

**Systematische Analyse
der Entwicklungen
von EMP-Werkzeugen
mit Bedrohungs- und
Entwicklungspotenzial
aus Sicht der Sicherheit**

Systematische Analyse der Entwicklungen von EMP-Werkzeugen mit Bedrohungs- und Entwicklungspotenzial aus Sicht der Sicherung

Abschlussbericht

Marco Gehrke

Juli 2024

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4722R01530 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Drohnen, elektromagnetischer Impuls, elektromagnetische Interferenz, EMP, IEMI, Kerntechnik, SEWD, Sicherung, Wellen

Kurzfassung

Der Betrieb von kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen mit Kernbrennstoffen erfordert einen Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD). Im Rahmen technischer Entwicklungen und sich verändernder Bedrohungslagen sind die Schutzmaßnahmen aller Anlagen und Einrichtungen entsprechend anzupassen. In den letzten Jahren ist die Bedrohung durch elektromagnetische Impulse (en: electromagnetic pulse - EMP) und die damit verbundene Störung technischer Geräte gestiegen. Die Bedrohung durch den sogenannten nuklearen elektromagnetischen Impuls (NEMP) stellt eine Gefahr für die Menschen und die Wirtschaft eines ganzen Landes dar. Ein EMP kann aber auch im kleinen Rahmen zur Störung oder Zerstörung lokaler technischer Geräte und Sicherungseinrichtungen eingesetzt werden. Ein Ziel dieser Studie ist es, die Gefahr durch den Einsatz von EMP gegen kerntechnische Anlagen und Einrichtungen zu analysieren und mögliche Schutzmaßnahmen gegen EMP aufzustellen. EMP bietet ein großes Spektrum an Wellenlängen mit jeweils unterschiedlichen Wirkungen auf elektrische Geräte und Organismen. Die Einwirkungen der verschiedenen Wellenlängen werden analysiert und deren Wirkung und Schutzmaßnahmen ermittelt. Auch nationale und internationale Vorfälle, die zumindest unter dem Verdacht des Einsatzes von EMP stehen, werden untersucht, um die Bedrohungslage besser einschätzen zu können.

Gleichzeitig bietet ein EMP auch die Möglichkeit der Abwehr gegen die stetig steigende Anzahl von Drohnen bzw. autonomer, auch fliegender, Systeme. Deren Einsatz hat in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen und wird zunehmend zum Störfaktor mit teilweise hohem Bedrohungspotenzial. Neben dem Einsatz von Drohnen mit Kameras zur Beobachtung und Aufklärung kerntechnischer Anlagen bieten größere Drohnen auch die Möglichkeit, Waffen oder Werkzeuge auf das Gelände zu transportieren. Fliegende Drohnen werden stetig kostengünstiger und leichter zu bedienen, wodurch deren Verbreitung in der Bevölkerung weiter zunimmt. Ebenso werden Fahrzeuge immer häufiger als Waffe gegen Menschen oder teilweise gegen Einrichtungen missbraucht. Auch hier kann EMP zum Stoppen von Fahrzeugen, die als Waffe gezielt gegen kerntechnische Einrichtungen eingesetzt werden, verwendet werden. Ein weiteres Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Möglichkeiten von EMP als Wirkmittel gegen autonome Systeme zu analysieren und mögliche Anforderungen an Objektsicherungsdienste aufzustellen. Hier bietet der Markt bereits eine Auswahl an Wirkmitteln, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersucht werden.

Abstract

The operation of nuclear facilities and facilities with nuclear fuel requires protection against malicious acts. In the context of technical developments and changing threat situations, the protective measures of all systems and facilities must be adapted accordingly. In recent years, the threat of electromagnetic pulses (EMP) and the associated destruction of technical devices has increased. The threat posed by the so-called nuclear electromagnetic pulse poses a danger to people and the economy of an entire country. However, EMP can also be used on a small scale to damage or destroy local technical equipment and security systems. One aim of this study is to analyze the risk of using EMP against nuclear installations and facilities and to set up possible protective measures against EMP. EMP offers a wide range of wavelengths, each with different effects on electrical devices and organisms. The effects of the different wavelengths are analyzed, and their effect and protective measures are determined. National and international incidents that are at least suspected to be caused by an EMP are investigated to better assess the threat situation.

