aspekt jener Agenda ist die militärische Nutzung ursprünglich ziviler Forschungsergebnisse. Denn Projekte mit einem rein militärischen Zweck sind nur eine Seite der Medaille: Oft bewegen sich Technologien und Taktik der modernen Kriegsführung sehr nah an Produkten der „zivilen Sicherheitsforschung“ für polizeiliche und staatliche Anwendungen. Dies ist aufgrund der zahlreichen Parallelen zwischen polizeilichem und militärischem Wirken nicht verwunderlich – Überwachung, Spionage, gezielte Gewaltausübung und die Ausstattung mit modernsten Schusswaffen lassen sich schwer nur einer von beiden Gruppen zuordnen. Öffentlich und politisch ist die staatliche Förderung ziviler Sicherheitsforschung allerdings oft weitaus einfacher zu rechtfertigen, da sie scheinbar unmittelbar am Schutz der Bürger_innen im Inland orientiert ist. Wenn dabei schon in der Entwicklungsphase der zivilen Projekte sichergestellt werden

kann, dass die Ergebnisse später auch militärisch nutzbar sind, kann der militärische Forschungsetat indirekt um zivile Forschungsgelder erweitert werden.

In der Stellungnahme des Wissenschaftsrates aus dem Jahr 2007 wird ebendiese Strategie aus Sicht der Bundesregierung und der beteiligten Ministerien beschrieben (vgl. [Wis07, S. 12] und [Mar17, S. 4-5]). Das damals initiierte Sicherheitsforschungsprogramm der Bundesregierung wurde mit rund 100 Millionen Euro Fördervolumen ausgestattet und ist inzwischen in das Rahmenprogramm zur „Forschung für die zivile Sicherheit“ übergegangen (vgl. [145]). Dabei war es von Beginn an das Ziel, die Ergebnisse der zivilen Forschung auch militärisch zu nutzen. Das Programm wurde „vom BMBF in enger Kooperation [...] mit den Bundesministerien des Innern, der Verteidigung und für Wirtschaft und Technologie, konzipiert [...] und sieht dazu unter anderem eine enge Zusammenarbeit von Wehrtechnik und ziviler Sicherheitstechnik vor“ (vgl. [Wis07, S. 12]). So sind die militärische Verwendbarkeit von Forschungsergebnissen und damit indirekt auch die Umwidmung ziviler Fördermittel zentrale Bestandteile des Forschungsprogrammes für die zivile Sicherheit.

Um die Bedeutung von neuen Methoden der künstlichen Intelligenz für diese Form von Sicherheitsforschung zu veranschaulichen, werden im Folgenden zwei Projekte des Forschungsprogrammes vorgestellt, an denen Informatiker_innen der Universität Hannover beteiligt waren: Die *Automatische Situationseinschätzung für ereignisgesteuerte Videoüberwachung* (kurz: ASEV) und *Verteilte vernetzte Kamerasysteme zur in situ-Erkennung Personen-induzierter Gefahrensituationen* (kurz: CamInSens). Für beide Projekte zusammen erhielt alleine die Universität Hannover als eine der Projektpartner_innen ca. 2,5 Millionen Euro an Drittmitteln (vgl. [Nie14, S. 11]).

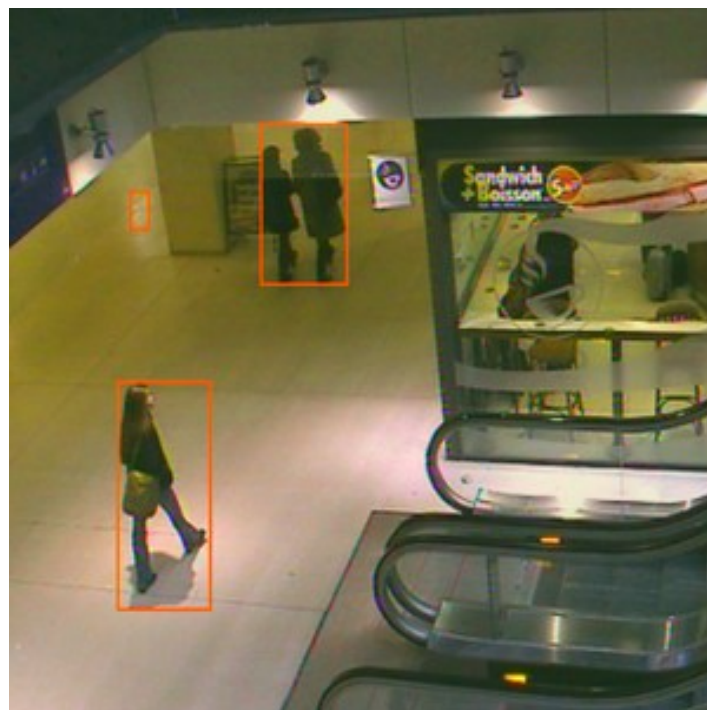


Abbildung 4.12: Zielerfassung und -verfolgung in den Bilddaten einer Überwachungskamera.

Videoüberwachung ist ein weit verbreitetes polizeiliches Mittel zur Strafverfolgung: Nach einem Delikt werden Kameradaten aus der Umgebung der Straftat von ermittelnden Beamt_innen ausgewertet und als Beweise verwendet. Die Videoüberwachung wirkt damit – abgesehen von einem abschreckenden Effekt – selten präventiv, sie hilft der Polizei lediglich bei der Aufklärung eines Vergehens. Eine Überwachung in Echtzeit würde es der Ordnungsmacht dagegen ermöglichen, bei Vergehen wie Eigentumsdelikten, unangemeldeten Versammlungen, Gewaltverbrechen oder Anschlägen schneller vor Ort zu sein. Während eine solche Live-Beobachtung die menschlichen Kapazitäten weit übersteigt, kann eine (teilweise) Automatisierung der Auswertungsprozesse die Beamt_innen bei der Überwachung unterstützen.

Ein System zu entwickeln, das in Echtzeit potentiell gefährliche Situationen an sicherheitskritischen Orten identifiziert, ist dabei eine denkbar komplexe Aufgabe: Es muss fähig sein, Bewegungen zu erkennen, Objekte zu verfolgen und bei einer als gefährlich vordefinierten Situation Alarm zu schlagen. Das Projekt ASEV realisiert ein solches unterstützendes System am Beispiel eines Flughafenvorfeldes (vgl. [105]).

ASEV wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsprogrammes für zivile Sicherheit an der Universität Hannover in Zusammenarbeit mit zwei deutschen Unternehmen entwickelt. Da ein System zur unterstützenden Echtzeitüberwachung erhebliche Anforderungen an die verwendete Software und Hardware stellt, arbeiteten in Hannover Elektrotechniker_innen und Informatiker_innen gemeinsam an einer Umsetzung (vgl. [FOM⁺14]). Die Komponenten des Systems greifen in großem Maßstab auf neue Methoden der künstlichen Intelligenz zurück – die beteiligten Forscher_innen implementierten eine Objektverfolgung durch Schätzverfahren, eine Objekterkennung mithilfe einer Wissensbasis und einen Klassifikator auf Grundlage des maschinellen Lernens. Ein typisches Ablaufszenario am Flughafenvorfeld sieht dabei wie folgt aus: ASEV entdeckt aufgrund der Live-Kameradaten ein bewegtes Objekt und verfolgt dieses mithilfe eines statistischen Trackingverfahrens. Währenddessen werden Merkmale des Objektes wie *Arme*, *Räder* oder *Flügel* vom Programm extrahiert, mit der Wissensbasis abgeglichen und das Objekt anschließend in die Kategorien *Mensch*, *Fahrzeug* oder *Flugzeug* eingeordnet. Sollte die Einordnung nicht gelingen, wird ein zusätzlicher Klassifikator, der mit den drei Kategorien trainiert wurde, eingeschaltet und nimmt die Zuordnung vor. Das Ergebnis wird dann von der Inferenzmaschine bewertet: Bewegt sich beispielsweise ein Mensch auf dem Vorfeld, wird „Warnung: Person bewegt sich auf dem Vorfeld“ ausgegeben, das Überwachungspersonal wird benachrichtigt und mit dem Live-Video, auf dem die fragliche Person getrackt wird, versorgt. Handelt es sich dagegen beispielsweise um ein Flugzeug auf der Startbahn, erscheint unter den Kamerabildern lediglich „Information: Flugzeug bewegt sich auf der Startbahn“.

So ist das ASEV-System als Teil der Sicherheitstechnik in der zivilen Luftfahrt konzipiert und wurde an den Flughäfen Hannover-Langenhagen, Hamburg und Braunschweig getestet (vgl. [Deu13, S. 9-11]). Allerdings ist dies laut den Projektverantwortlichen auch nur ein „Anwendungsszenario“ (vgl. [105]) des Projektes – die gezielte Dual-Use Strategie der Bundesregierung lässt vermuten, dass ASEV ebenso militärisch eingesetzt werden soll. In der Tat ist der militärische Nutzen eines solchen Systems

unbestreitbar: Ob auf der Startbahn für Kampfflugzeuge oder für Drohnen, zur Sicherung eines Stützpunktes oder eines Feldlagers – ein automatisches Warnsystem für das unerlaubte Betreten oder Befahren von militärischem Sperrgebiet wäre für die Bundeswehr sicher von großem Interesse.

Ein weiterer Ansatz bei der Entwicklung (teil)automatisierter Überwachungssysteme ist die autonome Erkennung verdächtigen Verhaltens. Im Sinne der Polizei und der Sicherheitsbehörden verhalten sich Menschen an Bahnhöfen, Flughäfen und anderen sicherheitskritischen Orten allein durch ihre Bewegungsmuster auffällig – etwa durch das Verharren in gewissen Bereichen, abruptes Umkehren, plötzliches Rennen oder einen Rundgang. Gruppendynamische Bewegungen sind dabei besonders interessant: Zusammenrottungen von Individuen, wie sie bei jeder unangemeldeten Versammlung auftreten und das plötzliche Auseinanderlaufen von Einzelpersonen dienen als Indikatoren für illegales Verhalten. Das Projekt CamInSens ist ein solcher Versuch, die Videoüberwachung von Privatpersonen zu automatisieren, indem einem System von Überwachungskameras eine Analysekomponente hinzugefügt wird, die eigenständig „auffällige“ Bewegungsmuster erkennt (vgl. [106]).

CamInSens wurde in Kooperation mit dem Landeskriminalamt Baden-Württemberg von einem Verbund aus deutschen Unternehmen, zwei Fraunhofer-Instituten (darunter auch das Fraunhofer IOSB) und Forscher_innen der Universitäten Kassel und Hannover entwickelt. Die einzelnen Bausteine des Projekts, wie etwa die Hardwarekomposition, die Implementierung einer Bewegungsdetektion oder einer Objektverfolgung sowie die abschließende Zusammensetzung des Gesamtsystems, wurden von bestimmten Projektpartner_innen realisiert. Die Bearbeitung der „intelligenten“ Systemkomponenten – also der Mustererkennung in Bewegungsabläufen von Individuen und Personengruppen – oblag maßgeblich Informatiker_innen des *Instituts für Kartographie und Geoinformatik* der Universität Hannover (vgl. [Bun13]). Aus der Vorverarbeitung der Kameradaten erhält das Programm zur Mustererkennung nur die Personen-Tracks, keine Bilddaten. Auf Basis dieser Tracks implementierten die Hannoveraner Forscher_innen dann drei wesentliche Analyseverfahren: Die Suche nach verdächtigen Bewegungen von Einzelpersonen, die Detektion von Gruppenverhalten und das Erlernen typischer Bewegungsmuster (vgl. [146]). Die Analyse von Einzelpersonen und Gruppenbewegungen funktioniert mittels einer Merkmalsextraktion für die einzelnen Tracks wie *Geschwindigkeit* oder *Krümmung* und einer anschließenden wissensbasierten Beurteilung des beobachteten Verhaltens (vgl. [147] und [KB13]). Weil die „Auffälligkeit“ von Bewegungen stark situationsabhängig ist, sollen Nutzer_innen des Systems – also beispielsweise Polizei oder Sicherheitsbehörden – selbst die Regeln festlegen können, mithilfe derer verdächtiges Verhalten definiert wird (vgl. [DGKB12, S. 4]). Diese wissensbasierten Ansätze werden ergänzt durch ein Modul, das während der Laufzeit typische Bewegungsmuster lernt und dann bei einer Abweichung vom erlernten Verhalten Alarm schlagen kann. So soll das CamInSens-System bestmöglich auf seine dynamischen und unterschiedlichen Einsatzszenarien vorbereitet sein.

Das Projekt CamInSens ist im Bezug auf seine potentielle Anwendung sehr viel

offener gehalten als ASEV. Mögliche polizeiliche Einsatzbereiche sind die Videoüberwachung an Bahnhöfen, an Flughäfen, in Fußballstadien und auf Demonstrationen. Doch auch eine militärische Nutzung vor dem Stützpunkt, im Kriegseinsatz oder am Feldlager ist leicht vorstellbar. Wie schon bei ASEV ist davon auszugehen, dass das BMVg CamInSens eingehend auf seine militärische Verwendbarkeit prüft. Getestet wurde das System unter anderem zu zwei Terminen auf dem Gelände der Universität Hannover (vgl. [Deu13, S. 4]). Außerdem ist das Landeskriminalamt Baden-Württemberg für „die Erprobung der im Projekt entwickelten Technologien innerhalb relevanter Einsatzszenarien“ zuständig (vgl. [148]).

Neben ASEV und CamInSens gibt es zahlreiche weitere Forschungsprojekte im Rahmenprogramm „zivile Sicherheit“, die sich mit der Entwicklung intelligenter Sensorensysteme zu Überwachungszwecken befassen (vgl. [Deu13, S. 1]). Dass für polizeiliche Anwendungen dabei vor allemameratechnik relevant ist, erklärt sich durch die zentrale Bedeutung, die bildgebende Verfahren für die Überwachung von Demonstrationen, Fußballfans, Einkaufsstraßen oder kritischer Infrastruktur einnehmen (vgl. [149]). Doch auch neben der intelligenten Überwachungstechnik ist die zivile Sicherheit ein sehr aktives und produktives Forschungsfeld (vgl. [150]). Die gut 270 bisher bearbeiteten Projekte entstammen großteils dem MINT-Spektrum und befassen sich unter anderem mit den Schwerpunktthemen *Schutz kritischer Infrastrukturen* sowie *Schutz vor Kriminalität und Terrorismus*.

Insgesamt scheint auch in diesem Fall die Dual-Use-Agenda der Bundesregierung und des BMVg zu funktionieren: Für viele hochdotierte Projekte der zivilen Sicherheitsforschung ist vermutlich von Arbeitsbeginn an eine militärische Mit- oder Umnutzung vorgesehen. So wird implizit Militärforschung betrieben, die sich aus zivilen Forschungsmitteln speist und sich unter dem Deckmantel des „Bevölkerungsschutzes“ öffentlich weitaus besser verkaufen lässt.

4.4.5 Konferenzen, Wettbewerbe und Crowdsourcing

Drittmittelkooperationen sind nicht die einzige Möglichkeit für militärische Akteur_innen, Wissen aus der zivilen Forschungslandschaft zur künstlichen Intelligenz zu akquirieren. Es gehört zur Forschungspolitik in den Fächern der modernen KI, ihre Relevanz kontinuierlich mit den vielseitigen Anwendungsbereichen zu begründen. Gleichzeitig hat sich das fachliche Spektrum der künstlichen Intelligenz diversifiziert und vergrößert. Das heißt, die Wissenschaftler_innen müssen zur Rechtfertigung ihrer Arbeit immer weitere Anwendungsbereiche suchen. In diese Lücke können dann mühelos militärische Interessenträger_innen stoßen – sie müssen dabei nicht einmal direkte Gelder frei machen, sondern den Forscher_innen lediglich eine Plattform für die Präsentation ihrer Arbeit bieten. Dies geschieht durch zahlreiche Konferenzen und Workshops, deren Themenschwerpunkte teilweise militärisch betreut werden, sowie durch Wettbewerbe, die von militärischen Institutionen veranstaltet und auf denen die besten Forschungsergebnisse ausgezeichnet werden.

Mit den militärischen Akteur_innen unterscheidet sich auch die Art der Wissensakquise. So platzieren beispielsweise die Universitäten der Bundeswehr eigene Wissenschaftler_innen in der Forschungslandschaft, die sich auf Konferenzen und Workshops mit Kolleg_innen von zivilen Hochschulen vernetzen oder, im Falle einer Mitgliedschaft im Programmkomitee, zudem die Ausrichtung der Veranstaltung mitbestimmen können. In den USA veranstaltet die DARPA dagegen eigene Wettbewerbe, die internationale Forscher_innen anlocken sollen, konkrete Fragen des US-Militärs zu behandeln. Im Folgenden wird die Strategie jener militärischen Akteur_innen exemplarisch dargestellt.

Wissenschaftler_innen der Universität der Bundeswehr München finden sich in allerlei Forschungszusammenhängen wieder – die neuen Methoden der künstlichen Intelligenz sind dabei vor allem in der Verarbeitung von Aufklärungsbildern und der Drohnen- oder Robotersteuerung präsent. Eine Person, die sich eingehend mit der Mustererkennung in Bilddaten befasst, ist Helmut Mayer, der Lehrstuhlinhaber für *Visual Computing* an der Bundeswehruniversität München (vgl. [151]). Mayer forscht beispielsweise zur automatischen Interpretation von Gebäudefassaden und der Generierung von 3D-Modellen aus Aufklärungsvideos von urbanen Gebieten (vgl. [SM16] und [KHDM16]). Mit seiner Arbeit zur Interpretation von Gebäudefassaden schließt er sich dem Trend in der modernen Kriegsführung an, militärische Operationen mit dem Label „Terrorismus-“ oder „Aufstandsbekämpfung“ immer weiter in dicht bewohnte, städtische Gebiete zu verlagern. Auf Basis eines künstlichen neuronalen Netzes entwickelten Mayer und sein Forschungskollege ein Verfahren, das Fotos von Gebäudefassaden selbstständig analysieren und in die Kategorien *Fassade*, *Fenster*, *Tür* und *Sonstiges* einordnen soll. Wenn auch nie im Feld erprobt, erzielte die Software gute Ergebnisse in der Klassifizierung von Testbildern. Mayers Arbeit zur Generierung von 3D-Modellen ist noch spezifischer an eine konkrete Anwendung gekoppelt: Anhand von Drohnen-Kameradaten sollen 3D-Punktwolken erzeugt werden, die mit einem stochastischen Verfahren zu einem dreidimensionalen Umgebungsmodell zusammengefasst werden. Anschließend soll die Bildszene mithilfe eines maschinellen Lernalgorithmus interpretiert, also die einzelnen Bildkomponenten wie *Straßen*, *Häuser*, *Wald* und *Wiese* klassifiziert werden. Auch in diesem Fall liefern die beteiligten Forscher_innen genau das, was in der modernen Kriegsführung momentan von großer Bedeutung ist – eine Automatisierung der Verarbeitung von Drohnenbildern. Der zunehmende Einsatz von Kampf- und Überwachungsdrohnen in Kriegsgebieten hat die Sammlung von Datenmengen zur Folge, die allein durch menschliche Kapazitäten nicht zu bewältigen sind.

Neben seiner Rolle als Forscher für deutsche Militärtechnologie hat Mayer aber auch einen wichtigen Posten bei der *Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung* (kurz: *DAGM*). Der selbsterklärte Zweck des Vereins ist neben der „Forschung und Förderung der wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet der Mustererkennung“ vor allem „der gegenseitige Erfahrungsaustausch und die gemeinsame Behandlung wissenschaftlicher und technischer Fragen aus dem gesamten Gebiet der Mustererkennung“

(vgl. [152]). Diese Vernetzung zwischen Forscher_innen soll durch die jährlich von der DAGM veranstalteten Konferenzen zur Mustererkennung gefördert werden. Mayer ist seit 2009 im Technischen Komitee der Arbeitsgemeinschaft, dem er seit 2015 als Sprecher vorsitzt. Das Sprecheramt macht ihn zusätzlich zum Vorstandsmitglied der DAGM (vgl. [153]). Zu den Aufgaben des Technischen Komitees zählen „die Öffentlichkeitsarbeit, die Pflege von Kontakten zu anderen wissenschaftlichen Einrichtungen und die Formulierung von Vorschlägen für zukünftige Forschungsthemen. [...] [I]nsbesondere sollen Vorschläge für die Gestaltung von DAGM-Tagungen erarbeitet und Kommunikationsstrukturen aufgebaut werden“ (vgl. [154]). Es ist also davon auszugehen, dass die Schwerpunkte der international besuchten jährlichen Konferenzen stets auch von militärischen Fragestellungen mit geprägt werden und die dort vorgestellten Forschungsprojekte auf ihre militärische Verwendbarkeit sowie die Möglichkeit einer Vernetzung zwischen zivilen und militärischen Forscher_innen geprüft werden. Der zunehmende Fokus auf die Themen Bildanalyse und Szeneinterpretation der DAGM-Konferenzen in den Jahren 2015 und 2016 dürfte reges militärisches Interesse hervorgerufen haben (vgl. [GGL15] sowie [RA16]).