At the same time, an EMP also offers the possibility of defense against the steadily increasing number of unmanned aerial vehicles (UAV). Their use has increased significantly in recent years and is increasingly becoming a disruptive factor, sometimes with a high threat potential. In addition to the use of UAV with cameras for observing and reconnaissance of nuclear facilities, larger UAV also offer the possibility of transporting weapons or tools to the site. UAV are constantly becoming cheaper and easier to operate, which means that their spread among the population is steadily increasing. Likewise, vehicles are increasingly being misused as a weapon against people. Again, EMP can be used to stop vehicles that are being used as a weapon against nuclear facilities. Another goal of this research project is to analyze the possibilities of EMP as an effective means against autonomous systems and to establish possible requirements for object security services. The market already offers a selection of active ingredients that are being examined as part of this research project.

Inhaltsverzeichnis

1	Stand von Wissenschaft und Technik von elektromagnetischen Wellen bei der Nutzung als Hilfsmittel wie auch zur Abwehr möglicher Angriffe.....	1
1.1	Fachbegriffe.....	3
1.2	Grundlagen Elektromagnetismus.....	6
1.3	Auswirkungen unterschiedlicher Wellenlängen auf Menschen und Elektronik.....	8
1.3.1	Ionisierende und nicht-ionisierende Strahlung	8
1.3.2	Strahlung niedriger Frequenz	9
1.3.3	Strahlung mittlerer Frequenz	10
1.3.4	Strahlung hoher Frequenz	11
1.3.5	Strahlung höherer Frequenzen	12
1.4	Wiederholbare Erzeugung von schwachen EMP	13
1.5	Erzeugung einmalig starker EMP.....	17
1.6	Bündelung von Wellen.....	19
2	Nationale und internationale Vorfälle mit Verwendung von EMP und deren Übertragbarkeit auf Sicherheitssysteme	21
2.1	Internationale Vorfälle.....	23
2.1.1	Natürliche Ereignisse.....	23
2.1.2	Vorfälle aufgrund künstlicher EMP.....	25
2.2	Mögliche Auswirkungen von EMP auf kerntechnische Anlagen	29
2.2.1	Auswirkungen durch künstliche EMP	29
2.2.2	Auswirkungen von EMP.....	30
2.2.3	Auswirkungen durch Sonnenstürme/NEMP	35
3	Potenzielle Sicherungsanforderungen und -maßnahmen zu Angriffen mit EMP auf kerntechnische Anlagen und Einrichtungen .	41
3.1	Potenzieller Angreifer	41
3.2	Aufbau einer EM-Störquelle.....	45
3.3	Kategorisierung von Bauteilen von EM-Störquellen	47

3.4	Beispiele von EM-Störquellen	49
3.4.1	Primärenergiequelle	49
3.4.2	Hochspannungsquelle	50
3.4.3	Hochspannungsimpulsquelle	51
3.4.4	Hochfrequenzmodulator.....	56
3.4.5	Impulsformende Schaltung für Impulsabstrahlende Quellen	64
3.4.6	Antennensysteme	65
3.4.7	EMP-Störquelle	67
3.5	Erkennen von Angriffen mit EMP	82
3.6	Potenzielle Auswirkungen auf Sicherheitseinrichtungen	83
3.7	Möglichkeiten zum Schutz vor EMP.....	86
3.8	Schutzanforderungen und -maßnahmen für kerntechnische Anlagen und Einrichtungen.....	87
4	Nutzungsmöglichkeit von EMP im Bereich der Gefahrenabwehr von Angriffen mit autonomen Systemen auf kritische Infrastruktur..	89
4.1	Auswirkungen von EMP auf autonome Systeme	90
4.2	Nutzungsmöglichkeiten gegen autonome Flugsysteme	92
4.3	Nutzungsmöglichkeit gegen bodengebundene autonome Systeme	101
4.4	Nutzungsmöglichkeit gegen technische Hilfsmittel.....	103
5	Schnittstellen zu weiteren Eigenforschungen der GRS.....	105
6	Zusammenfassung	107
	Literaturverzeichnis.....	109
	Abbildungsverzeichnis.....	113
	Abkürzungsverzeichnis.....	116

1 Stand von Wissenschaft und Technik von elektromagnetischen Wellen bei der Nutzung als Hilfsmittel wie auch zur Abwehr möglicher Angriffe

In den 1940er Jahren wurden die grundlegenden Prinzipien, die dem EMP zugrunde liegen, durch die Erforschung von Kernwaffen verstanden. Während und nach dem Zweiten Weltkrieg wurden bei Atombombentests elektronische Störungen in den Testgebieten bemerkt. Im Laufe der Jahre wurde die Forschung in dem Gebiet intensiviert und das Verständnis für die Entstehung von EMP vertieft. Nach einem Kernwaffentest in der Atmosphäre (siehe Kap. 2.2.2) wurde das Phänomen auch in der Bevölkerung deutlich bekannter. Während des Kalten Krieges wurde der EMP zu einem wichtigen Aspekt der nuklearen Strategie. Mit einem starken EMP ließen sich feindliche elektronische Geräte in einem großen Gebiet stören oder zerstören. Durch die elektromagnetischen Wellen kommt es jedoch zu keiner physischen Zerstörung von Gebäuden und keinen direkten Opfern unter der Bevölkerung. Mit der Zeit wurde klar, dass ein EMP nicht nur eine militärische Bedrohung darstellt, sondern auch zivile Infrastrukturen gefährden kann.

Die fortschreitende Entwicklung von Werkzeugen zum Erzeugen von EMP, die nicht mit Hilfe einer nuklearen Detonation erzeugt werden können, führt im militärischen Bereich zu Waffensystemen mit stärkeren Impulsen, höherer Reichweite oder kleineren und kompakteren Geräten mit ausreichender Leistung, um elektronische Systeme kurzfristig zu stören oder zu zerstören. Militärische Entwicklungen führen meistens auch zu einem zivilen Interesse, sobald die Möglichkeit besteht, eine Technologie in eine zivile, friedliche Nutzung zu überführen oder diese kostengünstig für Einwirkungen missbrauchen oder für deren Abwehr nutzen zu können, insbesondere wenn sie mobil einsetzbar ist. Die Wirkung von EMP kann im kleinen Bereich für Störungen und Ausfälle sorgen, um zum Beispiel Server, Sicherheits- oder Sicherungssysteme außer Betrieb zu setzen und Schaden zu verursachen. Aber auch in der Abwehr von verschiedenen Einwirkungszenarien, z. B. von unterstellten elektrisch betriebenen Hilfsmitteln, konventionellen Fahrzeugen oder autonomen Systemen, ist der Einsatz von EMP möglich. Durch die immer stärker werdende Verbreitung von elektronischen Komponenten, Geräten oder Werkzeugen, welche für mögliche Einwirkungen auf kritische Infrastrukturen wie kerntechnische Anlagen und Einrichtungen genutzt werden können, bietet ein EMP das Potenzial, wirkungsvoll gegen solche Einwirkungen vorzugehen. Insbesondere gegen unbemannte, teilweise auch autonome, Flugsysteme, welche durch stetige Weiterentwicklung immer höhere Leistungsfähigkeit (Reichweite, Nutzlast,

selbstregulierende Systeme für einfachere Bedienung) erreichen, kann ein EMP eingesetzt werden. Die Nutzung von EMP kann somit sowohl ein Hilfsmittel für als auch eine Schutzmöglichkeit gegen mögliche Einwirkungen darstellen.