Eine weitere Forscherin der Bundeswehruniversität München, die sich aktiv an der internationalen Vernetzung von Forscher_innen beteiligte, ist Silja Meyer-Nieberg, eine ehemalige Doktorandin und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für theoretische Informatik, Mathematik und Operations Research. Einer ihrer Forschungsschwerpunkte lag in der Implementierung intelligenter Methoden für Roboter-Schwärme mithilfe stochastischer Verfahren (vgl. [MKP13] und [MK14]). Die in Schwärmen organisierten Mini-Roboter sollten unter unsicheren Bedingungen und in unbekannter Umgebung ein Ziel verfolgen und abfangen können. Meyer-Nieberg war im Jahr 2016 als Angestellte der Bundeswehruniversität im Programmkomitee des internationalen Workshops zu *Machine Learning, Optimization, and Big Data* (kurz: *MOD*; vgl. [PCGN16]). Auch im Falle des MOD 2016 ist also mit dem Transfer zivil entwickelter KI-Methoden in die militärische Forschung zu rechnen.

Die DARPA ist eine Behörde des US-Verteidigungsministeriums mit der Aufgabe, „bahnbrechende Technologien für die nationale Sicherheit“¹⁹ voranzutreiben (vgl. [155]). Anders formuliert arbeitet die DARPA an der technologischen Überlegenheit des US-Militärs gegenüber anderen bewaffneten Gruppen. Neben Drittmittelprojekten an Universitäten und der direkten Verpflichtung von Forscher_innen veranstaltet die DARPA regelmäßig Wettbewerbe, die in der internationalen Forschungsgemeinde hohes Ansehen genießen. Zwei Beispiele für jene Wettbewerbe sind die *DARPA Urban Challenge* aus dem Jahr 2007 und die *DARPA Robotics Challenge*, die in den Jahren 2012 bis 2015 stattfand (vgl. [156] und [157]). Ziel der Urban Challenge war es, ein autonomes Fahrzeug zu bauen, das sich innerhalb eines Parcours selbstständig im Straßenverkehr bewegen und komplexe Manöver durchführen kann. Unter den elf Forschungsgruppen, die es ins Finale des Turniers schafften, waren auch zwei

¹⁹Übersetzung des Autors aus dem Englischen

Teams aus Deutschland (vgl. [158] und [159]): Das *CarOLO*-Team der Universität Braunschweig und *Team AnnieWay*, zusammengesetzt aus Forscher_innen am KIT, der Technischen Universität München (kurz: TU München), dem Fraunhofer IITB und der Bundeswehruniversität München. Beide Forschungsgruppen hatten grundlegende Ansätze der aktuellen künstlichen Intelligenz zu bearbeiten – so etwa Verfahren zur Verfolgung und der Erkennung von Hindernissen oder die Erzeugung und Interpretation von Szenenbildern. An der Entwicklung des AnnieWay-Fahrzeuges nahmen auch Informatiker_innen des KIT und der TU München teil, die sich unter anderem mit der Erstellung von Szenenbildern auf Basis des maschinellen Lernens und der Verfolgung beweglicher Objekte mithilfe stochastischer Methoden befassten (vgl. [KZP⁺08]). Wie schon im Falle der Bildverarbeitung von Gebäudefassaden passt die Steuerung autonomer Fahrzeuge in Stadtgebieten perfekt zum Trend der Kriegsführung und militärischen Aufstandsbekämpfung in urbanen Gebieten. Zwar sind die autonomen Fahrzeuge noch nicht für den konkreten Kriegseinsatz geeignet, doch neue Erkenntnisse zum (teil)autonomen Fahren lassen intelligente Panzer und selbststeuernde militärische Nachschubkonvois kontinuierlich näher rücken.

Die DARPA Robotics Challenge befasste sich einige Jahre später nicht mehr mit autonomen Fahrzeugen, sondern mit humanoiden Robotern, die „komplexe Aufgaben in gefährlichen, schlecht zugänglichen, menschengemachten Umgebungen“²⁰ erfüllen sollten (vgl. [160]). Die teilnehmenden Teams hatten einen Roboter zu bauen, der einen festgelegten Parcours absolvieren sollte. Forscher_innen der TU Darmstadt, der Universität Hannover und der Universität Bonn beteiligten sich an dem Wettbewerb – das Team *NimbRo Rescue*, das am Lehrstuhl für *Autonome Intelligente Systeme* der Universität Bonn arbeitete, belegte schließlich den vierten Platz im Finale der Robotics Challenge (vgl. [161], [162] und [163]). Anders als bei der Urban Challenge waren die Roboter in diesem Wettbewerb allerdings ferngesteuert und unterstützten die Operator_innen lediglich durch automatische Stabilisierung und die Optimierung der Bewegungen. Vom Team *NimbRo Rescue* wurden daher in der Entwicklungsphase kaum Methoden der KI genutzt, die Erkennung von Hindernissen und die Stabilisierung der Bewegung erreichte der Roboter mehr durch eine sinnvolle Anordnung und Steuerung von Sensoren (vgl. [SRD⁺17]). Dennoch waren am Forschungsprojekt viele KI-Forscher_innen beteiligt und sowohl die DARPA als auch die Entwickler_innen bezeichneten die Roboter als *semi-autonom* oder *überwacht autonom*. So ist zumindest der Wunsch erkennbar, sogenannte *Search-and-Rescue*-Missionen oder sonstige militärische Hilfeinsätze immer weiter zu automatisieren.

Im Fall der DARPA-Wettbewerbe wurde also an zivilen Hochschulen intensiv für zukunftsweisende Technologie des US-Militärs geforscht, ohne dass die Projekte durch direkte Drittmittel gefördert wurden. Da den Teams am Ende höchstens ein Preisgeld in Aussicht stand, wurden die Finanzmittel entweder durch Sponsor_innen oder die Universität aufgebracht. Zumindest aber die an den Universitäten angestellten Forscher_innen wurden für diese Arbeit von der Allgemeinheit bezahlt.

²⁰Übersetzung des Autors aus dem Englischen

Dass die künstliche Intelligenz bei weitem noch nicht so weit gediehen ist, wie sich dies die Forscher_innen und deren Geldgeber_innen wünschen würden, ist an der DARPA Robotics Challenge gut erkennbar: Ferngesteuerten Robotern mit klug eingebundener unterstützender Sensorik wird schon eine Teilautonomie zugesprochen. Mit intelligenten Maschinen hat dieser Umstand allerdings reichlich wenig zu tun – die Roboter sind weder selbstständig lernfähig noch können sie eigene Schlussfolgerungen ziehen. In vielen Bereichen, in denen das Militär gerne intelligente autonome Systeme hätte, ist die menschliche Komponente daher immer noch der zentrale Bestandteil der Lauffähigkeit. Ein niedrigschwelliger Zugang militärischer Forscher_innen zu Vernetzungsstrukturen zwischen zivilen Wissenschaftler_innen macht den Fortschritt in der Forschung zur künstlichen Intelligenz für militärische Geldgeber_innen aber zumindest abschätzbar.

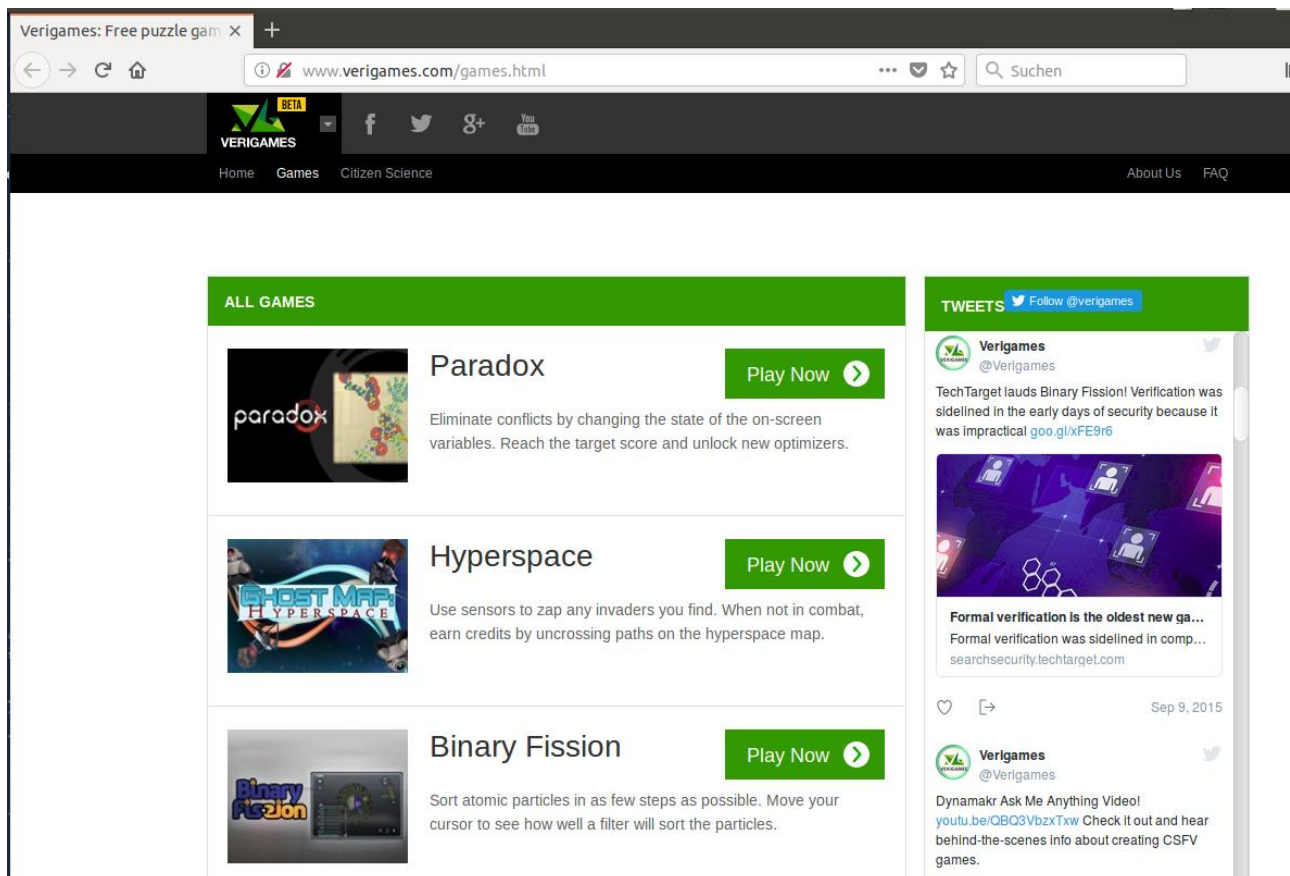


Abbildung 4.13: Screenshot der Website verigames.com/games.html.

Um die teuren und oft schlicht nicht vorhandenen menschlichen Kapazitäten abzufangen, versucht sich die DARPA derzeit an einer neuen Form von intelligenter Programmierung: dem *Crowdsourcing*. Ein wichtiger Schritt in der Softwareentwicklung ist die Verifikation von Code. Um festzustellen, ob ein Programm auch das tut, was es soll, müssen Informatiker_innen einen mathematischen Beweis über seine Korrektheit führen (vgl. [LS87]). Zur Verifikation gibt es verschiedene Verfahren und Hilfestellungen, die allerdings eine erschwerende Gemeinsamkeit haben: Für den

Korrektheitsbeweis müssen meist manuell sogenannte *Invarianten* gefunden werden, was gerade bei Programmschleifen keine Trivialität darstellt. Dass diese Aufgabe bei Software mit mehreren tausenden oder zehntausenden Zeilen Code erhebliche menschliche Kapazitäten fordert, ist leicht vorstellbar. Aus diesem Grund versuchen Forscher_innen vermehrt, die Suche nach Invarianten für den Verifikationsprozess zu automatisieren. Die ersten Versuche, diese Automatisierung mit Methoden der künstlichen Intelligenz – wie etwa dem maschinellen Lernen – vorzunehmen, führten aufgrund von hohen Laufzeiten, Schwierigkeiten in der Wissensrepräsentation und menschlich quasi nicht nutzbaren Invarianten nur zu eingeschränkter Praktikabilität (vgl. [FSLT15]). Als Alternative stellte die DARPA im Jahr 2013 ein Programm zur *Crowd Sourced Formal Verification* (kurz: *CSFV*) vor. Dabei wurde die Suche nach Invarianten in Flash-Games portiert und diese über die Website *verigames.com* öffentlich spielbar gemacht (vgl. [164] und [165]). Die für das Projekt bezahlten Wissenschaftler_innen implementierten die Flash-Games so, dass Spieler_innen durch logische Ratselaufgaben zum Ziel kamen – sie arbeiteten dabei aber in Wirklichkeit als Klassifikator für gute Vorschläge von Invarianten, die dann der Verifikation von militärisch genutzter Software dienten (vgl. [FSO⁺16]).

Mit der CSFV machen DARPA und die beteiligten KI-Forscher_innen also einen Schritt von den Methoden der künstlichen Intelligenz zur Intelligenz der Masse. Die Spieler_innen betreiben teilweise unbewusst Militärforschung und die DARPA ergänzte die Forschungslandschaft damit um weitere Teile der Zivilgesellschaft. Warnungen, Hintergrundinformationen oder Einschränkungen für die Nutzer_innen gibt es wenige – am Crowdsourcing sollen möglichst viele Menschen weltweit teilnehmen, ohne zwingend über die Folgen des Spiels informiert zu werden. Die einzige wirklich nennenswerte Restriktion sind Verordnungen der US-Regierung, dass die Games aufgrund ihres militärischen Nutzens nur von Personen ab 18 Jahren gespielt werden dürfen. Auch ein öffentlicher Diskurs über den Zweck der Spiele bleibt weitgehend aus – ein Artikel der BBC legt stattdessen dar, wie „das Spielen von Computerspielen dabei helfen kann, die Welt zu einem sichereren Ort zu machen“²¹ (vgl. [166]).

So schafft die DARPA durch Wettbewerbe und Crowdsourcing neue attraktive Wege für die militärische Nutzung ziviler Forschungsergebnisse – alles parallel zu den klassischen Methoden der zivil-militärischen Vernetzung auf Forschungskonferenzen. Das Crowdsourcing stellt dabei eine Einbindung der Zivilgesellschaft abseits der Wissenschaftslandschaft dar.

4.4.6 Militärische Einflüsse auf die zivile Forschungs- und Studienlandschaft

Egal ob Auftragsforschung oder wissenschaftliche Vernetzung – Kooperationsstrukturen haben immer Auswirkungen auf alle beteiligten Parteien. Nur sehr selten beschränkt sich eine Zusammenarbeit auf den Kauf von Wissen – meist beeinflussen

²¹ Übersetzung des Autors aus dem Englischen

sich die Forschungspartner_innen auch fachlich gegenseitig. Und so hat die starke Einbindung von KI-Forscher_innen an zivilen Hochschulen in militärrelevante Projekte nicht nur die Entwicklung neuer Kriegstechnologie zur Folge, sondern ebenso einen immer weiter zunehmenden militärischen Einfluss auf die zivile Studien- und Forschungslandschaft. Dabei ist es für die Verknüpfung ziviler und militärischer Forschungsthemen sicher förderlich, dass sich die Relevanz der KI-Forschung größtenteils aus ihrer Anwendbarkeit speist. Der Druck auf Forscher_innen, stets einem konkreten praktischen Nutzen und einer finanziellen Sicherung zuarbeiten zu müssen, drängt sie dazu, sich für privatwirtschaftliche, staatliche und militärische Geldgeber_innen attraktiv zu machen und dementsprechende Drittmittel einzuwerben.

Die meisten bereits betrachteten Kooperationsprojekte zur modernen KI zwischen militärischen Institutionen und zivilen Hochschulen haben daher auch Einfluss auf die hiesige Forschungslandschaft der künstlichen Intelligenz. So bewirken beispielsweise die gemeinsamen Dual-Use-Bestrebungen von Bundesregierung und BMVg (vgl. Abschnitte 4.4.3 und 4.4.4), dass einerseits explizit militärische Problemstellungen von Instituten wie dem IOSB in zivile Forschungszusammenhänge wie den Lehrstuhl für interaktive Echtzeitsysteme am KIT getragen werden. Andererseits führen sie dazu, dass die Themen der sogenannten „zivilen Sicherheitsforschung“ und damit die staatliche und polizeiliche Überwachungs- und Gewaltlogik einen Platz an den deutschen Hochschulen finden. Aus militärischer Sicht noch unkomplizierter ist die Beeinflussung von Forschungsthemen an zivilen Hochschulen über Konferenzen oder mithilfe von Wettbewerben, wie der DARPA Urban Challenge mit deutscher Beteiligung (vgl. Abschnitt 4.4.5). All diese Formen der Zusammenarbeit haben vor allem eines zur Folge: Militärische Fragestellungen werden in der zivilen Forschungslandschaft immer selbstverständlicher.

Ein großer Teil der aktuellen KI-Forschung ist an zivilen Hochschulen verortet. Und da an Hochschulen Studierende mit besonderem Augenmerk auf die Themenschwerpunkte der Dozierenden gelehrt werden, finden militärische Fragestellungen auch öfter den Weg von den Auftraggeber_innen über an den Projekten beteiligte Dozierende bis in die Inhalte der Vorlesungen und Abschlussarbeiten. Welche Ausprägungen die Verquickung zwischen überwiegend militärisch forschenden Instituten und zivilen Hochschulen annehmen kann, ist am Beispiel des Lehrstuhls für IES erkennbar: Neben einem Lehrstuhlleiter, der gleichzeitig die Leitung des IOSB innehat, sind am Lehrstuhl für IES noch weitere Mitarbeiter_innen des IOSB als Dozierende gelistet (vgl. [133]). So gehen militärrelevante Forschungsinhalte aus dem Arbeitsalltag der Dozierenden unweigerlich in die zivile Studienlandschaft ein (vgl. [167], [168] und [169]). Außerdem werden Studierende der Informatik am KIT für Abschlussarbeiten, HiWi-Stellen und anschließend auch für Dissertationen am IOSB mit explizit militärrelevantem Inhalt angeworben (vgl. z. B. [170], [171] und die in Abschnitt 4.4.3 genannten Dissertationen).

Im Vergleich zu den klassischen Einflussbereichen militärrelevanter Projekte auf die zivile Forschungs- und Studienlandschaft bildet das Crowdsourcing bisher noch eine Ausnahme mit erheblichem Potential für die militärischen Auftraggeber_innen:

Teile der Zivilgesellschaft werden oft ohne ihr Wissen in die zivile Forschungslandschaft integriert und arbeiten militärischen Zwecken zu. Dabei spielen universitäre KI-Forscher_innen – im Falle des Beispiels zur *Crowd Sourced Formal Verification* allerdings US-amerikanische Wissenschaftler_innen – eine essentielle Rolle bei der Verbindung zwischen der Forschung für das US-Militär und der Zivilgesellschaft.

4.4.7 Zwischenfazit zu den modernen KI-Methoden

Durch Ausdifferenzierung der Fragestellungen und Spezialisierung in den Forschungsschwerpunkten konnten Methoden der künstlichen Intelligenz schließlich für die moderne Kriegsführung nutzbar gemacht werden. Doch trotz der großen Krisen der klassischen KI in den 1970er und 1980er Jahren wurde eine zentrale Komponente der Forschungspraxis nie merklich angetastet: Noch immer begründen die Wissenschaftler_innen die Relevanz ihrer Ergebnisse fast ausschließlich mit einem konkreten Anwendungsbezug. Dies führt zu einer ungebrochenen Abhängigkeit der KI-Forscher_innen von ihren Geldgeber_innen – sowohl finanziell als auch hinsichtlich ihres Ansehens in der internationalen Forschungsgemeinde.

Heute werden KI-Methoden unter anderem bei der automatischen Zielerkennung und -verfolgung in Kamerabildern, der Wegfindung oder der intelligenten Situationseinschätzung in Überwachungsdaten genutzt. Der Forschungsbereich ist daher ein essentieller Bestandteil der modernen Kriegsführung: Für die Entwicklung der aktuellsten Kampfdrohnen, (teil)autonomer Fahrzeuge sowie der neuesten Überwachungstechnik ist die KI unabdingbar. Gerade polizeiliche und militärische Anforderungen an die intelligente Datenverarbeitung überschneiden sich dabei oft erheblich. Ein bedeutender Teil der militär- und polizeirelevanten Arbeit zur künstlichen Intelligenz findet an zivilen Forschungseinrichtungen statt – nur unter großem finanziellen und planungstechnischen Aufwand würde sich die Entwicklung der benötigten KI-Methoden in rein militärische Institute auslagern lassen. Das deutsche Verteidigungsministerium verfolgt deshalb seit mehreren Jahren eine äußerst wirksame Dual-Use-Strategie: Einerseits werden Institute zur Wehrforschung stärker an die zivile Hochschullandschaft angegliedert, andererseits wird auch die sogenannte *zivile Sicherheitsforschung*, die formell einen Fokus auf polizeiliches Wirken hat, gezielt militärisch nutzbar gemacht. Auch die US-amerikanische DARPA schafft durch ihre Wettbewerbe zur autonomen Fortbewegung wichtige Anreize für deutsche Forscher_innen, sich an der militärrelevanten Forschung zu beteiligen. Diese Verschränkung ziviler und militärischer Forschungsansätze hat selbstverständlich auch Auswirkungen auf die hiesige Forschungs- und Studienlandschaft in der KI, wo militärische Fragestellungen zunehmend Raum bekommen.