Die Entwicklung von Waffen und Systemen zur Erzeugung von EMP kann zu einem neuen Bedrohungspotenzial führen. In den sozialen Medien werden Anleitungen zum Bau kleiner Geräte bereitgestellt, mit denen sich schwache EMP erzeugen lassen. Damit wächst das Risiko vor einem Angriff mit EMP auf kritische Infrastrukturen wie Energienetze und Krankenhäuser ständig weiter. Die Geräte zur Erzeugung von EMP, insbesondere professionell oder industriell gefertigt, werden kleiner und leistungsfähiger. Dadurch steigt die Distanz des Einsatzortes zum Ziel, wodurch Angriffe kaum rechtzeitig erkannt werden können, und auch die Störung bzw. Zerstörung elektronischer Geräte durch den Impuls sowie die Anzahl der betroffenen Geräte oder Systeme nimmt zu.

Im Bereich autonomer Systeme gibt es durch stetige Weiterentwicklung immer leistungsfähigere Geräte mit steigender Reichweite und Nutzlast. Die Anzahl der Meldungen von nicht vorgesehenem Gebrauch steigt, z. B. durch Störung des Luftverkehrs in der Nähe von Flughäfen oder nicht genehmigte Überflüge von Kernkraftwerken. Durch die zunehmende Digitalisierung wird die Steuerung autonomer Systeme vereinfacht und einem immer größer werdenden Nutzerkreis zugänglich. Durch technische Verbesserungen können viele Objekte zum stabilen Fliegen gebracht werden. Auch nicht-aerodynamische Objekte lassen sich stabil durch die Luft fliegen. So hat das Wehrwissenschaftliche Institut für Schutztechnologien in Munster einen Umzugskarton mit vier Rotoren ausgestattet und als Drohne fliegen lassen. Die Steuerungseinheiten gleichen die Form des Fluggeräts aus. Damit ist die Nutzung dieser Systeme als Hilfsmittel für einen Angriff auf kerntechnische Anlagen nicht auszuschließen.

In diesem Eigenforschungsvorhaben werden die Möglichkeiten und die Gefahren von EMP erläutert und mögliche Schutzanforderungen kerntechnischer Anlagen gegen den Einsatz von EMP aufgezeigt. Weiterhin werden Möglichkeiten zur Abwehr von UAV mittels elektromagnetischer Wellen aufgezeigt. Ein eigenständiges Eigenforschungsvorhaben zur Detektion und Abwehr von UAV wurde zurückgestellt, daher wird in diesem Eigenforschungsvorhaben kurz auf weitere Abwehrmöglichkeiten von UAV außerhalb des elektromagnetischen Spektrums eingegangen.

1.1 Fachbegriffe

In diesem Kapitel werden Fachbegriffe, die in diesem Eigenforschungsvorhaben verwendet werden, kurz erläutert. Tab. 1.1 listet die Fachbegriffe alphabetisch auf und erläutert kurz deren Bedeutung.

Tab. 1.1 Fachbegriffe

Drehflügler bzw. Multicopter	Flugobjekt mit drehbaren Flügeln (Rotoren), deren Auftrieb durch Druckunterschiede an den Tragflächen und Umleiten der Luftströmung bei hoher Drehgeschwindigkeit der Rotoren erzeugt wird. Das Drehmoment der Rotoren wird durch den Einsatz weiterer, gegenläufig drehender Rotoren ausgeglichen, im Gegensatz zum Heckrotor, der das Drehmoment zum Hauptrotor bei den meisten Hubschraubern ausgleicht. Drehflügler können sich in jede Richtung bewegen und an einer Stelle in der Luft verharren. Meistens werden Drehflügler für Aufnahmen mit Kameras oder als Transportplattform genutzt.
EMI (Electromagnetic Interference)	Elektromagnetische Interferenz, Elektromagnetische Beeinflussung, Wechselwirkung elektrischer und elektronischer Systeme mit anderen Systemen und mit der elektromagnetischen Umgebung. Diese Einwirkung beinhaltet auch die Auswirkungen auf die Anlage durch zivilisatorisch verursachte elektromagnetische Felder sowie magnetische Störungen und Funkstörungen. Wichtige Beispiele sind solche Felder, die Radar-, Funk- oder Mobilfunksystemen sowie der Aktivierung von Hochspannungsschaltanlagen zuzuordnen sind.
EMP (electromagnetic pulse)	Elektromagnetischer Impuls, kurzzeitige, breitbandige elektromagnetische Strahlung, die elektrische Geräte je nach Leistung stören oder zerstören kann.
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit, Fähigkeit technischer Geräte, keine oder nur geringe elektromagnetische Störungen zu verursachen, die Einfluss auf andere elektrische Geräte in der Umgebung hätten.