Durch eine systematische Betrachtung der neueren KI-Forschung nach Abschnitt 2.1.3 lässt sich genauer nachvollziehen, welchen *Mitteln* und *Zwecken* sie in der modernen Kriegsführung dient. Auch hier kann wieder zwischen einer *primären* (oder *direkten*) und *sekundären* (oder *indirekten*) Bedeutung moderner KI-Methoden für die Kriegsführung unterschieden werden. Die wichtigsten direkten Mittel, welche die KI-

Forschung bedient beziehungsweise in Zukunft bedienen soll, sind die *Automatisierung von Methoden, Waffen und Gerät* – etwa durch automatische Zielerkennung, autonome Fortbewegung oder algorithmische Entscheidungsfindung – sowie die *Vermischung des Zivilen und des Militärischen* – beispielsweise durch eine gezielte Dual-Use-Agenda oder militärische Wettbewerbe. Unterstützend wirken KI-Methoden außerdem bei der *Informationsakquise* – zum Beispiel durch automatische Bilderkennung – und der *Spezialisierung der Streitkräfte* – mittels (teil)automatisierter Waffentechnik und Kriegsgerät. Auch die moderne KI-Forschung arbeitet damit wieder in unterschiedlicher Gewichtung allen drei Ansätzen zur Brechung feindlichen Widerstandes aus Abschnitt 2.1.3 zu.

- Erstens der *Abschreckung* und dem *Demonstrieren von Überlegenheit*: Automatisierte Kriegstechnik kann ein Klima ständiger Bedrohung erzeugen und vermittelt Überlegenheit gegenüber weniger hoch technisierten bewaffneten Gruppen.
- Zweitens der *schnellen und flexiblen Einsetzbarkeit*: Automatisierte und (teil)autonome Systeme sind leichter bedienbar und können daher auch von ungeschulten Soldat_innen gesteuert werden; intelligente Programme sollen in Zukunft zudem schneller entscheiden können als der Mensch.
- Drittens der *gesellschaftlichen Akzeptanz*: Die Präsenz des Militärs in der zivilen KI-Forschung ist inzwischen selbstverständlich; außerdem sollen automatisierte Systeme Kriegsentscheidungen bald zuverlässiger als der Mensch treffen und der Einsatz solcher Systeme kann weniger menschliche Verluste auf der eigenen Seite bedeuten.

Dass die Tendenz der zunehmenden Automatisierung militärischer Systeme längst nicht von allen KI-Forscher_innen gutgeheißen wird, bewiesen im Jahr 2015 einige angesehene Wissenschaftler_innen mit einem offenen Brief gegen die Entwicklung vollautonomer Waffensysteme (vgl. [80]). Inzwischen wurde dieser von gut 3000 weiteren Forscher_innen aus den Fachbereichen künstliche Intelligenz und Robotik unterzeichnet. Im Jahr 2017 folgten diesem Beispiel mehr als 100 KI-Expert_innen aus Industrie, Forschung und Entwicklung in einem offenen Brief an die Vereinten Nationen (vgl. [172]). Sie drängen darin nochmals auf eine internationale Ächtung letaler autonomer Waffensysteme. In der Tat steht die militärische Gangbarmachung von KI-Methoden aus zivilgesellschaftlicher Sicht für einige äußerst problematische Zukunftstechnologien: Umfassende Überwachung, autonome Kampfdrohnen und die immer weitere Verschärfung von Migrationsabwehr sind nur einige Anwendungsbeispiele für intelligente Systeme.

Wieder stellt sich nach den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.5 zur Wissenschaftsverantwortung und dem Wissenschaftsverständnis die Frage, inwieweit KI-Forscher_innen für die negativen gesellschaftlichen Auswirkungen ihrer Arbeit als verantwortlich gesehen werden können. Und – was in Abschnitt 4.2.4 bereits angeklungen ist – welche Folgen

der starke Anwendungsbezug und die Drittmittelabhängigkeit der KI-Forschung für die Wissenschaftlichkeit des Fachbereiches haben.

Kapitel 5 – Fazit

Die vorliegende Arbeit behandelt drei zentrale, teilweise eng miteinander verwobene Ansätze (vgl. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.3): erstens die Wissenschaftslandschaft der Mathematik und der Informatik im Bezug auf eine Verquickung von Forschungsergebnissen mit der modernen Kriegsführung nachzuzeichnen; zweitens die Notwendigkeit eines fachinternen und gesamtgesellschaftlichen Diskurses über ebenjene Verquickung zu klären; und drittens Anknüpfungspunkte für eine weiterführende und vertiefende wissenschaftliche Bearbeitung einzelner Teilaspekte der Thematik zu bieten. Diese drei Ideen verlangten nach einem sehr grundlegenden Vorgehen in der Forschungsarbeit – denn bisher existieren zum Thema *Mathematik, Informatik und Krieg* weder ein fundierter Forschungsstand noch ein reger fachinterner oder gesamtgesellschaftlicher Diskurs (vgl. Kapitel 1). Es wurden schließlich zwei Hypothesen formuliert, anhand derer sich die Arbeitsweise stetig schärfen und ausrichten ließ (vgl. Abschnitt 2.3.2):

1. Es besteht eine erhebliche Verquickung zwischen mathematischer und informatischer Forschung an zivilen deutschen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung; diese Verbindung ist auch ohne eigene Mitarbeit an militärrelevanten Forschungsprojekten erkennbar.
2. Die Relevanz eines wissenschaftlichen und gesamtgesellschaftlichen Diskurses über militärisch nutzbare Forschung aus der Mathematik und der Informatik ist aktuell und war seit Ende des Zweiten Weltkrieges stetig gegeben.

Im Folgenden soll nun das Forschungsthema aus drei Blickwinkeln abgeschlossen werden: Einem zusammenfassenden Fazit zur Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung, einer Darstellung von Problem-, Diskurs- und Lösungsansätzen sowie einer Übersicht vergangener und zukünftiger Wirkungsfelder der vorliegenden Arbeit. Die noch ausstehende Bewertung der beiden Hypothesen wird dabei das Vorgehen maßgeblich mitbestimmen.

5.1 Zur Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und der modernen Kriegsführung

Bei der Analyse mathematischer und informatischer Fachbereiche in Kapitel 4 fällt auf, dass sich die einzelnen Teilgebiete in ihrer Verquickung mit der militärischen Anwendung oft stark voneinander unterscheiden. Diese Verschiedenheit findet sich in mehreren Facetten der wissenschaftlich-militärischen Kooperation wieder: der geschichtlichen Bedeutung des jeweiligen Fachbereichs für die militärische Anwendung, aktuellen fachtypischen Wechselwirkungen zwischen dem Forschungsgebiet und der modernen Kriegsführung sowie der Transparenz von Forschungsergebnissen und damit der Erkennbarkeit von militärrelevanter Forschung. Zum Beispiel:

- Geschichtlich sind die Kryptologie oder einzelne Konzepte zur optimalen Steuerung schon immer eng mit der Kriegsführung verwoben, während Methoden der numerischen Mathematik oder der künstlichen Intelligenz erst durch gezieltes militärisches und wissenschaftliches Wirken für den Krieg nutzbar gemacht wurden.
- In der Numerik ist es üblich, studentische Kapazitäten in die militärrelevante Forschung einzubinden, in der Optimierung existieren dagegen weit öfter Drittmittelkooperationen zwischen Hochschulen sowie militärischen Interessenträger_innen und ein großer Teil der Forschung zur aktuellen KI findet an externen Forschungsinstituten statt, wobei das BMVg dort eine explizite Dual-Use-Agenda verfolgt.
- Die interessensgeleitete Nutzung von KI-Methoden hat erhebliche Auswirkungen auf die universitäre Forschungslandschaft, während solche Entwicklungen in der numerischen Mathematik eher in der Studienlandschaft spürbar sind.
- Ergebnisse aus der Kryptologie werden häufig geheim gehalten, wogegen die Forschung in der Optimierung weitaus offener kommuniziert wird.
- Und so weiter.

Die konkreten Fachbeispiele und die allgemeineren Betrachtungen aus den Abschnitten 4.1 bis 4.4 machen dabei klar, dass die Formen wissenschaftlich-militärischer Kooperation in der Mathematik und der Informatik oft sehr komplex gestrickt und keineswegs immer leicht zu durchblicken sind. So wären etwa die Dual-Use-Agenda des BMVg und anderer Bundesministerien (vgl. Abschnitte 4.4.3 und 4.4.4) nicht ohne entsprechende wissenschaftspolitische Publikationen, die Verwendung von Forschungsergebnissen des Bremer Zentrums für Technomathematik in den Spionagesatelliten der Bundeswehr nicht ohne eine Pressemitteilung des OHB-Konzerns (vgl. Abschnitt 4.3.1 und [113]) und die vom BMVg an der Universität Leipzig in Auftrag gegebene Studie zum diskreten Logarithmus nicht ohne parlamentarische Anfragen (vgl. Abschnitt 4.1.3 und [Sä13, S. 6]) sichtbar gewesen. Aufgrund der fachlichen Unterschiede und der häufig

komplexen Wechselwirkungen zwischen Mathematik, Informatik und der modernen Kriegsführung schien der Fokus auf einzelne Teilbereiche als Arbeitsweise sinnvoll und nötig. Denn so konnten einige Aspekte der Forschungsthematik tiefgehender und fachlich abgegrenzt behandelt werden.

Trotz der oft sehr spezifischen Wechselwirkungen einzelner mathematischer und informatischer Teilbereiche mit der militärischen Anwendung finden sich auch einige Zusammenhänge, die allgemeinere Aussagen über die Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und moderner Kriegsführung zulassen. In den Zwischenfazits von Kapitel 4 (also den Abschnitten 4.1.7, 4.2.4, 4.3.5 und 4.4.7) wird sichtbar, dass die mathematische und informatische Forschung an deutschen Hochschulen in bedeutendem Maße zur modernen Kriegsführung beiträgt. Mehr noch: Die Systematisierung des Kriegsbegriffes in Abschnitt 2.1.3 und die jeweilige Einordnung der betrachteten Teilbereiche in den Zwischenfazits zeigen, dass die in dieser Arbeit analysierten mathematischen und informatischen Methoden beinahe jedem Mittel und jedem Zweck der modernen Kriegsführung zuarbeiten. Auch in die andere Richtung lässt sich die Wirkung der wissenschaftlich-militärischen Kooperation zusammenfassen: Die interessensgeleitete Nutzung mathematischer und informatischer Forschungsergebnisse hat erhebliche Auswirkungen auf die zivile Forschungs- und Studienlandschaft. Die Informatik oder die Mathematik infolgedessen als „militarisiert“ zu bezeichnen, wäre allerdings zu weit gegriffen – nach wie vor existieren in beiden Fächern rein theoretische Grundlagenforschung und Drittmittelkooperationen mit ausschließlich zivilen Akteur_innen. Aber der gesamtwissenschaftliche Trend hin zur Ökonomisierung und zur Spezialisierung der Wissenschaften ist auch in der Mathematik und der Informatik stark spürbar. Rein theoretische Fachbereiche verlieren gegenüber den angewandten zunehmend an Boden und Bedeutung, was sich selbstverständlich auf die Ausrichtung der wissenschaftlichen Arbeit niederschlägt. Zudem verlangen privatwirtschaftliche und militärische Drittmittelgeber_innen oft auch die Geheimhaltung von Forschungsergebnissen, um damit einen Vorteil gegenüber konkurrierenden Staaten und Konzernen zu haben. Viele Projektergebnisse an zivilen Forschungseinrichtungen finden deshalb nie oder nur stark gekürzt den Weg zurück in die Wissenschaft, sie verbleiben stattdessen größtenteils bei den Auftraggeber_innen. So haben also alle außeruniversitären Kooperationspartner_innen – auch militärische – Einfluss auf die zivile Forschungslandschaft.

Die erste Hypothese dieser Arbeit trifft also weitgehend zu: Es besteht eine erhebliche Verquickung zwischen mathematischer und informatischer Forschung an zivilen deutschen Hochschulen mit der modernen Kriegsführung. Der Halbsatz zur Erkennbarkeit der wissenschaftlich-militärischen Kooperation muss allerdings korrigiert werden: Militärrelevante Forschung ist häufig mit Geheimhaltungsklauseln geschützt, versteckt sich hinter ziviler Sicherheitsforschung oder wird allgemein nur sehr zurückhaltend kommuniziert. Diese Intransparenz kann einen tiefgreifenden Zugang zu einzelnen Forschungsprojekten verhindern oder erschweren – bei weitem nicht jede Verbindung

von mathematischer und informatischer Forschung mit der modernen Kriegsführung ist damit erkennbar.

5.2 Problem-, Diskurs- und Lösungsansätze

Die mathematische und informatische Forschung an deutschen zivilen Hochschulen ist also merklich mit der modernen Kriegsführung verquickt. Im bisherigen Verlauf der Arbeit¹ lässt sich erkennen, dass dies zwei allgemeine Problemstellungen motiviert: Erstens hat Kriegsführung immer negative Auswirkungen auf die Zivilgesellschaft, von der bloßen Bedrohung der psychischen und physischen Unversehrtheit bis hin zum Tod großer Personengruppen. Mathematiker_innen und Informatiker_innen sind mittels kriegsrelevanter Forschung indirekt an dieser Praxis beteiligt. Zweitens haben die militärischen Interessen an der Mathematik und der Informatik erhebliche Auswirkungen auf die zivile Forschungslandschaft – kriegsrelevante Fragestellungen bekommen Raum in wissenschaftlichen Zusammenhängen, militärische Auftragsforschung trägt zur Verwertungslogik und zu Ökonomisierungstendenzen innerhalb der Forschungslandschaft bei und die intransparente Handhabung von militärrelevanten Forschungsergebnissen kann einen regen wissenschaftlichen Austausch behindern. Nach den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.5 zur Wissenschaftsverantwortung und dem Wissenschaftsverständnis stellen sich damit (wie auch schon in den Zwischenfazits in Kapitel 4) zwei Fragen: Inwieweit können Mathematiker_innen und Informatiker_innen für die negativen gesellschaftlichen Auswirkungen ihrer Forschung verantwortlich gezeichnet werden? Und welche Folgen hat das militärische Interesse für die Wissenschaftlichkeit der mathematischen und informatischen Forschung?

Zunächst sind diese Problemansätze sehr allgemein gehalten – beide Fragestellungen ließen sich ohne weiteres auch für andere kriegsrelevante Forschungsgebiete, wie etwa viele Ingenieurs- oder Naturwissenschaften, formulieren. Genauso ist die oben genannte Problematik nicht nur für militärische Forschung, sondern auch für andere anwendungsbezogene Projekte gültig – etwa bezüglich der Automatisierung von Finanzgeschäften oder staatlicher Überwachung. Dennoch sind es ebenjene allgemeinen Fragen, die verschiedene tiefergreifende Facetten des Diskurses über militärrelevante Forschung in der Mathematik und der Informatik motivieren. Die Debatten können sich sowohl um einzelne Fachbereiche als auch um die gesamte Wissenschaftslandschaft drehen, sie lassen sich innerhalb der Fachwissenschaften, politisch oder gesamtgesellschaftlich führen. Dass all diese Facetten des Diskurses wichtig sind und ihre eigene Berechtigung besitzen, wird in Kapitel 1 sowie den Abschnitten 2.3.1 und 5.1 klar. Denn einerseits sollte ein allgemeiner Diskurs von allen betroffenen und beteiligten Gruppen und Individuen geführt werden – sie alle ergänzen und bereichern sich gegenseitig mit ihrer Sichtweise des Problems. Andererseits ist ein tieferer Zugang zu fachwissenschaftlichen oder wissenschaftspolitischen Spezifika einer Verquickung zwischen Wissenschaft und Krieg oft nur in den jeweiligen Forschungsbereichen und

¹besonders in Kapitel 1 und den Zwischenfazits in Kapitel 4

Gremien möglich – auch hier wäre also eine Auseinandersetzung mit der Thematik sinnvoll und ein Austausch mit der Allgemeinheit wichtig.

Wie Kapitel 3 zeigt, werden und wurden jene Debatten auch stellenweise geführt: Seit Ende des Zweiten Weltkrieges wird die allgemeine Verquickung zwischen Wissenschaft und Krieg meist wissenschafts- oder gesellschaftspolitisch diskutiert, ab dem Kalten Krieg griffen das Thema vermehrt auch fachwissenschaftliche Gruppierungen auf. Bis heute haben sich diese beiden Formen des Diskurses zwar stellenweise gehalten, besonders präsent sind sie aber nicht – weder wissenschaftlich noch gesamtgesellschaftlich. In der Informatik sind es vor allem politische Gruppen wie das FlFF oder der internationale Zusammenschluss von KI-Forscher_innen zur Ächtung vollautonomer Waffensysteme, die eine fachwissenschaftliche Debatte in Deutschland prägen; in der Mathematik gibt es keine Entwicklungen dieser Art. Insgesamt ist es um eine Diskussion der Verquickung von Wissenschaft und Krieg relativ schlecht bestellt, in der Informatik und vor allem der Mathematik fällt die Bilanz besonders mager aus.

Gerade auf Seiten der Wissenschaft gäbe es einige Möglichkeiten den Diskurs über militärrelevante Forschung in Deutschland zu fördern. Eine Grundvoraussetzung für einen offenen, kritischen Austausch ist allerdings die Transparenz von Forschungsprojekten, etwa hinsichtlich ihrer Zielsetzung, ihrer Fragestellung, der Mittel und Beteiligten. Weiterhin könnten sich Hochschulen wieder mehr als Orte der Debatte und der Kritik profilieren und im gleichen Zuge die Hochschulautonomie, die Selbstverwaltung und demokratische Strukturen an zivilen Forschungseinrichtungen gefördert werden. Aus einem offenen Diskurs ließen sich dann Lösungsansätze für die eingangs genannten Problemstellungen entwickeln – so etwa die Implementierung von Zivilklauseln an den Hochschulen oder einzelnen Forschungsinstituten, eine allgemeine Abkehr von Drittmitteln in der öffentlichen Forschung oder eine gezielte Förderung von Methoden und Projekten, mit denen die Fachwissenschaften positiven gesellschaftlichen Prozessen wie der Friedensbildung oder der Armutsbekämpfung zuarbeiten.

Auch die zweite Hypothese der Arbeit darf somit als zutreffend bezeichnet werden: Die Relevanz eines wissenschaftlichen und gesamtgesellschaftlichen Diskurses über militärisch nutzbare Forschung aus der Mathematik und der Informatik ist aktuell und war seit Ende des Zweiten Weltkrieges stetig gegeben. Es hat sich gezeigt, dass ein solcher Diskurs für alle militärisch forschenden Fachbereiche wichtig wäre und schließlich auch zusammenfassend in Debatten über die allgemeine Verquickung zwischen Wissenschaft und Krieg übergehen kann. Gerade die Mathematik und die Informatik nehmen dabei mit ihrer großen und gleichzeitig weitgehend unbeachteten Bedeutung für die moderne Kriegsführung eine Sonderrolle ein, die durch die vorliegende Arbeit herausgestellt werden sollte.

5.3 Nachwort und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit habe ich versucht, die mathematische und informatische Forschungslandschaft in Deutschland bezüglich ihrer Verquickung mit der modernen Kriegsführung nachzuzeichnen sowie einen wissenschaftlichen und gesamtgesellschaftlichen Diskurs über ebene Verquickung zu motivieren. Dabei war es mir wichtig, das Thema sowohl fachlich zu verorten – also innerhalb der Mathematik und der Informatik – als auch seinen gesamtgesellschaftlichen Bezug herauszustellen. Mit der Bewertung der zwei ursprünglichen Hypothesen zu den Wechselwirkungen zwischen Mathematik, Informatik und Krieg sowie der Relevanz eines wissenschaftlichen und gesamtgesellschaftlichen Diskurses ist der schriftliche Teil der Arbeit abgeschlossen. Das fertige Buch kann etwa als grundlegender Beitrag zu den Themen *Mathematik und Gesellschaft* oder *Informatik und Gesellschaft* verstanden werden, eine Aktualisierung der Verbindungen zwischen Mathematik, Informatik und Krieg – also mit Bezug zur *modernen* Kriegsführung – darstellen oder mittels seiner Unterabschnitte einzelne geschichtliche, gesellschaftliche oder philosophische Aspekte der Mathematik und der Informatik behandeln.