GLONASS	Global Navigation Satellite System , Satellitengestütztes Navigationssystem der russischen Föderation vergleichbar mit GPS.
GPS	Eigentlich: NAVSTAR GPS: Nav igational S atellite T iming and R anging - G lobal P ositioning S ystem, Satellitengestütztes Navigationssystem des US-Verteidigungsministeriums.
HPEM (High-Power-Electro-Magnetics)	Energieintensive elektromagnetische Strahlungsfelder, Die Störgrößen übersteigen deutlich die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten und führen zu Störungen oder Beschädigungen an elektrischen und elektronischen Systemen.
HPM (High-Power-Microwaves)	Unterkategorie von HPEM, veraltete Bezeichnung für (gepulste) schmalbandige Signale
IEMI (Intentional Electromagnetic Interference)	Absichtliche elektromagnetische Beeinflussung, Begriff für die absichtliche Störung, Beschädigung oder Zerstörung elektrischer und elektronischer Systeme durch elektromagnetische Strahlung.
Kosmische Strahlung	Hochenergetische Teilchenstrahlung aus Protonen, Elektronen und ionisierten Atomen. Kosmische Strahlung wird von Sternen wie auch unserer Sonne erzeugt.
Kritische Infrastruktur	Organisationen und Einrichtungen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung Versorgungsengpässe oder erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit entstehen können: <ul style="list-style-type: none"> • Energieversorgung • Öl/Gas • Information/Kommunikation • (Trink-)Wasserversorgung • Ernährung • Bank-/Finanzwesen • Verkehrswesen • Notfall- und Rettungswesen • Regierung/öffentliche Verwaltung

LASER	<p>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</p> <p>Kohärente, quasi-monochromatische (nur eine Wellenlänge) und scharf gebündelte Strahlung im sichtbaren oder daran angrenzenden Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Energiereiche LASER haben eine starke thermische Wirkung, die hohe Schäden an Lebewesen wie auch an technischen Geräten anrichten kann.</p>
LEMP (light electromagnetic pulse)	<p>Blitz, natürlicher Entladungsvorgang in der Atmosphäre. Erzeugt ein elektromagnetisches Feld im Bereich des Blitzes und den Einschlagpunkt, sowie weiter entfernt in elektrischen Leitungen und Geräten.</p>
Mikrowellen	<p>Mikrowellen ist ein Trivialname für elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von 1 bis 300 GHz, was einer Wellenlänge von ca. 30 cm bis 1 mm entspricht. Mikrowellen entstehen wie Radiowellen durch Schwingungen von Elektronen in Metallen. Als leistungsstarke Quellen werden heute s. g. Klystrons oder Magnetrons verwendet. Die Anwendungen von Mikrowellen sind vielfältig; sie reichen vom Aufwärmen von Fertiggerichten über Mobilfunk bis zu Radar und Satellitenfernsehen.</p>
NEMP (nuclear electromagnetic pulse), auch HEMP (High-Altitude-EMP) genannt	<p>Nuklearer Elektromagnetischer Impuls, der durch die Zündung eines Nuklearsprengkopfes über der Erdatmosphäre (meistens 30 km über dem Erdboden) im Zusammenhang mit dem Erdmagnetfeld erzeugt wird. Hochenergiereiche Gammastrahlung erzeugt eine Wechselwirkung mit Molekülen der obersten Schichten in der Atmosphäre.</p> <p>Ähnliche Effekte treten auch bei Nuklearexplosionen auf dem Boden auf, jedoch sind deren Effekte räumlich begrenzt und werden durch die thermischen und mechanischen Effekte der Explosion überlagert.</p>
Sonnensturm	<p>Störung des Erdmagnetfelds nach einer Sonneneruption mit Masseauswurf elektrisch geladener Teilchen in Richtung Erde.</p>

Starrflügler	Flugobjekt mit Tragfläche (starre Flügel), deren Auftrieb durch Druckunterschiede an den Tragflächen und Umleiten der Luftströmung bei hoher Fluggeschwindigkeit an starren oder leicht schwenkbaren (Änderung des Winkels) Flügeln erzeugt wird. Starrflügler müssen sich in Bewegung befinden und sind daher mit hoher Geschwindigkeit unterwegs, wodurch sie schwerer zu orten und zu bekämpfen sind. Starrflügler können auch mit einem Propeller für den Antrieb ausgestattet sein. Meistens werden Starrflügler als bewaffnete Drohnen eingesetzt.
SEMP (switching electromagnetic pulse)	Schaltelektromagnetischer Impuls, wird ausgelöst durch Schaltvorgänge in Stromkreisen. Die plötzliche Änderung des Stromflusses kann einen EMP erzeugen.
UAS (Unmanned Aircraft System)	Gesamtes System, bestehend aus Drohne (siehe: UAV), deren Nutzlast und die Bodenstation. Ein UAS kann aus mehreren UAVs oder Bodenstationen bestehen.
UAV (Unmanned Aerial Vehicle)	Unbemanntes Luftfahrzeug, welches mittels Fernsteuerung gesteuert wird oder einen vorprogrammierten Kurs fliegt. Es muss zwischen Starrflüglern und Drehflüglern unterschieden werden. UAVs können mit Kameras, auch Infrarotkameras, zur Beobachtung oder je nach Größe auch mit verschiedenen Waffensystemen ausgestattet sein. Bewaffnete UAVs sind meistens im militärischen Bereich angesiedelt. Ebenso eignen sich UAVs als Transportplattform für verschiedene Ausrüstung oder kleine Waffen.

1.2 Grundlagen Elektromagnetismus

Elektrische Ladungen sind Quellen für elektrische Felder. Geladene Objekte üben elektrische Kräfte aufeinander aus. Es gibt positive wie auch negative elektrische Ladungen. Gleichgeladene Körper (beide negativ oder beide positiv elektrisch geladen) stoßen sich gegenseitig ab, ungleich geladene (eine negative und eine positive elektrische Ladung) ziehen sich an. Im Bereich des Magnetismus gibt es keine einzelnen magnetischen Ladungen (es existiert kein magnetisches Monopol). Magnetische Felder entstehen durch Ströme, also bewegte elektrische Ladungen. Die so entstehende elektromagnetische

Wechselwirkung stellt eine der vier Grundkräfte der Physik dar. Die Stabilität der Materie selbst erklärt sich überwiegend durch den Elektromagnetismus. In den Atomen umkreisen beispielsweise negativ geladene Elektronen den insgesamt positiv geladenen Atomkern, bestehend aus neutral geladenen Neutronen und positiv geladenen Protonen. Viele Eigenschaften von Materie wie Härte, Farbe, Glanz, Form oder Wärmeleitfähigkeit können über elektromagnetische Kräfte erklärt werden. In unserer Umwelt sind sämtliche messbare Energiestrahlung (außer Teilchenstrahlung) elektromagnetische Wellen, wie beispielsweise Radiowellen, Mobilfunkstrahlen, Mikrowellen, Wärmestrahlung, Licht und Röntgenstrahlung. Diese verschiedenen Strahlungen unterscheiden sich lediglich durch ihre unterschiedlichen Wellenlängen (vergleiche Abb. 1.1).