Abgesehen von dieser Monographie schien es mir bei diesem interdisziplinären, bisher weitgehend unbearbeiteten und stark gesellschaftsbezogenen Thema wichtig, auch aktiv an fachlichen und (wissenschafts)politischen Diskursen teilzunehmen. So unterstützte ich in den letzten Jahren unter anderem die Zeitschrift *Wissenschaft und Frieden* als Redakteur, die *Informationsstelle Militarisierung* im Büro und als Beirat sowie das *Forum InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung* mit diversen Texten und Vorträgen. Dabei entstanden mehrere Artikel zur Verquickung von Mathematik und Informatik mit der modernen Kriegsführung (unter anderem [Gru15], [Gru16] und [Gru18b]) und es war mir möglich das Thema auf verschiedenen wissenschafts- und gesellschaftspolitischen Veranstaltungen als Referent anzubringen – etwa dem IMI-Kongress 2016 und der FIFFKon 2017, dem Cyberpeace-Forum des FIFF im Jahr 2016, einer eintägigen Drohnenkonferenz des AStA Hannover im Jahr 2015 und bei mehreren weiteren Vorträgen. Den innerwissenschaftlichen Diskurs konnte ich beispielsweise begleiten durch Beiträge zum Institutskolloquium des *Internationalen Zentrums für Ethik in den Wissenschaften* in Tübingen, zum IMFUFA-Seminar der dänischen Universität Roskilde, zu einem Seminar für das Studium Generale an der Universität Tübingen und zu einer studentischen Tagung über *kritische Wissenschaft und Wissenschaft in der Kritik* in Jena; außerdem durch einen Aufsatz in den *Siegener Beiträgen zur Geschichte und Philosophie der Mathematik* (vgl. [Gru17a]) sowie durch einen *Letter to the Editor* in den *Notices of the American Mathematical Society* (vgl. [Gru18a]), der auch etwas Resonanz in der US-amerikanischen Debatte erfuhr.

Mit großer Wahrscheinlichkeit wird die mathematische und informatische Forschung auch in Zukunft höchst relevant für die moderne Kriegsführung bleiben. Der in dieser Arbeit motivierte Diskurs über die Verquickung zwischen Mathematik, Informatik und Krieg wird auf absehbare Zeit also keine Relevanz einbüßen. In diesem Sinne werde ich auch weiter zu den verschiedenen Facetten des Themas arbeiten:

einerseits wissenschafts- und gesellschaftspolitisch für und mit der IMI, dem FIFF sowie Wissenschaft und Frieden; andererseits fachwissenschaftlich und interdisziplinär – etwa tiefergehend zu philosophischen und ethischen Fragestellungen, der Einbettung einer gesellschaftlichen Komponente in die Mathematik und die Informatik sowie zu Ansätzen, die Forschung in beiden Fächern einem rein konstruktiven gesellschaftlichen Nutzen zuzuführen. Viele mögliche weiterführende Fragestellungen zur Thematik wurden im Verlauf der Arbeit (vor allem in Abschnitt 2.3.1) bereits genannt. Ich werde mich in nächster Zeit besonders mit folgenden auseinandersetzen: einer ständigen Aktualisierung der Bedeutung mathematischer und informatischer Forschung für die moderne Kriegsführung – sowohl beschränkt auf einzelne Teilbereiche als auch im Überblick zusammengefasst –, den Fragen nach Ökonomisierung und Militarisierung der Forschungs- und Studienlandschaft sowie einer eingehenden Analyse des Wissenschaftsbegriffes in der Mathematik und der Informatik, auch mit starkem Bezug auf die geschichtliche Entwicklung der Fachgebiete.

Literaturverzeichnis

- [AAA94] *AAAI '94: Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence*. American Association for Artificial Intelligence, 1994
- [ABD⁺15] ADRIAN, David ; BHARGAVAN, Karthikeyan ; DURUMERIC, Zakir ; GAUDRY, Pierrick ; GREEN, Matthew ; HALDERMAN, J. A. ; HENINGER, Nadia ; SPRINGALL, Drew ; THOMÉ, Emmanuel ; VALENTA, Luke ; VANDERSLOOT, Benjamin ; WUSTROW, Eric ; ZANELLA-BÉGUELIN, Santiago ; ZIMMERMANN, Paul: Imperfect Forward Secrecy: How Diffie-Hellman Fails in Practice. In: *22nd ACM Conference on Computer and Communications Security*, 2015
- [ACM10] *BQGT '10: Proceedings of the Behavioral and Quantitative Game Theory: Conference on Future Directions*. ACM, 2010
- [Ado71] ADORNO, Theodor W. ; KADELBACH, Gerd (Hrsg.): *Erziehung zur Mündigkeit - Vorträge und Gespräche mit Hellmut Becker 1959 bis 1969*. Suhrkamp Verlag, 1971
- [Alt04] ALT, Walter: *Numerische Verfahren der konvexen, nichtglatten Optimierung: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Teubner, 2004
- [Ama99] AMANN, Erwin: *Evolutionäre Spieltheorie: Grundlagen und neue Ansätze*. Springer, 1999
- [And96] ANDERSON, Ross (Hrsg.): *Information Hiding*. Springer, 1996
- [And16] ANDRES, Jacqueline: Operation Restoring Hope im Jemen. In: *Ausdruck* (2016), Nr. 2, S. 7–11
- [ARC⁺15] APPICE, Annalisa (Hrsg.) ; RODRIGUES, Pedro P. (Hrsg.) ; COSTA, Vítor S. (Hrsg.) ; SOARES, Carlos (Hrsg.) ; GAMA, João (Hrsg.) ; JORGE, Alípio (Hrsg.): *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: Proceedings of the ECML PKDD 2015, Part I-III*. Springer, 2015
- [Are13] ARENDT, Hannah: *Vita activa oder Vom tätigen Leben*. Piper Verlag, 2013
- [ASt12] ASTA DER UNIVERSITÄT BREMEN: *Pressemitteilung: AStA begrüßt Entscheidung im Akademischen Senat zum Erhalt der Zivilklausel*. 2012

- [ASt14] ASTA DER UNIVERSITÄT BREMEN: *Zivilklausel und Rüstungsforschung - ein kritischer Überblick*. 2014
- [Bab98] BABOVSKY, Hans: *Die Boltzmann-Gleichung: Modellbildung – Numerik – Anwendungen*. Springer, 1998
- [Bad08] BADER, Thomas: Videobasierte Handgestenerkennung: Anforderungen und Umsetzung für die Interaktion an horizontalen Anzeigen. In: *Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 7-8, S. 429–436
- [Bad11] BADER, Thomas: *Multimodale Interaktion in Multi-Display-Umgebungen*, Fakultät für Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie, Diss., 2011
- [Bau13a] BAUER, Alexander: *Probabilistische Szenenmodelle für die Luftbildauswertung*, Fakultät für Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie, Diss., 2013
- [Bau13b] BAUER, Craig: *Secret History: The Story of Cryptology*. Chapman & Hall/CRC, 2013
- [BB99] BITZER, Frank ; BRISCH, Klaus M.: *Digitale Signatur: Grundlagen, Funktion und Einsatz*. Springer, 1999
- [BBB⁺10] BAUER, Christoph (Hrsg.) ; BRÜCHERT, Oliver (Hrsg.) ; BURKHARDT, Simon (Hrsg.) ; FÄRBER, Corina (Hrsg.) ; HAMMERMEISTER, Juliane (Hrsg.) ; KAPFINGER, Emanuel (Hrsg.) ; SABLowski, Thomas (Hrsg.) ; SCHLESINGER, Nils (Hrsg.): *Hochschule im Neoliberalismus: Kritik der Lehre und des Studiums aus Sicht Frankfurter Studierender und Lehrender*. 2010
- [BCC⁺14] BERNSTEIN, Daniel J. ; CHOU, Tung ; CHUENGSAIANSUP, Chitchanok ; HÜLSING, Andreas ; LANGE, Tanja ; NIEDERHAGEN, Ruben ; VREDENDAAL, Christine van: *Verifiably random secure curves*. Präsentation auf der EUROCRYPT 2014, 33rd Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques, 2014
- [BDF⁺91] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND ; DEUTSCHE DEMOKRATISCHE REPUBLIK ; FRANKREICH ; SOWJETUNION ; GROSSBRITANNIEN ; VEREINIGTE STAATEN VON AMERIKA: *Vertrag über die abschließende Regelung in Bezug auf Deutschland*. 1991
- [BEG10] BERNINGHAUS, Siegfried K. ; EHRHART, Karl-Martin ; GÜTH, Werner: *Strategische Spiele: Eine Einführung in die Spieltheorie*. Springer, 2010
- [Beh17] BEHÖRDEN SPIEGEL: Technologische Souveränität schaffen und ausbauen. In: *Behörden Spiegel newsletter Verteidigung. Streitkräfte. Wehrtechnik* (2017), Nr. 178

- [BF15] BELLHOUSE, David R. ; FILLION, Nicolas: Le Her and Other Problems in Probability Discussed by Bernoulli, Montmort and Waldegrave. In: *Statistical Science* 30 (2015), Nr. 1, S. 26–39
- [BGH⁺00] BERMÚDEZ, Alfredo (Hrsg.) ; GÓMEZ, Dolores (Hrsg.) ; HAZARD, Christophe (Hrsg.) ; JOLY, Patrick (Hrsg.) ; ROBERTS, Jean E. (Hrsg.): *Fifth International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*. SIAM, 2000
- [BH84] BOOSS, Bernhelm ; HØYRUP, Jens: *Von Mathematik und Krieg: über die Bedeutung von Rüstung und militärischen Anforderungen für die Entwicklung der Mathematik in Geschichte und Gegenwart*. 1984 (Schriftenreihe Wissenschaft und Frieden)
- [BH03] BOOSS-BAVNBEK, Bernhelm (Hrsg.) ; HØYRUP, Jens (Hrsg.): *Mathematics and War*. Birkhäuser Verlag, 2003
- [BHK⁺14] BITTNER, Peter (Hrsg.) ; HÜGEL, Stefan (Hrsg.) ; KREOWSKI, Hans-Jörg (Hrsg.) ; MEYER-EBRECHT, Dietrich (Hrsg.) ; SCHINZEL, Britta (Hrsg.): *Gesellschaftliche Verantwortung in der digital vernetzten Welt*. LIT Verlag, 2014 (Kritische Informatik)
- [Bie08] BIELING, Hans-Jürgen: Liberalisierung und Privatisierung in Deutschland: Versuch einer Zwischenbilanz. In: *WSI Mitteilungen* (2008), Nr. 10, S. 541–547
- [Bir85] BIRKENBACH, Joachim (Hrsg.): *Militarisierte Informatik*. 1985 (Schriftenreihe Wissenschaft und Frieden)
- [Bis06] BISHOP, Christopher M.: *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006
- [BL14] BERNSTEIN, Daniel J. ; LANGE, Tanja: *ECCHacks*. Präsentation auf dem 31c3, *a new dawn*, 2014
- [BM04] BOLLHÖFER, Matthias ; MEHRMANN, Volker: *Numerische Mathematik: Eine projektorientierte Einführung für Ingenieure, Mathematiker und Naturwissenschaftler*. Vieweg, 2004
- [Bol08] BOLLINGER, Stefan: *1968 – die unverstandene Weichenstellung*. Karl Dietz Verlag, 2008
- [Boo05] BOOSS-BAVNBEK, Bernhelm: Was bedeutet die Mathematisierung des Krieges? In: *FIF-Kommunikation* 22 (2005), Nr. 2, S. 27–33

- [BOR⁺94] BODENSIECK, Heinrich ; OVERESCH, Manfred ; RICHTER, Michael ; RODENBACH, Hermann-Josef ; SCHWABE, Klaus ; SCHWARZ, Jürgen ; WETTIG, Gerhard: *Die Deutschlandfrage von der staatlichen Teilung bis zum Tode Stalins*. Duncker & Humblot, 1994
- [BPOZ15] BONNET, Catherine (Hrsg.) ; PASIK-DUNCAN, Bozenna (Hrsg.) ; OZBAY, Hitay (Hrsg.) ; ZHANG, Qing (Hrsg.): *2015 Proceedings of the Conference on Control and its Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2015
- [BR91] BERNHARDT, Ute (Hrsg.) ; RUHMANN, Ingo (Hrsg.): *Ein sauberer Tod: Informatik und Krieg*. 1991 (Schriftenreihe Wissenschaft und Frieden)
- [BR03] BERNHARDT, Ute ; RUHMANN, Ingo: On Facts and Fiction of "Information Warfare". In: BOOSS-BAVNBEK, Bernhelm (Hrsg.) ; HØYRUP, Jens (Hrsg.): *Mathematics and War*. Birkhäuser Verlag, 2003, S. 257–281
- [BR17] BERNHARDT, Ute ; RUHMANN, Ingo: Informatik. In: *Naturwissenschaft – Rüstung – Frieden*. Springer, 2017, S. 437–448
- [Bre15] BREMISCHE BÜRGERSCHAFT: *Stellungnahmen zur Zivilklausel*. 2015
- [Bru15] BRUNS, Axel: *Die Geschichte des Computers: Wie es bis zur Form des heutigen 'PC' kam*. neobooks, 2015
- [BS18] BRAUN, Reiner ; SCHULZE, Dietrich: *Zivilklausel oder Militärforschung: Dokumentation mit Schwerpunkt Web-Berichte*. 2018
- [BT11] BRUMLEY, Billy B. ; TUVERI, Nicola: Remote Timing Attacks Are Still Practical. In: ATLURI, Vijay (Hrsg.) ; DIAZ, Claudia (Hrsg.): *Computer Security – ESORICS 2011: Proceedings of the 16th European Symposium on Research in Computer Security*, Springer, 2011, S. 355–371
- [Bun49] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*. 1949
- [Bun91] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Embryonenschutzgesetz (ESchG)*. 1991
- [Bun02] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Völkerstrafgesetzbuch (VStGB)*. 2002
- [Bun12] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Förderung von ausgewählten Schwerpunkten der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung auf dem Gebiet "Mathematik für Innovationen in Industrie und Dienstleistungen"*. 2012

- [Bun13] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *Schlussbericht zu den Teilvorhaben: Selbst-organisierende Kameranetze – Kooperation und Koordination (LUH-SRA), Selbst-organisierende Kameranetze – Spezialsensorik (LUH-SIM), Dynamische Stereoverfahren (LUH-IPI), Szenenanalyse – Mustererkennung in Personen-Tracks(LUH-ikg) im Verbundprojekt: Verteilte, vernetzte Kamerasysteme zur in situ-Erkennung Personen-induzierter Gefahren (CamInSens)*. 2013
- [Bun16] BUNDESMINISTERIUM DER VERTEIDIGUNG: *Abschlussbericht Aufbaustab Cyber- und Informationsraum*. 2016
- [Bä03] BÄNSCH, Eberhard (Hrsg.): *Challenges in Scientific Computing – Proceedings of the CISC 2002*. Springer, 2003
- [CI05] CRAVEN, Bruce D. ; ISLAM, Sardar M. N.: *Optimization in Economics and Finance: Some Advances in Non-Linear, Dynamic, Multi-Criteria and Stochastic Models*. Springer, 2005
- [CJJ⁺11] CHEN, Xiangyong ; JIANG, Nan ; JING, Yuanwei ; STOJANOVSKI, Goran ; DIMIROVSKI, Georgi M.: Differential Game Model and Its Solutions for Force Resource Complementary via Lanchester Square Law Equation. In: *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano, 2011*
- [Cla91] CLAUSEWITZ, Carl von ; HAHLEWEG, Werner (Hrsg.): *Vom Kriege*. Dümmler, 1991
- [CN96] COHEN, Stephen D. (Hrsg.) ; NIEDERREITER, Harald (Hrsg.): *Finite Fields and Applications*. Cambridge University Press, 1996
- [Col99] COLLINS, Martin J.: *Space Race: The U.S.-U.S.S.R. Competition to Reach the Moon*. Pomegranate, 1999
- [Cop94] COPPERSMITH, Don: The Data Encryption Standard (DES) and its strength against attacks. In: *IBM Journal of Research and Development* 38 (1994), Nr. 3, S. 243–250
- [Cre93] CREVIER, Daniel: *AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*. Basic Books, 1993
- [CRFT02] CANALS, Raphaël ; ROUSSEL, Anthony ; FAMECHON, Jean-Luc ; TREUILLET, Sylvie: A biprocessor-oriented vision-based tracking system. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 49 (2002), Nr. 2, S. 500–506
- [CSF13] CARMONA, Pedro L. (Hrsg.) ; SÁNCHEZ, José S. (Hrsg.) ; FRED, Ana L. (Hrsg.): *Pattern Recognition - Applications and Methods – ICPRAM 2012*. Springer, 2013

- [Cur97] CUIEL, Imma: *Cooperative Game Theory and Applications: Cooperative Games Arising from Combinatorial Optimization Problems*. Springer, 1997
- [DB11] DORF, Richard C. ; BISHOP, Robert H.: *Modern Control Systems*. Prentice Hall, 2011
- [DD14] DOMBROWSKI, Peter ; DEMCHAK, Chris C.: Cyber War, Cybered Conflict, and the Maritime Domain. In: *Naval War College Review* (2014), Nr. 1, S. 71–96
- [Den09] DENNINGER, Erhard: *Zur Zulässigkeit einer so genannten „Zivilklausel“ im Errichtungsgesetz für das geplante Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. Gutachten im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung, 2009
- [Dep06] DEPPE, Frank: *Politisches Denken im Kalten Krieg*. VSA Verlag, 2006
- [Deu13] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG: *Forschungen zum Einsatz automatisierter Mustererkennung und Biometrie zum Aufspüren von sogenanntem bedrohlichem Verhalten*. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Herbert Behrens, Andrej Hunko, Annette Groth, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. Drucksache 17/12704, 2013
- [Deu14] DEUFLHARD, Peter: Mathematik und Rüstungsforschung – anekdotisch. In: *Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 22 (2014), Nr. 1, S. 8
- [Deu16a] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG: *Aufträge des Bundesministeriums der Verteidigung sowie privater Rüstungsfirmen an öffentliche Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen*. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Nicole Gohlke, Sigrid Hupach, Jan van Aken, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. Drucksache 18/7977, 2016
- [Deu16b] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): *Weißbuch 2016 – zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr*. 2016
- [Deu16c] DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG: *Industriekonjunktur 2016/2017: Flaches Wachstum in herausforderndem Umfeld*. 2016
- [DGKB12] D'ANGELO, David ; GRENZ, Carsten ; KUNTZSCH, Colin ; BOGEN, Manfred: *CamInSens – An Intelligent in-situ Security System for Public Spaces*. Präsentation auf der SAM 2012, International Conference on Security & Management, 2012
- [DHP09] DU, Ding-Zhu (Hrsg.) ; HU, Xiaodong (Hrsg.) ; PARDALOS, Panos M. (Hrsg.): *Combinatorial Optimization and Applications: Third International Conference, COCOA 2009*. Springer, 2009

- [Dil09] DILLON, John F.: *APN Polynomials: An Update*. Präsentation auf der Fq9, International Conference on Finite Fields and their Applications, 2009
- [DLLR94] DENG, Zongqi (Hrsg.) ; LIANG, Zhaojun (Hrsg.) ; LU, Gang (Hrsg.) ; RUAN, Shigui (Hrsg.): *differential equations and control theory*. Marcel Dekker, Inc., 1994
- [DR06] DAHMEN, Wolfgang ; REUSKEN, Arnold: *Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer, 2006
- [DRS05] DOBBERTIN, Hans (Hrsg.) ; RIJMEN, Vincent (Hrsg.) ; SOWA, Aleksandra (Hrsg.): *Advanced Encryption Standard – AES*. Springer, 2005 (4th International Conference, AES 2004)
- [Dzi10] DZIUK, Gerhard: *Theorie und Numerik partieller Differentialgleichungen*. De Gruyter, 2010
- [Edw96] EDWARDS, Paul N.: *The Closed World: Computers and the Politics of Discourse in Cold War America*. The MIT Press, 1996
- [Eur09] EUROPÄISCHE UNION: *Vertrag über die Europäische Union*. 2009
- [Eur11] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *PLATO-N – Final Publishable Activity Report*. 2011
- [Fau12] FAULENBACH, Bernd: *Geschichte der SPD: Von den Anfängen bis zur Gegenwart*. C. H. Beck, 2012
- [FD03] FINLAY, Janet ; DIX, Alan: *An Introduction to Artificial Intelligence*. Routledge, 2003
- [Fis14] FISCHLIN, Marc: Hintertüren und Schwächen im kryptographischen Standard SP 800-90A. In: *Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 22 (2014), Nr. 1, S. 18–22
- [Fis15] FISCHER, Yvonne: *Wissensbasierte probabilistische Modellierung für die Situationsanalyse am Beispiel der maritimen Überwachung*, Fakultät für Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie, Diss., 2015
- [FK10] FARZINDAR, Atefeh (Hrsg.) ; KESELJ, Vlado (Hrsg.): *Advances in Artificial Intelligence: 23rd Canadian Conference on Artificial Intelligence*. Springer, 2010
- [FOM⁺14] FENZI, Michele ; OSTERMANN, Jörn ; MENTZER, Nico ; PAYÁ-VAYÁ, Guillermo ; BLUME, Holger ; NGUYEN, Tu N. ; RISSE, Thomas: ASEV – Automatic Situation Assessment for Event-driven Video Analysis. In: *11th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*, 2014, S. 37–43