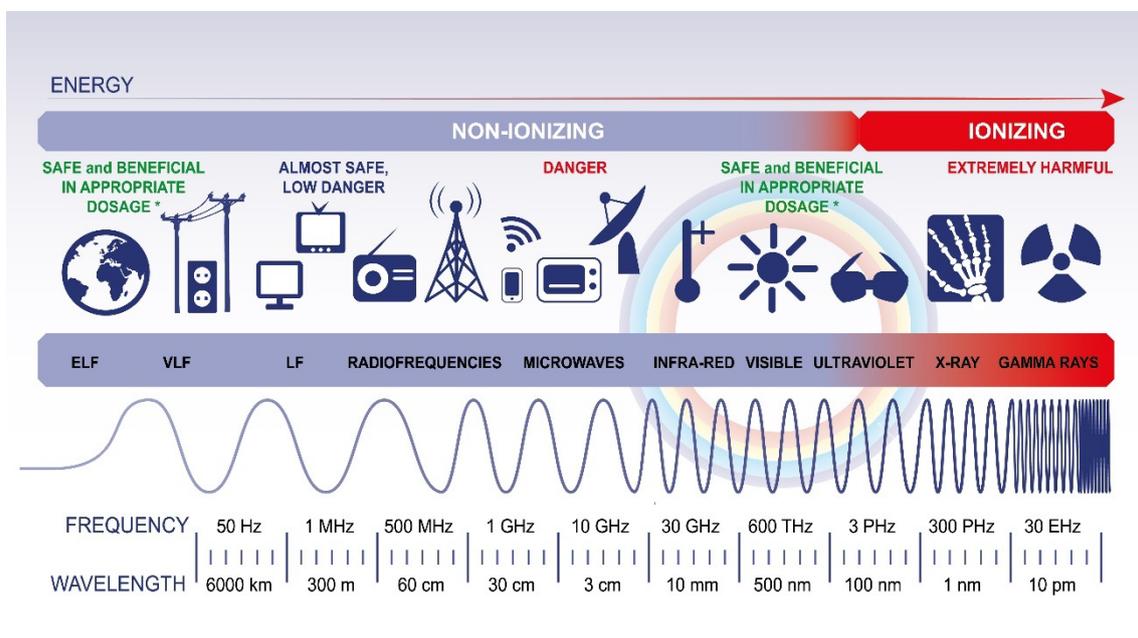


Abb. 1.1 Elektromagnetisches Spektrum, Quelle: Polina Kudelkina/Shutterstock.com

Ein elektromagnetischer Impuls, teilweise auch elektromagnetischer Puls genannt, ist eine kurzzeitige, breitbandige elektromagnetische Strahlung, die bei einem einmaligen, hochenergetischen Ausgleichsvorgang abgegeben wird. Ein solcher Ausgleichsvorgang tritt in einem physikalischen System auf, in dem ein stationärer Zustand durch einen Eingriff (beispielsweise Einschalten, Belastungsänderung, eine Störung im Prozess) verändert wird und in einen neuen stationären Zustand übergeht. Physikalische Ursache eines Ausgleichsvorgangs ist die in Bauteilen gespeicherte Energie oder Masse, die nicht sprunghaft geändert werden kann. Beispielsweise in der Elektrotechnik handelt es sich um elektrische Energie in Kapazitäten, magnetische Energie in Induktivitäten oder Rotationsenergie. Durch den Ausgleichsvorgang klingt ein energetisch hoch angeregtes

System unter Aussendung eines EMP in den Grundzustand ab. Durch die Wechselwirkung der niederfrequenten elektromagnetischen Strahlungsanteile mit freien Ladungsträgern in Metallen und Halbleitern werden dort starke, kurzzeitig schwankende Ströme induziert. In nicht oder unzureichend abgeschirmten elektrischen Geräten kann dies zu Fehlfunktionen bis hin zum Totalausfall oder sogar zur Zerstörung einzelner elektronischer Bauteile führen. Für technische Anwendungen wurde der Begriff meist auf das hier relevante Frequenzspektrum mit Wellenlängen zwischen 10 mm (entspricht etwa 300 GHz) und 10 km (entspricht ca. 30 kHz) beschränkt. Höhere Frequenzen entsprechen dem sichtbaren Licht über Röntgenstrahlung bis hin zur Gammastrahlung. Röntgenstrahlung und Gammastrahlung sowie Teilchenstrahlung werden als ionisierende Strahlung bezeichnet, deren Energie hoch genug ist, um einzelne Elektronen aus einem Atom oder aus einem Molekül zu lösen. Mit dem Herauslösen von negativ geladenen Elektronen verbleibt ein positiv geladenes Atom oder Molekül. Ionisierende Strahlung ist für die Anwendung als EMP nicht relevant und wird daher nur kurz betrachtet.