- [FPST14] FLEET, David (Hrsg.) ; PAJDLA, Tomas (Hrsg.) ; SCHIELE, Bernt (Hrsg.) ; TUYTELAARS, Tinne (Hrsg.): *Computer Vision – ECCV 2014*. Springer, 2014
- [Fre96] FREI, Norbert: *Vergangenheitspolitik: Die Anfänge der Bundesrepublik und die NS-Vergangenheit*. C. H. Beck, 1996
- [Fre08] FREI, Norbert: *1968: Jugendrevolte und globaler Protest*. dtv, 2008
- [FSLT15] FAVA, Daniel ; SIGNOLES, Julien ; LEMERRE, Matthieu ; TIWARI, Ashish: Gamifying Program Analysis. In: DAVIS, Martin (Hrsg.) ; FEHNER, Ansgar (Hrsg.) ; MCIVER, Annabelle (Hrsg.) ; VORONKOV, Andrei (Hrsg.): *Proceedings of the LPAR-20 – 20th International Conference on Logic for Programming, Artificial Intelligence, and Reasoning*, Springer, 2015, S. 591–605
- [FSO+16] FAVA, Daniel ; SHAPIRO, Dan ; OSBORN, Joseph ; SCHÄEF, Martin ; WHITEHEAD JR., Emmet J.: Crowdsourcing Program Preconditions via a Classification Game. In: *Proceedings of the ICSE '16 – 38th International Conference on Software Engineering*, ACM, 2016, S. 1086–1096
- [GGL15] GALL, Juergen (Hrsg.) ; GEHLER, Peter (Hrsg.) ; LEIBE, Bastian (Hrsg.): *Pattern Recognition – Proceedings of the GCPR 2015*. Springer, 2015
- [Goh16] GOHLKE, Nicole: *Bewertung der Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion Die LINKE. (KA 18/7977): „Aufträge des Bundesministeriums der Verteidigung sowie privater Rüstungsfirmen an öffentliche Hochschulen und außerhochschulische Forschungseinrichtungen“*. 2016
- [Goh18] GOHLKE, Nicole: Die schleichende Indienstnahme ziviler Hochschulen und Forschungseinrichtungen für militärische Zwecke. In: *Wissenschaft und Frieden* 36, Nr. 2, erscheint Mitte 2018
- [Gol77] GOLDSTINE, Herman H.: *A History of Numerical Analysis from the 16th through the 19th Century*. Springer, 1977
- [Gra94] GRAHAM, Loren R.: *Science in Russia and the Soviet Union*. Cambridge University Press, 1994
- [Grü05] GRÜNE, Lars: *Mathematische Kontrolltheorie I: Lineare Systeme*. Vorlesungsskript, 2005
- [Gru15] GRUBER, Thomas: Die Informatik in der modernen Kriegsführung. In: *Ausdruck* (2015), Nr. 4, S. 24–26

- [Gru16] GRUBER, Thomas: Zur Militarisierung der kryptologischen Forschungslandschaft an deutschen Forschungseinrichtungen. In: *FIfF-Kommunikation* 33 (2016), Nr. 1, S. 7–11
- [Gru17a] GRUBER, Thomas: Im Spannungsfeld von militärischer Anwendung und Wissenschaftsverantwortung? Zur Verquickung der mathematischen Forschung in Deutschland mit der modernen Kriegsführung. In: KRÖMER, Ralf (Hrsg.) ; NICKEL, Gregor (Hrsg.): *Siegener Beiträge zur Geschichte und Philosophie der Mathematik* Bd. 8, Universitätsverlag Siegen, 2017, S. 1–26
- [Gru17b] GRUBER, Thomas: Onlineoffensive: Die Bundeswehr im Cyber- und Informationsraum. In: *FIfF-Kommunikation* (2017), Nr. 2, S. 69–71
- [Gru18a] GRUBER, Thomas: On the Mathematization of Warfare and the Militarization of Mathematics. In: *Notices of the AMS* 65 (2018), Nr. 1, S. 45
- [Gru18b] GRUBER, Thomas: Mathematik und Krieg – Zur Verquickung der mathematischen Forschung mit der modernen Kriegsführung. In: *Wissenschaft und Frieden* 36, Nr. 2, erscheint Mitte 2018
- [Hab68] HABERMAS, Jürgen: *Technik und Wissenschaft als „Ideologie“*. Suhrkamp Verlag, 1968
- [Hal09] HALEVI, Shai (Hrsg.): *Advances in Cryptology – CRYPTO 2009*. Springer, 2009
- [Han15] HANSESTADT BREMEN: *Bremisches Hochschulgesetz*. 2015
- [HCPM09] HIRSCH, Michael (Hrsg.) ; COMMANDER, Clayton W. (Hrsg.) ; PARDALOS, Panos M. (Hrsg.) ; MURPHEY, Robert (Hrsg.): *Optimization and Cooperative Control Strategies*. Springer, 2009
- [HCS93] HERZOG, Otthein (Hrsg.) ; CHRISTALLER, Thomas (Hrsg.) ; SCHÜTT, Dieter (Hrsg.): *Grundlagen und Anwendungen der Künstlichen Intelligenz: 17. Fachtagung für Künstliche Intelligenz*. Springer, 1993
- [HI09] HOLLER, Manfred J. ; ILLING, Gerhard: *Einführung in die Spieltheorie*. Springer, 2009
- [Hig15] HIGHAM, Nicholas J. (Hrsg.): *The Princeton Companion to Applied Mathematics*. Princeton University Press, 2015
- [HKH10] HÜLLERMEIER, Eyke (Hrsg.) ; KRUSE, Rudolf (Hrsg.) ; HOFFMANN, Frank (Hrsg.): *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Theory and Methods – Proceedings of the IPMU 2010, Part I-III*. Springer, 2010

- [HKM17] HÜGEL, Stefan ; KREOWSKI, Hans-Jörg ; MEYER-EBRECHT, Dietrich: Cyberwar and Cyberpeace. In: CARAYANNIS, Elias G. (Hrsg.) ; CAMPBELL, David F. J. (Hrsg.) ; EFTHYMIOPOULOS, Marios P. (Hrsg.): *Handbook of Cyber-Development, Cyber-Democracy, and Cyber-Defense*. Springer, 2017, Kapitel 41
- [Hol06] HOLM, Andrej: Der Ausstieg des Staates aus der Wohnungspolitik. In: *Planungsrundschau* (2006), Nr. 13, S. 103–113
- [Hop12] HOPPE, Bernd: *Zur Vereinbarkeit einer verbindlichen Zivilklausel mit der Wissenschaftsfreiheit gemäß Art. 5 Abs. 3 Satz 1 GG*. Gutachten im Auftrag des Allgemeinen Studierendenausschusses der Universität Kassel, 2012
- [Hor88] HORKHEIMER, Max: Traditionelle und kritische Theorie. In: SCHMIDT, Alfred (Hrsg.): *Gesammelte Schriften Band 4: Schriften 1936-1941*, Fischer, 1988, S. 162–216
- [HR04] HARTMANN, Alexander K. ; RIEGER, Heiko: *New Optimization Algorithms in Physics*. WILEY-VCH, 2004
- [Ilc15] ILCHMANN, Achim: *Zur gesellschaftlichen Funktion der angewandten Mathematik*. 2015
- [Inf13] INFORMATIONSTELLE MILITARISIERUNG (IMI) E. V, (Hrsg.): *Drohnenforschungsatlas*. 2013
- [Ins11] INSTITUT FÜR MATHEMATIK DER UNIVERSITÄT AUGSBURG: *Bericht zum Betriebspraktikum im Jahr 2011*. 2011
- [Ins12] INSTITUT FÜR MATHEMATIK DER UNIVERSITÄT AUGSBURG: *Bericht zum Betriebspraktikum im Jahr 2012*. 2012
- [Ins13] INSTITUT FÜR MATHEMATIK DER UNIVERSITÄT AUGSBURG: *Bericht zum Betriebspraktikum im Jahr 2013*. 2013
- [Isa99] ISAACS, Rufus: *Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare and Pursuit, Control and Optimization*. Courier Corporation, 1999
- [Jah12] JAHN, Egbert: *Frieden und Konflikt*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2012
- [JFS05] JAHN, Egbert (Hrsg.) ; FISCHER, Sabine (Hrsg.) ; SAHM, Astrid (Hrsg.): *Die Zukunft des Friedens: Band 2 Die Friedens- und Konfliktforschung aus der Perspektive der jüngeren Generationen*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005

- [JKL⁺08] JORDAN, David ; KIRAS, James D. ; LONSDALE, David J. ; SPELLER, Ian ; TUCK, Christopher ; WALTON, C. D.: *Understanding Modern Warfare*. Cambridge University Press, 2008
- [Jon03] JONAS, Hans: *Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation*. Suhrkamp Verlag, 2003
- [JSD15] JESCHKE, Sabina (Hrsg.) ; SCHMITT, Robert (Hrsg.) ; DRÖGE, Alicia (Hrsg.): *Exploring Cybernetics*. Springer, 2015
- [Jun93] JUNGNICHEL, Dieter: *Finite fields: Structure and Arithmetics*. BI-Wissenschaftsverlag, 1993
- [Kah96] KAHN, David: *The Codebreakers: The Story of Secret Writing*. Simon & Schuster, 1996
- [Kat87] KATSIAFICAS, George: *The Imagination of the New Left: A Global Analysis of 1968*. South End Press, 1987
- [KB10] KNAUER, Matthias ; BÜSKENS, Christof: Optimization of Satellite Constellations. In: *Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2008*, Springer, 2010, S. 919–924
- [KB13] KUNTZSCH, Colin ; BOHN, Alexander: A Framework for On-line Detection of Custom Group Movement Patterns. In: KRISP, Jukka M. (Hrsg.): *Progress in Location-Based Services*, Springer, 2013, S. 91–107
- [KH13] KUROSAWA, Keoru (Hrsg.) ; HANAOKA, Goichiro (Hrsg.): *Public-Key Cryptography – PKC 2013*. Springer, 2013
- [KHDM16] KUHN, Andreas ; HUANG, Hai ; DRAUSCHKE, Martin ; MAYER, Helmut: Fast Probabilistic Fusion of 3D Point Clouds via Occupancy Grids for Scene Classification. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III (2016)*, Nr. 3, S. 325–332
- [Kim12] KIM, Howon (Hrsg.): *Information Security and Cryptology – ICISC 2011*. Springer, 2012
- [KK85] KNOBLOCH, Hans W. ; KWAKERNAAK, Huibert: *Lineare Kontrolltheorie*. Springer, 1985
- [KK10] KARPFINGER, Christian ; KIECHLE, Hubert: *Kryptologie: Algebraische Methoden und Algorithmen*. Vieweg + Teubner, 2010
- [KKS10] KONTOGIANNIS, Spyros (Hrsg.) ; KOUTSOUPIAS, Elias (Hrsg.) ; SPIRAKIS, Paul G. (Hrsg.): *SAGT'10: Proceedings of the Third International Conference on Algorithmic Game Theory*. Springer, 2010

- [KLK13] KWON, Taekyoung (Hrsg.) ; LEE, Mun-Kyu (Hrsg.) ; KWON, Daesung (Hrsg.): *Information Security and Cryptology – ICISC 2012*. Springer, 2013
- [KM14] KREOWSKI, Hans-Jörg ; MEYER-EBRECHT, Dietrich: Der Missbrauch der Informationstechnik für die ‚Revolution‘ des Kriegsgeschäfts. In: BITTNER, Peter (Hrsg.) ; HÜGEL, Stefan (Hrsg.) ; KREOWSKI, Hans-Jörg (Hrsg.) ; MEYER-EBRECHT, Dietrich (Hrsg.) ; SCHINZEL, Britta (Hrsg.): *Gesellschaftliche Verantwortung in der digital vernetzten Welt*. LIT Verlag, 2014, S. 81–88
- [KM17] KREOWSKI, Hans-Jörg ; MEYER-EBRECHT, Dietrich: Revolution in Military Affairs: Not without Information and Communication Technology. In: HOFKIRCHNER, Wolfgang (Hrsg.) ; BURGIN, Mark (Hrsg.): *The Future of Information Society*. World Scientific, 2017, S. 439–448
- [KMP15] KYUREGHYAN, Gohar (Hrsg.) ; MULLEN, Gary L. (Hrsg.) ; POTT, Alexander (Hrsg.): *Contemporary Mathematics 632 – Topics in Finite Fields*. American Mathematical Society, 2015
- [Kom09] KOMITEE DER 9. INTERNATIONALEN KONFERENZ ZU ENDLICHEN KÖRPERN UND DEREN ANWENDUNGEN: *Abstracts Fq 9*. 2009
- [Kom11] KOMITEE DER 10. INTERNATIONALEN KONFERENZ ZU ENDLICHEN KÖRPERN UND DEREN ANWENDUNGEN: *List of participants Fq 10*. 2011
- [Kra05] KRABS, Werner: *Spieltheorie: Dynamische Behandlung von Spielen*. Springer, 2005
- [Kre08] KREOWSKI, Hans-Jörg (Hrsg.): *Informatik und Gesellschaft*. LIT Verlag, 2008 (Kritische Informatik)
- [Kre11] KREOWSKI, Hans-Jörg: Gehören Killerroboter vor ein Kriegsgericht? In: *FIfF-Kommunikation* (2011), Nr. 4, S. 27–29
- [Kre15] KREOWSKI, Hans-Jörg: Die unheilvolle Vermischung ziviler und militärischer Sicherheit aus Sicht der Informatik. In: BAUER, Rudolph (Hrsg.): *Kriege im 21. Jahrhundert: Neue Herausforderungen der Friedensbewegung*. Sonnenberg Verlag, 2015, S. 111–118
- [Kul03] KULTUSMINISTERKONFERENZ: *Ländergemeinsame Strukturvorgaben für die Akkreditierung von Bachelor- und Masterstudiengängen*. Beschluss der Kultusministerkonferenz, 2003
- [KW99] KNOTHE, Klaus ; WESSELS, Heribert: *Finite Elemente: Eine Einführung für Ingenieure*. Springer, 1999

- [KZP⁺08] KAMMEL, Sören ; ZIEGLER, Julius ; PITZER, Benjamin ; WERLING, Moritz ; GINDELE, Tobias ; JAGZENT, Daniel ; SCHRÖDER, Joachim ; THUY, Michael ; GOEBL, Matthias ; HUNDELSHAUSEN, Felix von: Team AnnieWAY's Autonomous System for the 2007 DARPA Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 615–639
- [Lan13] LANGE, Kenneth: *Optimization*. Springer, 2013
- [Lei04] LEIGH, James R.: *Control Theory*. The IEE, 2004
- [Len97] LENZE, Burkhard: *Einführung in die Mathematik neuronaler Netze*. Logos-Verlag, 1997
- [Len02] LENZEN, Manuela: *Natürliche und künstliche Intelligenz: Einführung in die Kognitionswissenschaft*. Campus Verlag, 2002
- [Les94] LESLIE, Stuart: *The Cold War and American Science: The Military-Industrial-Academic Complex at MIT and Stanford*. Columbia University Press, 1994
- [Lie15] LIEB, Wolfgang: Drittmittel korrumpieren die Idee der Universität. In: *Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 23 (2015), Nr. 2, S. 74 – 77
- [LL93] LENSTRA, Arjen K. (Hrsg.) ; LENSTRA JR., Hendrik W. (Hrsg.): *The Development of the Number Field Sieve*. Springer, 1993
- [LLL14] LANGE, Tanja (Hrsg.) ; LAUTER, Kristin (Hrsg.) ; LISONĚK, Petr (Hrsg.): *Selected Areas in Cryptography – SAC 2013*. Springer, 2014
- [LN97] LIDL, Rudolf ; NIEDERREITER, Harald: *Finite Fields*. Cambridge University Press, 1997
- [LS87] LOECKX, Jacques ; SIEBER, Kurt: *The Foundations of Program Verification*. Springer, 1987
- [Lun16] LUNZE, Jan: *Künstliche Intelligenz für Ingenieure: Methoden zur Lösung ingenieurtechnischer Probleme mit Hilfe von Regeln, logischen Formeln und Bayesnetzen*. Walter de Gruyter, 2016
- [LV14] LEE, Jon (Hrsg.) ; VYGEN, Jens (Hrsg.): *Integer Programming and Combinatorial Optimization: 17th International Conference, IPCO 2014*. Springer, 2014
- [Mar78] MARTIN, Brian: The Selective Usefulness of Game Theory. In: *Social Studies of Science* 8 (1978), S. 85–110

- [Mar10] MARISCHKA, Christoph: Wo beginnt der Krieg? Der Wissenschaftsbetrieb muss in die Verantwortung genommen werden. In: *Ausdruck* (2010), Nr. 4, S. 14–17
- [Mar17] MARISCHKA, Christoph: Fraunhofer IOSB: Dual Use als Strategie. In: *Ausdruck* (2017), Nr. 1, S. 8–14
- [Mat46] MATHEMATISCHES INSTITUT TÜBINGEN: *Rede Kamkes im Bericht über die Mathematiker-Tagung in Tübingen vom 23. bis 27. September 1946*. 1946
- [Mat16] MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE FAKULTÄT DER UNIVERSITÄT AUGSBURG: *Modulhandbuch des Bachelorstudiengangs Mathematik an der Universität Augsburg, gültig ab dem Sommersemester 2016*. 2016
- [McA11] MCANDREW, Alasdair: *Introduction to Cryptography with Open-Source Software*. CRC Press, 2011
- [MCP12] MICHAEL, Johannes ; CHUDEJ, Kurt ; PANNEK, Jürgen: Modelling and Optimal Control of a Docking Maneuver with an Uncontrolled Satellite. In: *IFAC Proceedings Volumes 45* (2012), Nr. 2, S. 1135–1140
- [Min14] MINISTERIUM FÜR INNOVATION, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: *Hochschulgesetz Nordrhein-Westfalen*. 2014
- [MK14] MEYER-NIEBERG, Silja ; KROPAT, Erik: Tracking Targets under Uncertainty: Natural Computing Approaches. In: *47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, IEEE, 2014
- [MKH00] MÜLLER, Markus ; KRÜGER, Wolfgang ; HEINZE, Norbert: Model Based Target and Background Characterization. In: *Proceedings of SPIE, Targets and Backgrounds VI: Characterization, Visualization, and the Detection Process* Bd. 4029, SPIE Digital Library, 2000, S. 88–92
- [MKP13] MEYER-NIEBERG, Silja ; KROPAT, Erik ; PICKL, Stefan: Intercepting a Target with Sensor Swarms. In: *46th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, IEEE, 2013
- [MMPS10] MCGUIRE, Gary (Hrsg.) ; MULLEN, Gary L. (Hrsg.) ; PANARIO, Daniel (Hrsg.) ; SHPARLINSKI, Igor E. (Hrsg.): *Contemporary Mathematics 518 – Finite Fields and Applications*. American Mathematical Society, 2010
- [Mor59] MORGENSTERN, Oskar: *The Question of National Defense*. Random House, 1959
- [Mor12] MORRIS, Peter: *Introduction to Game Theory*. Springer, 2012

- [MS93] MULLEN, Gary L. (Hrsg.) ; SHIUE, Peter Jau-Shyong (Hrsg.): *finite fields, coding theory, and advances in communications and computing*. Marcel Dekker, Inc., 1993
- [Mü13] MÜLLER, Markus: *Szeneninterpretation unter Verwendung multimodaler Sensorik und Salienzmaßen*, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie, Diss., 2013
- [Nat99] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Recommended Elliptic Curves for Federal Government Use*. 1999
- [Neu28] NEUMANN, John von: Zur Theorie der Gesellschaftsspiele. In: *Mathematische Annalen* 100 (1928), Nr. 1, S. 295–320
- [Nic06] NICKEL, Gregor: Ethik und Mathematik - Randbemerkungen zu einem prekären Verhältnis. In: *Neue Zeitschrift für Systematische Theologie und Religionsphilosophie* 47 (2006), S. 412–429
- [Nic12] NICKEL, Gregor: „Stör mir meine Kreise nicht!“ Mathematik und die Tübinger Zivilklausel. In: NIELEBOCK, Thomas (Hrsg.) ; MEISCH, Simon (Hrsg.) ; HARMS, Volker (Hrsg.): *Zivilklauseln für Forschung, Lehre und Studium*, Nomos, 2012, S. 225–236
- [Nid11] NIDA-RÜMELIN, Julian: *Verantwortung*. Reclam-Verlag, 2011
- [Nie14] NIEDERSÄCHSISCHE LANDESREGIERUNG: *Drittmittelforschung an Niedersachsens Hochschulen und Forschungseinrichtungen*. Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Belit Onay und Ottmar von Holtz (GRÜNE). Drucksache 17/1409, 2014
- [Nil14] NILSSON, Nils J.: *Die Suche nach Künstlicher Intelligenz*. Akademische Verlagsgesellschaft, 2014
- [NM44] NEUMANN, John von ; MORGENSTERN, Oskar: *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1944
- [NMH12] *Kapitel Zur Ausgestaltung einer Zivilklausel: Anregung aus den Tübinger Vorträgen und Debatten*. In: NIELEBOCK, Thomas (Hrsg.) ; MEISCH, Simon (Hrsg.) ; HARMS, Volker (Hrsg.): *Zivilklauseln für Forschung, Lehre und Studium*. Nomos, 2012, S. 337–342
- [Nof09] *Kapitel A History of Automatic Control*. In: NOF, Shimon Y. (Hrsg.): *Springer Handbook of Automation*. Springer, 2009, S. 53–69
- [NSA94] NSA: Eurocrypt '92. In: *Cryptolog* XX (1994), Nr. 1, S. 12–19

- [NTG16] NEHMEIER, Marco (Hrsg.) ; TUCKER, Warwick (Hrsg.) ; GUDENBERG, Jürgen W. (Hrsg.): *Scientific Computing, Computer Arithmetic, and Validated Numerics*. Springer, 2016
- [Obe18] OBERSTEG, Roland: Richtschnur des täglichen Handelns – das Leitbild CIR. In: *Europäische Sicherheit und Technik: Special Issue Cyber- und Informationsraum* (2018), S. 14–19
- [PBL10] PALUMBO, Neil F. ; BLAUWKAMP, Ross A. ; LLOYD, Justin M.: Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques. In: *Johns Hopkins APL Technical Digest* 29 (2010), Nr. 1, S. 42–59
- [PCGN16] PARDALOS, Panos M. (Hrsg.) ; CONCA, Piero (Hrsg.) ; GIUFFRIDA, Giovanni (Hrsg.) ; NICOSIA, Giuseppe (Hrsg.): *Machine Learning, Optimization, and Big Data – Revised Selected Papers of the MOD 2016*. Springer, 2016
- [Ple16] PLETSCH, Marius: Eine Drohne für Europa. In: *Ausdruck* (2016), Nr. 1, S. 4–12
- [RA16] ROSENHAHN, Bodo (Hrsg.) ; ANDRES, Bjoern (Hrsg.): *Pattern Recognition – Proceedings of the GCPR 2016*. Springer, 2016
- [Rao09] RAO, Singiresu S.: *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Wiley, 2009
- [Rei14] REINSCHKE, Kurt: *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*. Springer, 2014
- [Rem04a] REMMERT, Volker R.: Die Deutsche Mathematiker-Vereinigung im "Dritten Reich": Fach- und Parteipolitik. In: *Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 12 (2004), Nr. 4, S. 223–245
- [Rem04b] REMMERT, Volker R.: Die Deutsche Mathematiker-Vereinigung im "Dritten Reich": Krisenjahre und Konsolidierung. In: *Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 12 (2004), Nr. 3, S. 159–177
- [Rey13] REYDON, Thomas: *Wissenschaftsethik: Eine Einführung*. Ulmer UTB, 2013
- [RF16] ROSA-LUXEMBURG-STIFTUNG (Hrsg.) ; FRAKTION DIE LINKE IM BUNDESTAG (Hrsg.): *Schwarzbuch 2016 – Kritisches Handbuch zur Aufrüstung und Einsatzorientierung der Bundeswehr*. 2016
- [RHG13] REINHARDT, Rüdiger ; HOFFMANN, Armin ; GERLACH, Tobias: *Nichtlineare Optimierung: Theorie, Numerik und Experimente*. Springer, 2013

- [RHS⁺15] RODRIGUES, H. C. (Hrsg.) ; HERKOVITS, J. (Hrsg.) ; SOARES, C. M. M. (Hrsg.) ; GUEDES, J. M. (Hrsg.) ; ARAÚJO, A. L. (Hrsg.) ; FOLGADO, J. O. (Hrsg.) ; MOLEIRO, F. (Hrsg.) ; MADEIRA, J. F. A. (Hrsg.): *Engineering Optimization IV: Proceedings of the International Conference on Engineering Optimization, ENGOPT 2014*. CRC Press, 2015
- [Ric09] RICHTER, Walter E.: The Future of Information Operations. In: *Military Review* (2009), Nr. 1, S. 103–113
- [RN03] RUSSELL, Stuart J. ; NORVIG, Peter: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education, 2003
- [Rod13] RODIER, François: *Highly resistant Boolean functions for cryptography*. Präsentation auf der GeoCrypt 2013, Conference on Geometry and Cryptography, 2013
- [Ros99] ROSING, Michael: *Implementing Elliptic Curve Cryptography*. Manning, 1999
- [RS01] RYAN, Peter ; SCHNEIDER, Steve A.: *The Modelling and Analysis of Security Protocols: The CSP Approach*. Addison-Wesley Professional, 2001
- [Rö73] RÖHLER, Rainer: *Biologische Kybernetik*. Vieweg + Teubner, 1973
- [San10] SANDKÜHLER, Hans J. (Hrsg.): *Enzyklopädie Philosophie*. Felix Meiner Verlag, 2010
- [Sch08] SCHARLAU, Winfried: Who Is Alexander Grothendieck? In: *Notices of the AMS* 55 (2008), Nr. 8, S. 930–941
- [Seg03] SEGAL, Sanford L.: *Mathematicians under the Nazis*. Princeton University Press, 2003
- [Sei12] SEIFERT, Andreas: Neue Wege für die Rüstungsforschung. In: *Ausdruck* (2012), Nr. 6, S. 4–5
- [SG13] STIFTUNG WISSENSCHAFT UND POLITIK (SWP) ; GERMAN MARSHALL FUND OF THE UNITED STATES (GMF): *Neue Macht, Neue Verantwortung: Elemente einer deutschen Außen- und Sicherheitspolitik für eine Welt im Umbruch*. 2013
- [Shu59] SHUBIK, Martin: *Strategy and Market Structure: Competition, Oligopoly, and the Theory of Games*. Wiley, 1959
- [SK11] SCHWARZ, Hans R. ; KÖCKLER, Norbert: *Numerische Mathematik*. Vieweg + Teubner, 2011

- [SM16] SCHMITZ, Mathias ; MAYER, Helmut: A Convolutional Network for Semantic Facade Segmentation and Interpretation. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. XLI-B3, 2016, S. 709–715
- [Sny61] SNYDER, Glenn H.: *Deterrence and Defense: Toward a Theory of National Security*. Princeton University Press, 1961
- [Spr12] SPRINGER, Theresa V.: *Mathematical Analysis and Computational Methods for Probabilistic Multi-Hypothesis Tracking (PMHT)*, Fakultät für Mathematik und Wirtschaftswissenschaften der Universität Ulm, Diss., 2012
- [SRD⁺17] SCHWARZ, Max ; RODEHUTSKORS, Tobias ; DROESCHEL, David ; BEUL, Marius ; SCHREIBER, Michael ; ARASLANOV, Nikita ; IVANOV, Ivan ; LENZ, Christian ; RAZLAW, Jan ; SCHÜLLER, Sebastian ; SCHWARZ, David ; TOPALIDOU-KYNAZOPOULOU, Angeliki ; BEHNKE, Sven: NimbRo Rescue: Solving Disaster-Response Tasks through Mobile Manipulation Robot Momaro. In: *Journal of Field Robotics* 34 (2017), Nr. 2, S. 400–425
- [SS13] SAKO, Kazue (Hrsg.) ; SARKAR, Palash (Hrsg.): *Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2013*. Springer, 2013
- [SSW06] SAHM, Astrid (Hrsg.) ; SAPPER, Manfred (Hrsg.) ; WEICHSEL, Volker (Hrsg.): *Die Zukunft des Friedens: Eine Bilanz der Friedens- und Konfliktforschung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2006
- [Sta17] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Statistisches Jahrbuch 2017*. 2017
- [Sti45] STIGLER, George J.: The Cost of Subsistence. In: *Journal of Farm Economics* 27 (1945), Nr. 2, S. 303–314
- [Sti06] STINSON, Douglas R.: *Cryptography: Theory and Practice, Third Edition*. Chapman & Hall/CRC, 2006
- [Stö10] STÖVER, Bernd: *Der Kalte Krieg 1947-1991 – Geschichte eines radikalen Zeitalters*. C. H. Beck, 2010
- [Str07] STRANG, Gilbert: *Computational Science and Engineering*. Wellesley-Cambridge Press, 2007
- [Str09] STREIBL, Ralf E.: Das Forum InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung (FIfF) e.V. – Impressionen aus 25 Jahren. In: *Manipulation of Graphs, Algebras and Pictures: Essays Dedicated to Hans-Jörg Kreowski on the Occasion of His 60th Birthday* (2009)
- [Swe08] SWENSON, Christopher: *Modern Cryptanalysis: Techniques for Advanced Code Breaking*. John Wiley & Sons, 2008

- [SWP12] STREHMEL, Karl ; WEINER, Rüdiger ; PODHAISKY, Helmut: *Numerik gewöhnlicher Differentialgleichungen: Nichtsteife, steife und differential-algebraische Gleichungen*. Springer, 2012
- [Sä13] SÄCHSISCHE STAATSREGIERUNG: *Militärische und sicherheitstechnische Forschung in Sachsen seit 2009*. Antwort der Staatsregierung auf die Kleine Anfrage des Abgeordneten Karl-Heinz Gerstenberg (GRÜNE). Drucksache 5/12635, 2013
- [Sä15] SÄCHSISCHE STAATSREGIERUNG: *Kooperationen von Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit militärischen oder sicherheitspolitischen Organisationen und Institutionen*. Antwort der Staatsregierung auf die Kleine Anfrage des Abgeordneten Annkatrin Klepsch (DIE LINKE). Drucksache 6/2688, 2015
- [TBK08] TIETJEN, Jan ; BÜSKENS, Christof ; KNAUER, Matthias: Time Schedule Optimization of Satellites. In: *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* Bd. 8, WILEY-VCH, 2008, S. 10805–10806
- [Tec13] TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN (Hrsg.): *TUM Forschungs- und Wirtschaftskooperationen*. 2013
- [Teu14] TEUTSCH, Michael: *Moving Object Detection and Segmentation for Remote Aerial Video Surveillance*, Fakultät für Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie, Diss., 2014
- [Tic08] TICHATSCHKE, Rainer: *”Auf den Schultern von Giganten” – Zur Geschichte der Mathematischen Optimierung*. Forschungsbericht, 2008
- [TJ14] TWEEDALE, Jeffrey W. (Hrsg.) ; JAIN, Lakhmi C. (Hrsg.): *Recent Advances in Knowledge-based Paradigms and Applications*. Springer, 2014
- [TKH11] TEUTSCH, Michael ; KRÜGER, Wolfgang ; HEINZE, Norbert: Detection and classification of moving objects from UAVs with optical sensors. In: *Proceedings of SPIE, Sensor Fusion, and Target Recognition XX* Bd. 8050, SPIE Digital Library, 2011
- [TLNC10] TVEITO, Aslak ; LANTANGEN, Hans P. ; NIELSEN, Bjørn F. ; CAI, Xing: *Elements of Scientific Computing*. Springer, 2010
- [TSWV10] TROTTEMANT, Eric J. ; SCHERER, Carsten W. ; WEISS, Martin ; VERMEULEN, Arthur: Robust Missile Feedback Control Strategies. In: *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 33 (2010), Nr. 6, S. 1837–1846
- [Tur00] TURNER, Peter R.: *Guide to Scientific Computing*. CRC Press, 2000
- [Ver45] VEREINTE NATIONEN: *Charta der Vereinten Nationen (UN-Charta)*. 1945

- [Vin10] VINTER, Richard: *Optimal Control*. Birkhäuser Verlag, 2010
- [Wal10] WALTER-BUSCH, Emil: *Geschichte der Frankfurter Schule – Kritische Theorie und Politik*. Wilhelm Fink Verlag, 2010
- [War09] WARNICKE, Oberst P.: *Das Kommunikationssystem der Bundeswehr für den Einsatz (KommSysBwEins)*. Präsentation auf dem Symposium der 23. AFCEA Fachausstellung, 2009
- [WB99] WOINOWSKI, Jens (Hrsg.) ; BITTNER, Peter (Hrsg.): *Mensch - Informatisierung - Gesellschaft*. LIT Verlag, 1999 (Kritische Informatik)
- [Wei78] WEIZENBAUM, Joseph: *Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft*. Suhrkamp Verlag, 1978
- [Wei87] WEIZENBAUM, Joseph: *Kurs auf den Eisberg: die Verantwortung des Einzelnen und die Diktatur der Technik*. Piper Verlag, 1987
- [Wil08] WILLEMS, Wolfgang: *Codierungstheorie und Kryptographie*. Birkhäuser Verlag, 2008
- [Wis07] WISSENSCHAFTSRAT: *Stellungnahme zur Neustrukturierung der Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e.V. (FGAN)*. 2007
- [Won03] WONG, Samuel S. M.: *Computational Methods in Physics and Engineering*. World Scientific, 2003
- [WST⁺14] WALTER, Leif ; SCHLÖFFEL, Gunther ; THEODOULIS, Spilios ; HOLZAPFEL, Florian ; KOSTINA, Ekaterina: Multiple Shooting Condensing for Online Gain Scheduling in Interceptor Guidance. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2014
- [XYW10] XIAOMING, Xu ; YAOFENG, Ren ; WEI, Feng: Analysis of Warfare Loss of the Surface Missile Combat Based on Salvo Model. In: *Ship Electronic Engineering* 30 (2010), Nr. 9, S. 243–250
- [Zer13] ZERMELO, Ernst: Über eine Anwendung der Mengenlehre auf die Theorie des Schachspiels. In: *Proceedings of the Fifth International Congress of Mathematicians* Bd. 2, Cambridge University Press, 1913, S. 501–504
- [ZU14] ZABARANKIN, Michael ; URYASEV, Stan: *Statistical Decision Problems*. Springer, 2014
- [ZW94] ZIMMERLI, Walther C. (Hrsg.) ; WOLF, Stefan (Hrsg.): *Künstliche Intelligenz: Philosophische Probleme*. Reclam, 1994
- [ZZZ07] ZIEGENBALG, Jochen ; ZIEGENBALG, Oliver ; ZIEGENBALG, Bernd: *Algorithmen von Hammurapi bis Gödel*. Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2007

Internetquellen

- [1] Lazar Backovic. *Streit über Stiftungsprofessur: Satelliten schaffen ohne Waffen*. Website, 2011. Zu finden unter <http://www.spiegel.de/unispiegel/studium/streit-ueber-stiftungsprofessur-satelliten-schaffen-ohne-waffen-a-779617.html>; aufgerufen am 7.8.2015 um 17:55.
- [2] *Munich Aerospace*. Website. Zu finden unter <https://www.munich-aerospace.de/de/>; aufgerufen am 5.2.2018 um 9:30.
- [3] Frederik Obermaier. *Pentagon sponsert Sprengstoffforschung in München*. Website, 2013. Zu finden unter <http://www.sueddeutsche.de/muenchen/geheimer-krieg-pentagon-sponsert-sprengstoffforschung-in-muenchen-1.1826790>; aufgerufen am 7.8.2015 um 18:15.
- [4] *Initiative Hochschulen für den Frieden – Ja zur Zivilklausel – Bestehende Zivilklauseln*. Website. Zu finden unter <http://www.zivilklausel.de/index.php/bestehende-zivilklauseln>; aufgerufen am 7.8.2015 um 18:20.
- [5] *Forum InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung*. Website. Zu finden unter <http://www.fiff.de/themen/ruin/ruestung-und-informatik/>; aufgerufen am 7.8.2015 um 18:20.
- [6] *NaturwissenschaftlerInnen-Initiative – Über uns*. Website. Zu finden unter <http://natwiss.de/start/ueber-uns/>; aufgerufen am 7.4.2017 um 14:35.
- [7] *Wissenschaft und Frieden – Wir über uns*. Website. Zu finden unter <http://wissenschaft-und-frieden.de/index.php?pid=3>; aufgerufen am 17.12.2016 um 11:25.
- [8] *Informationsstelle Militarisierung – Wir über uns*. Website. Zu finden unter <http://www.imi-online.de/uber-imi/wir-uber-uns/>; aufgerufen am 7.8.2015 um 18:20.

- [9] Herbert Claas. *BdWi-Gründung im Jahre 1968: Eine 68er Gründung?* Website. Zu finden unter <http://www.infopartisan.net/archive/1967/2667119.html>; aufgerufen am 22.2.2018 um 17:10.
- [10] *Institut für Ethik, Geschichte und Theorie der Medizin an der LMU München – Über uns.* Website. Zu finden unter http://www.egt.med.uni-muenchen.de/ueber_uns/index.html; aufgerufen am 11.1.2018 um 16:55.
- [11] *Professur für Wirtschaftsethik an der Universität Kiel.* Website. Zu finden unter <https://www.econethics.uni-kiel.de/de>; aufgerufen am 11.1.2018 um 16:55.
- [12] *Ethikrat der Universität Bamberg.* Website. Zu finden unter <https://www.uni-bamberg.de/gremien/senat-kommissionen/kommissionen/ethikrat/>; aufgerufen am 11.1.2018 um 17:00.
- [13] *Internationales Zentrum für Ethik in den Wissenschaften (IZEW) an der Universität Tübingen – Das IZEW.* Website. Zu finden unter <http://www.izew.uni-tuebingen.de/das-izew/das-izew.html>; aufgerufen am 11.1.2018 um 17:00.
- [14] *Interdisziplinäres Ethikzentrum an der Universität Freiburg.* Website. Zu finden unter <https://www.igm.uni-freiburg.de/institut/ethikzentrum/>; aufgerufen am 11.1.2018 um 17:00.
- [15] *Bund demokratischer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler / BdWi.* Website. Zu finden unter <http://www.bdwi.de/bdwi/index.html>; aufgerufen am 22.2.2018 um 17:10.
- [16] *Gewerkschaft Erziehung und Wissenschaft – Zivilklausel an Hochschulen und Forschungseinrichtungen.* Website, 2013. Zu finden unter <https://www.gew.de/aktuelles/detailseite/neuigkeiten/zivilklausel-an-hochschulen-und-forschungseinrichtungen/>; aufgerufen am 7.4.2017 um 13:45.
- [17] *Deutsche Friedensgesellschaft - Vereinigte KriegsdienstgegnerInnen – Zivilklausel an Hochschulen.* Website. Zu finden unter <https://www.dfg-vk.de/positionen/articles/zivilklausel-an-hochschulen>; aufgerufen am 7.4.2017 um 13:45.
- [18] *Bremer Friedensforum – Aufruf: Hochschul-Zivilklausel absichern und Friedenskonzept entwickeln!* Website. Zu finden unter <http://www.bremerfriedensforum.de/717/appelle/Aufruf-Hochschul-Zi>

- vilklausel-absichern-und-Friedenskonzept-entwickeln/; aufgerufen am 7.4.2017 um 13:50.
- [19] *Hochschulen für den Frieden – Ja zur Zivilklausel! – Initiativen vor Ort.* Website. Zu finden unter <http://www.zivilklausel.de/index.php/initiativen-vor-ort>; aufgerufen am 7.4.2017 um 13:50.
- [20] Simon Meisch. *Forschungsfreiheit bedeutet auch Verantwortung.* Website, 2013. Zu finden unter <http://www.spektrum.de/kolumne/forschungsfreiheit-bedeutet-auch-verantwortung/1216030>; aufgerufen am 7.4.2017 um 14:25.
- [21] Bernhard Kempen. *Forschung ohne Gesinnungsvorbehalt.* Website, 2013. Zu finden unter <http://www.spektrum.de/kolumne/forschung-ohne-gesinnungsvorbehalt/1216027>; aufgerufen am 7.4.2017 um 14:30.
- [22] Mounia Meiborg. *Sollen Universitäten fürs Militär forschen?* Website, 2013. Zu finden unter <http://www.zeit.de/studium/hochschule/2013-01/zivilklausel-uni-kassel-pro-contra/komplettansicht>; aufgerufen am 7.4.2017 um 14:30.
- [23] *Deutsche Sektion der International Assiciation Of Lawyers Against Nuclear Arms – Über uns.* Website. Zu finden unter <http://www.ialana.de/ueber-uns>; aufgerufen am 7.4.2017 um 14:45.
- [24] Christian Mühlhause. *Zivilklausel: Studenten verleihen der Uni den „Goldenen Panzer“.* Website, 2015. Zu finden unter <http://www.augsburger-allgemeine.de/augsburg/Zivilklausel-Studenten-verleihen-der-Uni-den-Goldenen-Panzer-id36377292.html>; aufgerufen am 7.4.2017 um 16:20.
- [25] Sebastian Mense. *Senat der Universität Kassel verankert „Zivilklausel“ in Teilgrundordnung.* Website, 2013. Zu finden unter <https://www.uni-kassel.de/uni/nc/universitaet/nachrichten/article/senat-der-universitaet-kassel-verankert-zivilklausel-in-teilgrundordnung.html>; aufgerufen am 7.4.2017 um 16:25.
- [26] Dietrich Schulze. *Das Gespenst Zivilklausel-Gesetz geht um.* Website, 2015. Zu finden unter <http://www.nrhz.de/flyer/beitrag.php?id=21324>; aufgerufen am 7.4.2017 um 16:35.
- [27] Matthias Gebauer. *Bundeswehr-Hacker knackten afghanisches Mobilfunknetz.* Website, 2016. Zu finden unter <http://www.spiegel.de/politik/ausland/cyber-einheit-bundeswehr-hackte-afghanisches-mobilfunknetz-a-1113560.html>; aufgerufen am 14.4.2017 um 12:15.

- [28] *OHB – SAR-Lupe*. Website. Zu finden unter <https://www.ohb-system.de/sar-lupe.html>; aufgerufen am 28.7.2016 um 13:35.
- [29] Matthias Monroy. „*german heron tp*“: *kampfdrohnen der bundeswehr sollen ende 2019 einsatzfähig sein*. Website, 2017. Zu finden unter <https://netzpolitik.org/2017/german-heron-tp-kampfdrohnen-der-bundeswehr-sollen-ende-2019-einsatzfaehig-sein/>; aufgerufen am 13.4.2018 um 10:50.
- [30] Andrea Dernbach. *Leak zu US-Drohnenkrieg: Die meisten Toten sind unschuldige Zivilisten*. Website, 2015. Zu finden unter <http://www.tagesspiegel.de/politik/leak-zu-us-drohnenkrieg-die-meisten-toten-sind-unschuldige-zivilisten/12460084.html>; aufgerufen am 6.10.2017 um 15:45.
- [31] Katrin Busch. *Uni-Leitung steht zur OHB-Stiftungsprofessur*. Website, 2011. Zu finden unter <https://www.uni-bremen.de/de/universitaet/press/aktuelle-meldungen/detailansicht/news/detail/News/uni-leitung-steht-zur-ohb-stiftungsprofessur-2.html>; aufgerufen am 20.4.2017 um 16:00.
- [32] *National Science Foundation – At a Glance*. Website. Zu finden unter <https://www.nsf.gov/about/glance.jsp>; aufgerufen am 20.9.2017 um 11:55.
- [33] *Text des Göttinger Manifests der Göttinger 18*. Website. Zu finden unter <https://www.uni-goettingen.de/de//54320.html>; aufgerufen am 26.7.2017 um 12:50.
- [34] *Kurzgeschichte der IPPNW*. Website. Zu finden unter <https://www.ippnw.de/der-verein/geschichte-der-ippnw/geschichte.html>; aufgerufen am 26.7.2017 um 13:00.
- [35] *IALANA – Was wir erreicht haben*. Website. Zu finden unter <http://www.ialana.de/ueber-uns/geschichte-erfolge-ziele/121-was-wir-erreicht-haben>; aufgerufen am 26.7.2017 um 13:05.
- [36] Dietrich Schulze. *Karlsruhe: Zivilklausel – was ist das?* Website, 2009. Zu finden unter <http://www.stattweb.de/baseportal/ArchivDetail&db=Archiv&Id=1080>; aufgerufen am 27.7.2017 um 11:45.
- [37] *Forum InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung – Wir über uns*. Website. Zu finden unter <https://www.fiff.de/about>; aufgerufen am 26.7.2017 um 11:20.

- [38] *Einsatzzahlen – die Stärke der deutschen Kontingente*. Website, 2017. Zu finden unter https://www.bundeswehr.de/portal/a/bwde/start/einsaetze/ueberblick/zahlen/!ut/p/z1/hY4xD4IwFIR_iwNrXwMR0a0qi8HEBInQxRSobVMpKZX6861hMpF427v33eWAQg60Y2MrmG1Vx6S7Cxp1FyTvy17-_TdIdJFodZnJIAhyFc_gHUvfGMCIa051C4jtVsx9FBQIHe2cheqFfaSG4Qqz4LoWhYV0t-UhWZjANQIVU5TSd dGUQCq0Y3rr1GT-3sxph-2HjYw9ZaJJQSkq0ae_hXolGDgfwLhP6RWxws5ZiQxRtZISDo/dz/d5/L2dBISvZ0FBIS9nQSEh/#Z7_B8LTL2922DSSCOAUE6UESA30M0; aufgerufen am 5.9.2017 um 15:30.
- [39] Ulrike Scheffer. *Bundeswehr im Ausland: Im Einsatz*. Website, 2014. Zu finden unter <http://www.tagesspiegel.de/politik/bundeswehr-im-ausland-im-einsatz/11154904.html>; aufgerufen am 5.9.2017 um 15:30.
- [40] Dietrich Alexander. *Türkei, Südafrika, Indien... Man schießt deutsch*. Website, 2010. Zu finden unter <https://www.welt.de/politik/deutschland/article6787907/Tuerkei-Suedafrika-Indien-Man-schiest-deutsch.html>; aufgerufen am 6.9.2017 um 14:55.
- [41] Wolfgang Jaschensky. *Köhler: Krieg für freien Handel*. Website, 2012. Zu finden unter <http://www.sueddeutsche.de/politik/bundeswehreinsatz-e-koehler-wirtschaftsinteressen-militaerisch-durchsetzen-1.950594>; aufgerufen am 16.12.2015 um 11:35.
- [42] Gordon Repinski. *Guttenberg auf Köhlers Spuren*. Website, 2010. Zu finden unter <http://www.taz.de/!5132558/>; aufgerufen am 16.12.2015 um 11:35.
- [43] Frank-Walter Steinmeier. *Rede von Außenminister Frank-Walter Steinmeier anlässlich der 50. Münchner Sicherheitskonferenz*. Website, 2014. Zu finden unter http://www.auswaertiges-amt.de/nn_582140/sid_34AA109BFED82FC3745EF65DD666B545/DE/Infoservice/Presse/Reden/2014/140201-BM_M%C3%BCSiKo.html?nnm=582150; aufgerufen am 5.9.2017 um 14:25.
- [44] Angela Merkel. *Pressestatement von Bundeskanzlerin Merkel anlässlich der Terroranschläge in Paris am 14. November 2015*. Website, 2015. Zu finden unter <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Mitschrift/Pressekonferenzen/2015/11/2015-11-14-statement-merkel-paris.html>; aufgerufen am 7.9.2017 um 14:10.
- [45] Markus Becker and Matthias Gebauer. *Nach Anschlägen in Paris: Bundeswehr soll Frankreich in Mali entlasten*. Website, 2015. Zu finden unter <http://www.spiegel.de/politik/ausland/terror-anschlaege-bundeswehr-soll-franzosen-in-mali-entlasten-a-1063248.html>; aufgerufen am 7.9.2017 um 14:10.

- [46] Frank Decker. *Etappen der Parteigeschichte der LINKEN*. Website, 2017. Zu finden unter <http://www.bpb.de/politik/grundfragen/parteien-in-deutschland/die-linke/42130/geschichte>; aufgerufen am 6.9.2017 um 14:20.
- [47] *attac – Was ist attac?* Website. Zu finden unter <http://www.attac.de/was-ist-attac/>; aufgerufen am 5.9.2017 um 14:20.
- [48] *campact*. Website. Zu finden unter <https://www.campact.de/campact/>; aufgerufen am 5.9.2017 um 14:10.
- [49] *DFG-VK – Unser Programm*. Website. Zu finden unter <https://www.dfg-vk.de/programm-der-dfg-vk>; aufgerufen am 5.9.2017 um 14:10.
- [50] *Aktion Aufschrei – Wir über uns*. Website. Zu finden unter <http://www.aufschrei-waffenhandel.de/wir-ueber-uns/>; aufgerufen am 5.9.2017 um 14:00.
- [51] *Why We Don't Make Demands*. Website. Zu finden unter <https://crimethinc.com/2015/05/05/feature-why-we-dont-make-demands>; aufgerufen am 6.9.2017 um 9:25.
- [52] *Die Interventionistische Linke – Wir über uns*. Website. Zu finden unter <http://www.interventionistische-linke.org/interventionistische-linke/die-interventionistische-linke-wir-ueber-uns>; aufgerufen am 5.9.2017 um 12:40.
- [53] *graswurzelrevolution – Was bedeutet Graswurzelrevolution?* Website. Zu finden unter <http://www.graswurzel.net/ueberuns/gwr-kurz.shtml>; aufgerufen am 5.9.2017 um 12:30.
- [54] *Internet Archive: Wayback Machine – The Bologna Process – Towards the European Higher Education Area*. Website. Zu finden unter https://web.archive.org/web/20130502104427/http://ec.europa.eu/education/higher-education/bologna_en.htm; aufgerufen am 6.9.2017 um 10:00.
- [55] Martin Thureau. *Der Bachelor-Bankrott*. Website, 2010. Zu finden unter <http://www.sueddeutsche.de/karriere/studienreform-der-bachelor-bankrott-1.702254?page=4>; aufgerufen am 6.9.2017 um 10:05.
- [56] *Lissabon-Strategie*. Website. Zu finden unter <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Lexikon/EUGlossar/L/2005-11-21-lissabon-strategie.html>; aufgerufen am 6.9.2017 um 10:10.

- [57] *Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder (2005-2017)*. Website. Zu finden unter <http://www.dfg.de/foerderung/programme/exzellenzinitiative/>; aufgerufen am 5.9.2017 um 15:55.
- [58] Anne-Kathrin Gerstlauer. *Drittmittel sind ungleich verteilt*. Website, 2014. Zu finden unter <http://www.zeit.de/studium/hochschule/2014-02/Drittmittel-an-Hochschulen>; aufgerufen am 6.9.2017 um 10:15.
- [59] *Einnahmen der Hochschulen in Deutschland aus Drittmitteln im Jahr 2015 (in 1.000)*. Website, 2017. Zu finden unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/169069/umfrage/drittmittel-einnahmen-hochschulen-1998-und-2008/>; aufgerufen am 6.9.2017 um 10:15.
- [60] *Deutsche Forschungsgemeinschaft – Satzung*. Website, 2014. Zu finden unter http://www.dfg.de/dfg_profil/satzung/index.html; aufgerufen am 5.9.2017 um 12:20.
- [61] *Deutsche Forschungsgemeinschaft – Erkenntnistransfer*. Website. Zu finden unter http://www.dfg.de/foerderung/grundlagen_rahmenbedingungen/erkenntnistransfer/; aufgerufen am 5.9.2017 um 12:10.
- [62] *Deutsche Forschungsgemeinschaft – Sonderforschungsbereiche*. Website. Zu finden unter http://www.dfg.de/foerderung/programme/koordinierte_programme/sfb/; aufgerufen am 13.4.2018 um 11:50.
- [63] *Wissenschaftsrat – Aufgaben*. Website. Zu finden unter <https://www.wissenschaftsrat.de/ueber-uns/aufgaben.html>; aufgerufen am 5.9.2017 um 11:10.
- [64] *US-Militär finanziert deutsche Forscher*. Website, 2013. Zu finden unter <http://www.sueddeutsche.de/politik/geheimer-krieg-us-militaer-finanziert-deutsche-forscher-1.1826649>; aufgerufen am 6.9.2017 um 16:40.
- [65] *Anti-Sozialabbau-Demos: 500.000 marschieren gegen Schröders Agenda*. Website, 2004. Zu finden unter <http://www.spiegel.de/politik/deutschland/anti-sozialabbau-demos-500-000-marschieren-gegen-schroeders-agenda-a-293972.html>; aufgerufen am 6.9.2017 um 11:15.
- [66] *LabourNet Germany Archiv – Agenda 2010*. Website. Zu finden unter <http://archiv.labournet.de/diskussion/arbeit/realpolitik/allg/agenda2010.html>; aufgerufen am 6.9.2017 um 11:15.

- [67] *Studiengebühren in Deutschland*. Website. Zu finden unter <https://www.studis-online.de/StudInfo/Gebuehren/>; aufgerufen am 5.9.2017 um 11:05.
- [68] *Zivilklausel der TU Berlin*. Website. Zu finden unter https://www.tu-berlin.de/menue/ueber_die_tu_berlin/gesetze_richt_l eitlinien/zivilklausel_der_tu_berlin/; aufgerufen am 5.9.2017 um 10:50.
- [69] *Zivilklausel an der Universität Konstanz*. Website. Zu finden unter <https://www.uni-konstanz.de/forschen/forschungsprofil/zivilklausel/>; aufgerufen am 5.9.2017 um 10:50.
- [70] *Initiative Hochschulen für den Frieden – Ja zur Zivilklausel – Fragen und Antworten*. Website. Zu finden unter <http://www.zivilklausel.de/index.php/fragen-und-antworten>; aufgerufen am 5.9.2017 um 10:25.
- [71] Andreas Zumach. *Zehn Jahre Kosovokrieg: Völkerrecht gebrochen*. Website, 2009. Zu finden unter <http://www.taz.de/!5165840/>; aufgerufen am 6.9.2017 um 12:00.
- [72] Florian Rötzer. *Generalbundesanwaltschaft weist Strafanzeigen wegen Syrien-Einsatz der Bundeswehr ab*. Website, 2016. Zu finden unter <https://www.heise.de/tp/features/Generalbundesanwaltschaft-weist-Strafanzeigen-wegen-Syrien-Einsatz-der-Bundeswehr-ab-3263481.html>; aufgerufen am 6.9.2017 um 12:05.
- [73] *Initiative Friedliche Uni Augsburg – Gängige Gegenargumente*. Website. Zu finden unter <http://friedliche-uni-augsburg.blogspot.de/p/blog-page.html>; aufgerufen am 6.9.2017 um 16:15.
- [74] Michael Schulze von Glaßer. *Zivilklauseln in Deutschland*. Website, 2014. Zu finden unter <https://www.freitag.de/autoren/michael-schulze-von-glasser/zivilklauseln-in-deutschland>; aufgerufen am 6.9.2017 um 13:10.
- [75] Ralf Pauli. *Hochschule Bremen und Zivilklausel: Uniform im Hörsaal*. Website, 2016. Zu finden unter <http://www.taz.de/!5331942/>; aufgerufen am 6.9.2017 um 13:10.
- [76] Michael Schulze von Glaßer. *Militärforschung: “Wissenschaftler müssen Verantwortung übernehmen“*. Website, 2012. Zu finden unter <https://www.heise.de/tp/features/Militaerforschung-Wissenschaftler-muessen-Verantwortung-uebernehmen-3393321.html>; aufgerufen am 5.9.2017 um 9:45.

- [77] *Universität Oldenburg – Informatik und Gesellschaft*. Website. Zu finden unter <http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug/>; aufgerufen am 5.9.2017 um 9:35.
- [78] *Technische Universität Dresden – Informatik und Gesellschaft*. Website. Zu finden unter https://tu-dresden.de/ing/informatik/sya/ps/studium/lectures/iug?set_language=de; aufgerufen am 5.9.2017 um 9:35.
- [79] *Hochschule Darmstadt – Informatik und Gesellschaft*. Website. Zu finden unter <https://www.fbi.h-da.de/organisation/personen/wentzel-christoph/informatik-und-gesellschaft.html>; aufgerufen am 5.9.2017 um 9:40.
- [80] *Autonomous Weapons: an Open Letter from AI & Robotics Researchers*. Website, 2015. Zu finden unter <http://futureoflife.org/open-letter-autonomous-weapons>; aufgerufen am 17.6.2016 um 13:55.
- [81] Jörg Thoma. *Lizenzen gegen den Missbrauch freier Software*. Website, 2015. Zu finden unter <https://www.golem.de/news/open-source-lizenzen-gegen-den-missbrauch-freier-software-1509-116210.html>; aufgerufen am 6.9.2017 um 13:25.
- [82] *Gregor Nickel – Philosophische Arbeiten*. Website. Zu finden unter <http://www.uni-siegen.de/fb6/phima/member/prof/publphil.html?lang=de>; aufgerufen am 5.9.2017 um 9:30.
- [83] *United States SIGINT System, January 2007 Strategic Mission List*. PDF. Zu finden unter <http://cryptome.org/2013/11/nsa-sigint-strategic-mission-2007.pdf>; aufgerufen am 17.9.2015 um 16:35.
- [84] *SafeSoft*. Website. Zu finden unter <http://www.safesoft.hu/index.php?menu=contact&lng=en>; aufgerufen am 17.9.2015 um 17:25.
- [85] *Rohde & Schwarz*. Website. Zu finden unter https://www.rohde-schwarz.com/de/home_48230.html; aufgerufen am 13.4.2018 um 13:00.
- [86] *Utimaco – Products*. Website. Zu finden unter <https://www.utimaco.com/en/products/>; aufgerufen am 17.9.2015 um 17:25.
- [87] Joseph Menn. *Exclusive: Secret contract tied NSA and security industry pioneer*. Website, 2013. Zu finden unter <http://www.reuters.com/article/2013/12/21/us-usa-security-rsa-idUSBRE9BJ1C220131221>; aufgerufen am 18.9.2015 um 14:40.

- [88] Mikko Hypponen. *An Open Letter to the Chiefs of EMC and RSA*. Website, 2013. Zu finden unter <https://www.f-secure.com/weblog/archives/00002651.html>; aufgerufen am 19.9.2015 um 17:45.
- [89] Seth Rosenblatt. *RSA Conference speakers begin to bail, thanks to NSA*. Website, 2014. Zu finden unter <http://www.cnet.com/news/rsa-conference-speakers-begin-to-bail-thanks-to-nsa/>; aufgerufen am 19.9.2015 um 17:50.
- [90] Daniel J. Bernstein and Tanja Lange. *SafeCurves: choosing safe curves for elliptic-curve cryptography*. Website. Zu finden unter <http://safecurves.cr.yp.to>; aufgerufen am 11.12.2015 um 14:25.
- [91] *Fraunhofer FKIE – Organisation*. Website. Zu finden unter <https://www.fkie.fraunhofer.de/de/ueber-fkie/organisation.html>; aufgerufen am 13.4.2018 um 13:50.
- [92] *Fraunhofer FKIE – Forschungsabteilungen*. Website. Zu finden unter <https://www.fkie.fraunhofer.de/de/forschungsabteilungen.html>; aufgerufen am 13.4.2018 um 13:50.
- [93] *Universität Bonn – Institute of Computer Science 4*. Website. Zu finden unter <https://net.cs.uni-bonn.de/start/>; aufgerufen am 10.2.2016 um 13:55.
- [94] *AFCEA Fachausstellung 2015*. Website. Zu finden unter <https://www.afcea.de/veranstaltungen/fachausstellung/fachausstellung-2015.html>; aufgerufen am 10.2.2016 um 14:00.
- [95] *AFCEA Fachausstellung 2015 – Ausstellende Firmen - Stände*. Website. Zu finden unter <https://www.afcea.de/veranstaltungen/fachausstellung/fachausstellung-2015/ausstellung-2015.html>; aufgerufen am 10.2.2016 um 14:05.
- [96] *Internet Archive: Wayback Machine – IDP / MIKE – Sicherheit zwischen Kommunikationspartnern*. Website. Zu finden unter <https://web.archive.org/web/20160527030252/http://www.fkie.fraunhofer.de:80/de/forschungsbereiche/cyber-analysis-and-defense/projekt-idp-mike.html>; aufgerufen am 13.4.2018 um 14:05.
- [97] *Christof Fox: Konzeption eines SOA-konformen Discovery Mechanismus zur Verbesserung der Fehlertoleranz eines Gruppenschlüsselmanagements*. Website. Zu finden unter http://www.leischner.inf.fh-bonn-rhein-sieg.de/aa/thesis/08_Fox_MIKE-IDP.htm; aufgerufen am 10.2.2016 um 14:20.

- [98] *Shirish Negi: Evaluation and Optimization of the Group Key Management IDP-MIKE over VHF Data Links*. Website. Zu finden unter <https://net.cs.uni-bonn.de/de/nc/aktuelles/newsansicht/708/e8d00ec903a483e2f6d361bfa9b8438e/>; aufgerufen am 10.2.2016 um 14:20.
- [99] *Anastasia Danilova: Bewertung des IDP-MIKE-Systems in Bezug auf Replay- und DoS- Angriffe*. Website. Zu finden unter <http://net.cs.uni-bonn.de/nc/news/singleview/584/2ccfc86b9375cec3546458bceb644c07/>; aufgerufen am 10.2.2016 um 14:15.
- [100] Daniel J. Bernstein and Tanja Lange. *Twist security*. Website. Zu finden unter <http://safecurves.cr.yyp.to/twist.html>; aufgerufen am 16.12.2015 um 13:55.
- [101] *Bundesnachrichtendienst – Struktur*. Website. Zu finden unter http://www.bnd.bund.de/DE/Karriere/Allgemeine%20Informationen/Allgemeine%20Informationen_node.html; aufgerufen am 13.12.2015 um 17:35.
- [102] *Bundesnachrichtendienst – Auftrag*. Website. Zu finden unter http://www.bnd.bund.de/DE/Auftrag/Auftrag_node.html; aufgerufen am 13.12.2015 um 17:30.
- [103] Konrad Lischka. *Geheimdienst-Kooperation: BND leitet seit 2007 Daten an die NSA weiter*. Website, 2013. Zu finden unter <http://www.spiegel.de/netzwelt/netzpolitik/geheimdienste-bnd-leitet-seit-2007-daten-an-die-nsa-weiter-a-915589.html>; aufgerufen am 13.12.2015 um 18:05.
- [104] *SKYNET: Applying Advanced Cloud-based Behavior Analytics*. Website, 2015. Zu finden unter <https://theintercept.com/document/2015/05/08/skynet-applying-advanced-cloud-based-behavior-analytics/>; aufgerufen am 17.6.2016 um 13:15.
- [105] *Automatische Situationseinschätzung für ereignisgesteuerte Videoüberwachung (ASEV)*. PDF. Zu finden unter http://www.sifo.de/files/Projektumriss_ASEV.pdf; aufgerufen am 17.6.2016 um 13:10.
- [106] *Verteilte, vernetzte Kamerasysteme zur in situ-Erkennung personen-induzierter Gefahrensituationen (CamInSens)*. PDF. Zu finden unter [http://www.sifo.de/files/Mustererkennung_D_CamInSens\(1\).pdf](http://www.sifo.de/files/Mustererkennung_D_CamInSens(1).pdf); aufgerufen am 6.3.2017 um 13:40.
- [107] *Internet Archive: Wayback Machine – About PLATO-N*. Website. Zu finden unter https://web.archive.org/web/20160809084927/http://www.plato-n.org:80/about_plato_n; aufgerufen am 13.4.2018 um 16:35.

- [108] *Die Mathematik fliegt mit.* Website, 2009. Zu finden unter <https://eam.fau.de/de/news-events/pr-public-outreach/einzelne-presemitteilungen/article/die-mathematik-fliegt-mit/>; aufgerufen am 28.7.2016 um 12:40.
- [109] *Internet Archive: Wayback Machine – PLATO-N – Work Packages.* Website. Zu finden unter https://web.archive.org/web/20160607000742/http://www.plato-n.org:80/about_plato_n/Work-Packages; aufgerufen am 13.4.2018 um 16:40.
- [110] *Optimierung von Satellitenkonstellationen.* Website. Zu finden unter <http://www.math.uni-bremen.de/zetem/cms/detail.php?id=7907>; aufgerufen am 28.7.2016 um 12:45.
- [111] *Optimierung von Beobachtungszeitplänen für optische Satelliten.* Website. Zu finden unter <http://www.math.uni-bremen.de/zetem/cms/detail.php?id=5552>; aufgerufen am 28.7.2016 um 12:45.
- [112] *Technologiepreis für Mathematiker Christof Büskens.* Website, 2008. Zu finden unter <https://www.uni-bremen.de/universit%C3%A4t/presse/aktuelle-meldungen/detailansicht/news/detail/News/technologiepreis-fuer-mathematiker-christof-bueskens-1.html>; aufgerufen am 13.4.2018 um 16:40.
- [113] *OHB-System AG mit Technologiepreis der Steinbeis-Stiftung geehrt.* Website, 2008. Zu finden unter <https://www.ohb-system.de/pressemitteilungen-details/ohb-system-ag-mit-technologiepreis-der-steinbeis-stiftung-geehrt.html>; aufgerufen am 13.4.2018 um 16:45.
- [114] *Airbus Group takes off into 2014 with joint brand.* Website. Zu finden unter <https://www.intelligence-airbusds.com/en/5577-airbus-group-takes-off-into-2014-with-joint-brand>; aufgerufen am 13.4.2018 um 16:50.
- [115] *IABG Werkstudenten-Flyer.* PDF. Zu finden unter https://www.iabg.de/fileadmin/media/Karriere/Studentenflyer/2012-09_Werkstudenten-Flyer_05b_01.pdf; aufgerufen am 25.8.2016 um 16:15.
- [116] *MBDA – Praktikant (m/w) – Robustheitsuntersuchung für rekonstruierte 3D-Linien.* Website. Zu finden unter <https://www.mbda-careers.de/ema/index.php/ext/jobDetail/mbda/394>; aufgerufen am 25.8.2016 um 16:20.
- [117] *Universität Bremen – Abschlussarbeiten der AG Numerik PDE.* Website. Zu finden unter http://www.math.uni-bremen.de/zetem/cms/detail.php?tempate=ag_abschlussarbeiten&id=4356; aufgerufen am 25.8.2016 um 16:20.

- [118] *Internet Archive: Wayback Machine – Cassidian – Our Mission*. Website. Zu finden unter https://web.archive.org/web/20120929051529/http://www.cassidian.com/en_US/web/guest/mission; aufgerufen am 26.8.2016 um 8:25.
- [119] *Aktion Aufschrei – Cassidian*. Website. Zu finden unter <http://www.aufschrei-waffenhandel.de/daten-fakten/ruestungsfirmen/cassidian/cassidian-unternehmensportraet/>; aufgerufen am 13.4.2018 um 16:55.
- [120] *Startschuss zum Sofortprogramm für MINT-Absolventen*. Website, 2009. Zu finden unter <http://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/startschuss-zum-sofortprogramm-fuer-mint-absolventen/>; aufgerufen am 25.8.2016 um 16:30.
- [121] *Geheimhaltungsvereinbarung – Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*. DOC. Zu finden unter https://www.zuv.fau.de/universitaet/organisation/verwaltung/zuv/verwaltungshandbuch/drittmittel/Geheimhaltungsvereinbarung_deutsch.doc; aufgerufen am 8.12.2016 um 10:00.
- [122] *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. Website. Zu finden unter http://arc.aiaa.org/loi/jgcd?_ga=1.206665947.979847304.1478512439; aufgerufen am 8.12.2016 um 10:30.
- [123] *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Website. Zu finden unter <https://www.aiaa.org/EventDetail.aspx?id=16566>; aufgerufen am 8.12.2016 um 10:30.
- [124] *FragDenStaat.de – DEOS - Deutsche Orbitale Servicing*. Website, 2016. Zu finden unter <https://fragdenstaat.de/anfrage/deos-deutsche-orbitale-servicing/>; aufgerufen am 8.12.2016 um 11:05.
- [125] *Airbus Defence and Space – Sichere Satellitenkommunikation aus einer Hand*. Website. Zu finden unter <http://www.milsatservices.de/>; aufgerufen am 13.4.2018 um 17:00.
- [126] *Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr: SAR-Lupe*. Website. Zu finden unter http://www.baainbw.de/portal/a/baain/start/projekt/einzelp/sarlup e/!ut/p/z1/hU5NC4IwGP4tHbzufVPs6zYpqBCSjNJdYuqaxnKylvbzMzwFRc_t-eQBBgmwmreV5LbSNVc9T9nkHMzCQ-j0XXcZrVzce0ujvw92SBHh9C_Aeht_gCLEhYC035j-3hhDDAZylbf8SRptrBKW8Pz9ENKS14USkc7pIGyBSaWz4TqtM28mgRl

xEUYY8jC9XFrb3Bc00th1HZFaSyVIIRz81ij13ULyEYTmlnTo-aoN6egFLKQI1w!!
/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/#Z7_B8LTL2922DPE20I3HV5RB00A01;
aufgerufen am 8.12.2016 um 11:15.

- [127] *Für den Ausbau der Universität gegen ihre Zerstörung! Rettet die Sozial- und Wirtschaftsgeschichte!* PDF. Zu finden unter <https://www.uni-hamburg.de/kampf-um-die-zukunft/unterschriftenliste-u-sozwirtgesch.pdf>;
aufgerufen am 14.12.2016 um 12:45.
- [128] Christine Burtscheidt. *Sparkurs in Bayern: Geisteswissenschaften in Gefahr*. Website, 2010. Zu finden unter <http://www.sueddeutsche.de/karriere/sparkurs-in-bayern-geisteswissenschaften-in-gefahr-1.550944>;
aufgerufen am 14.12.2016 um 12:50.
- [129] Bernard Marr. *A Short History of Machine Learning – Every Manager Should Read*. Website, 2016. Zu finden unter <http://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2016/02/19/a-short-history-of-machine-learning-every-manager-should-read/>; aufgerufen am 24.1.2017 um 16:25.
- [130] *KIT – Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme – Unser Profil*. Website. Zu finden unter <https://ies.anthropomatik.kit.edu/profil.php>; aufgerufen am 23.2.2017 um 12:10.
- [131] *Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer – Institutsleiter*. Website. Zu finden unter <http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/65069/>; aufgerufen am 23.2.2017 um 12:20.
- [132] *Lehrstuhl für IES*. Website. Zu finden unter <http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/2543/>; aufgerufen am 23.2.2017 um 12:20.
- [133] *KIT – IES – Mitarbeiter*. Website. Zu finden unter <https://ies.anthropomatik.kit.edu/mitarbeiter.php>; aufgerufen am 23.2.2017 um 12:20.
- [134] *ABUL - Automatisierte Bildauswertung für Unbemannte Luftfahrzeuge*. Website. Zu finden unter <http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/59702/>; aufgerufen am 23.2.2017 um 12:25.
- [135] *KIT – IES – Mitarbeiter – Dr.-Ing. Michael Teutsch*. Website. Zu finden unter <https://ies.anthropomatik.kit.edu/mitarbeiter.php?person=teutsch>;
aufgerufen am 23.2.2017 um 13:15.

- [136] *Internet Archive: Wayback Machine – Gestenbasierte Interaktion am Digitalen Lagetisch*. Website. Zu finden unter <https://web.archive.org/web/20150721035617/http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/4433/>; aufgerufen am 13.4.2018 um 17:40.
- [137] *KIT – IES – Mitarbeiter – Dr.-Ing. Thomas Bader*. Website. Zu finden unter <https://ies.anthropomatik.kit.edu/mitarbeiter.php?person=bader>; aufgerufen am 23.2.2017 um 11:35.
- [138] *Internet Archive: Wayback Machine – Publikationen zum Digitalen Lagetisch*. Website. Zu finden unter <https://web.archive.org/web/20160511142005/http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/21360/>; aufgerufen am 13.4.2018 um 17:40.
- [139] *Suchfunktion der Fraunhofer-Publica*. Website. Zu finden unter <http://publica.fraunhofer.de/starweb/pub09/iosb/index.htm>; aufgerufen am 13.4.2018 um 17:55.
- [140] *Gemeinsames Melde- und Lagezentrum von Bund und Ländern (GMLZ)*. Website. Zu finden unter http://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/Krisenmanagement/GMLZ/GMLZ_node.html; aufgerufen am 23.2.2017 um 10:30.
- [141] Nils Wienböcker and Daniel Eisenbaum. *Neue Hardware für virtuelle Konflikte*. Website, 2016. Zu finden unter <https://www.fueakbw.de/index.php/de/aktuelles/46-neue-hardware-fuer-virtuelle-konflikte>; aufgerufen am 13.4.2018 um 17:55.
- [142] *Tag der Bundeswehr 2016 - Digitaler Lagetisch - Fraunhofer-Institut & Führungsakademie*. Video, 2016. Zu finden unter <https://www.youtube.com/watch?v=uuMdKL16xKs>; aufgerufen am 23.2.2017 um 10:30.
- [143] *Internet Archive: Wayback Machine – Infrastrukturanalyse (SiteAnalyst)*. Website. Zu finden unter <https://web.archive.org/web/20150721035612/http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/4429/>; aufgerufen am 13.4.2018 um 18:10.
- [144] *Internet Archive: Wayback Machine – Maritime Situationsanalyse (WiMAAS)*. Website. Zu finden unter <https://web.archive.org/web/20150721005819/http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/29847/>; aufgerufen am 13.4.2018 um 18:10.

- [145] *Forschen für die Sicherheit*. Website, 2012. Zu finden unter <https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Artikel/2012/01/2012-01-25-forschen-fuer-unsere-sicherheit.html>; aufgerufen am 4.3.2017 um 13:45.
- [146] Monika Sester and Colin Kuntzsch. *Szenenanalyse – Mustererkennung in Personen-Tracks*. PDF. Zu finden unter http://www.caminsens.org/PDF/CamInSens_Szenenanalyse.pdf; aufgerufen am 6.3.2017 um 15:10.
- [147] Colin Kuntzsch and Monika Sester. *Pattern recognition in pedestrian movement trajectories*. PDF. Zu finden unter http://www.geomatik-hamburg.de/geoviz11/abstracts/17_KuntzschSester_CamInSens_GeoViz_Abstract.pdf; aufgerufen am 6.3.2017 um 15:15.
- [148] *CamInSens Projektpartner – Landeskriminalamt Baden-Württemberg*. Website. Zu finden unter <http://www.caminsens.org/Team.html>; aufgerufen am 6.3.2017 um 15:25.
- [149] Matthias Monroy. *An Bahnhöfen lieber nicht rennen oder herumlungern: Bundespolizei erprobt Videoüberwachung mit Mustererkennung*. Website, 2016. Zu finden unter <https://netzpolitik.org/2016/lieber-nicht-rennen-oder-herumlungern-bundespolizei-erprobt-mustererkennung-an-bahnhoefen/>; aufgerufen am 7.3.2017 um 11:50.
- [150] *Projekte des Sicherheitsforschungsprogramms*. Website. Zu finden unter <http://www.sifo.de/de/projekte-a-z.php>; aufgerufen am 7.3.2017 um 11:50.
- [151] *Universität der Bundeswehr München – Institut für Angewandte Informatik*. Website. Zu finden unter <https://www.unibw.de/inf4>; aufgerufen am 13.4.2018 um 18:30.
- [152] *Die DAGM*. Website. Zu finden unter <http://www.dagm.de/die-dagm/>; aufgerufen am 14.3.2017 um 14:45.
- [153] *DAGM – Vorstand*. Website. Zu finden unter <http://www.dagm.de/die-dagm/organisation/vorstand/>; aufgerufen am 14.3.2017 um 14:45.
- [154] *DAGM – Technisches Komitee*. Website. Zu finden unter <http://www.dagm.de/die-dagm/organisation/committee/>; aufgerufen am 14.3.2017 um 14:45.
- [155] *Internet Archive: Wayback Machine – About DARPA*. Website. Zu finden unter <https://web.archive.org/web/20170128192739/http://www.darpa.mil/about-us/about-darpa>; aufgerufen am 15.3.2017 um 14:25.

- [156] *Internet Archive: Wayback Machine – DARPA Urban Challenge*. Website. Zu finden unter <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.html>; aufgerufen am 15.3.2017 um 14:35.
- [157] *Internet Archive: Wayback Machine – DARPA Robotics Challenge*. Website. Zu finden unter <https://web.archive.org/web/20160428005028/http://www.darparoboticschallenge.org>; aufgerufen am 15.3.2017 um 14:40.
- [158] *Internet Archive: Wayback Machine – DARPA Urban Challenge – Team CarOLO*. Website. Zu finden unter <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/Teams/CarOLO.html>; aufgerufen am 15.3.2017 um 14:45.
- [159] *Internet Archive: Wayback Machine – DARPA Urban Challenge – Team AnnieWay*. Website. Zu finden unter <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/Teams/TeamAnnieway.html>; aufgerufen am 15.3.2017 um 14:45.
- [160] *Internet Archive: Wayback Machine – DARPA – DARPA Robotics Challenge*. Website. Zu finden unter https://web.archive.org/web/20150507154516/http://www.darpa.mil/Our_Work/TT0/Programs/DARPA_Robotics_Challenge.aspx; aufgerufen am 15.3.2017 um 15:15.
- [161] *Team Hector*. Website. Zu finden unter <http://www.teamhector.de/>; aufgerufen am 15.3.2017 um 15:20.
- [162] *Team ViGIR*. Website. Zu finden unter <http://torcrobotics.com/team-vigir-team/>; aufgerufen am 15.3.2017 um 15:25.
- [163] *Autonomous Intelligent Systems – NimbRo Rescue*. Website. Zu finden unter <http://www.ais.uni-bonn.de/nimbRo/Rescue/>; aufgerufen am 15.3.2017 um 15:25.
- [164] *Verigames*. Website. Zu finden unter <http://www.verigames.com/home.html>; aufgerufen am 17.3.2017 um 9:30.
- [165] *Crowd Sourced Formal Verification (CSFV)*. Website. Zu finden unter <http://www.darpa.mil/program/crowd-sourced-formal-verification>; aufgerufen am 17.3.2017 um 9:35.
- [166] Paul Rubens. *How playing computer games can make the world safer*. Website, 2015. Zu finden unter <http://www.bbc.com/news/business-33519194>; aufgerufen am 17.3.2017 um 9:40.

- [167] *KIT – IES – Jürgen Geisler*. Website. Zu finden unter <https://ies.anthropomatik.kit.edu/mitarbeiter.php?person=geisler>; aufgerufen am 23.3.2017 um 14:50.
- [168] *KIT – IES – Studium und Lehre*. Website. Zu finden unter <https://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre.php>; aufgerufen am 23.3.2017 um 14:50.
- [169] *KIT – IES – Bildauswertung und -fusion*. Website. Zu finden unter https://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre_seminar_baf.php; aufgerufen am 13.4.2018 um 18:50.
- [170] *KIT – IES – Abschlussarbeiten – Datensimulation zur Bildverarbeitung*. Website. Zu finden unter https://ies.anthropomatik.kit.edu/sda.php?lang=de&key=sda_2016_sommer_datensimulation; aufgerufen am 13.4.2018 um 18:55.
- [171] *KIT – IES – Abschlussarbeiten – Semantische Segmentierung von Luftbilddaten mittels Deep Learning*. Website. Zu finden unter https://ies.anthropomatik.kit.edu/sda.php?lang=de&key=sda_sommer_segmentierung; aufgerufen am 23.3.2017 um 15:00.
- [172] *An Open Letter to the United Nations Convention on Certain Conventional Weapons*. Website, 2017. Zu finden unter <https://futureoflife.org/autonomous-weapons-open-letter-2017/>; aufgerufen am 25.10.2017 um 13:30.

Bildquellen

	Seite
Abbildung 1.1	Rekke/Wikimedia Commons/gemeinfrei 2
Abbildung 2.1	Richter-Publizistik, Bonn; www.crp-infotec.de 13
Abbildung 2.2	foodwatch/Flickr/CC BY-SA 2.0 22
Abbildung 3.1	Bundesarchiv, Bild 146-1978-Anh.026-01/CC-BY-SA 3.0 31
Abbildung 3.2	United States Air Force/Wikimedia Commons/gemeinfrei 35
Abbildung 3.3	Alexrk2/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 40
Abbildung 3.4	Niels Flöter/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 45
Abbildung 3.5	Thorsten Schröder 51
Abbildung 4.1	Darstellung des Autors/CC BY-NC-SA 4.0 59
Abbildung 4.2	Luringen/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 61
Abbildung 4.3	Eckhard Henkel/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 DE 70
Abbildung 4.4	ProkopHapala, abgeändert durch den Autor/gemeinfrei 80
Abbildung 4.5	MartinThoma/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 94
Abbildung 4.6	SKopp/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 97
Abbildung 4.7	Darstellung des Autors/CC BY-NC-SA 4.0 100
Abbildung 4.8	DLR/Flickr/CC BY 2.0 104
Abbildung 4.9	Chrislb/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 110
Abbildung 4.10	H3llkn0wz/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 111
Abbildung 4.11	Uddinkabir/Wikimedia Commons/CC BY-SA 4.0 117
Abbildung 4.12	Damien ELIE/Wikimedia Commons/CC BY-SA 4.0 122
Abbildung 4.13	Screenshot des Autors 129

Anmerkungen

Diese Buchversion der Dissertation unterscheidet sich an einigen wenigen Stellen von der zu Prüfungszwecken bei der Universität Bremen eingereichten Arbeit. Einzelne Abschnitte wurden erweitert oder gekürzt sowie das Layout für den Buchdruck angepasst. Es folgt eine knappe Zusammenfassung der vorgenommenen Änderungen.

- Seiten i - v: Das ursprüngliche Vorwort wurde in die zwei Abschnitte *Vorwort* und *Danksagung* geteilt.
- Kapitel 3: Zur besseren Verständlichkeit wurde der Fokus der Arbeit auf westdeutsche Entwicklungen in der Zeit von 1949 bis 1990 herausgestellt. An einigen Stellen des Kapitels wurde „westdeutsch“ oder „Westdeutschland“ eingefügt, um Verwirrungen zu vermeiden.
- Seite 140: Es wurde eine Aussage zur Publikationspraxis in der Wissenschaftsethik und der praktischen Philosophie entfernt.
- Das Layout wurde für die Buchpublikation und damit einhergehende Formatänderungen angepasst (z. B. Positionen von Seitenzahlen, Grafiken und Tabellen, Schriftgröße, Länge der Kopfzeilen, Seitenränder, Leerseiten, usw.).