1.3 Auswirkungen unterschiedlicher Wellenlängen auf Menschen und Elektronik

Das elektromagnetische Spektrum umfasst einen großen Frequenzbereich mit unterschiedlichen Wirkungen auf Natur und Technik. Auch das für den Menschen sichtbare Licht gehört zum elektromagnetischen Spektrum und kann beispielsweise in Form von LASER bei der Wechselwirkung mit Materie einen EMP auslösen. Die Auswirkung elektromagnetischer Strahlung ist abhängig von der Frequenz. Zunächst muss unterschieden werden zwischen nicht-ionisierender und ionisierender Strahlung.

1.3.1 Ionisierende und nicht-ionisierende Strahlung

Nicht-ionisierende Strahlung hat hauptsächlich thermische Auswirkungen auf den menschlichen Körper. Die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung ist dabei nur für die Tiefe der Wirkung von Bedeutung. Hohe Frequenzen können den Körper schlecht durchdringen, die Wärmewirkung findet hauptsächlich an der Oberfläche statt. Niedrige Frequenzen haben zwar eine schlechtere Wärmewirkung, jedoch dringt die Strahlung tiefer in den Körper ein, wobei das Körperinnere erwärmt werden kann. Da im inneren des Körpers keine Wärmerezeptoren vorhanden sind, ist die Erwärmung kaum spürbar und damit gefährlich, da das Gewebe im Körperinneren überhitzen kann. Eine

Schädigung des inneren Gewebes ist dadurch möglich. Am empfänglichsten ist der menschliche Körper für Strahlung im Bereich von 30 MHz bis 300 MHz (vergl. /EMF 14/).

Ionisierende Strahlung führt zur Ionisation, dem Herauslösen einzelner Elektronen aus der Atomhülle. Es entsteht ein ionisiertes Wassermolekül H_2O^+ sowie ein freies Elektron e^- . Das ionisierte Wassermolekül gibt ein Proton an ein benachbartes Wassermolekül ab. Es entsteht ein hoch reaktives Hydroxyl-Radikal sowie ein Hydronium-Ion OH° und H_3O^+ . Insbesondere das Hydroxyl-Radikal kann Schäden im Organismus anrichten. Folge sind Zellschäden bis hin zu Krebserkrankungen. In mikroelektronischen Schaltungen (Chips) können durch ionisierende Strahlung Bitfehler im Speicher erzeugt werden. Solche Fehler können zu Systemausfällen führen, wenn die gespeicherte Software nicht richtig funktioniert. Diese Fehler sind allerdings reversibel, können also korrigiert werden. Für die Erzeugung von EMP und eine damit verbundene Zerstörung von Elektronik spielt ionisierende Strahlung nur eine untergeordnete Rolle.

1.3.2 Strahlung niedriger Frequenz

Bei niederfrequenten Feldern (bis ca. 1 kHz) wird die Wirkung der Strahlung getrennt betrachtet, da das elektrische und das magnetische Feld jeweils eine unterschiedliche Wirkung auf den Menschen bzw. auf organisches Gewebe haben. Ein niederfrequentes Magnetfeld erzeugt im menschlichen Körper elektrische Felder und Ströme, die in Wechselwirkung mit den körpereigenen elektrischen Feldern und Strömen (beispielsweise in Nerven) treten. Ein niederfrequentes elektrisches Feld beeinflusst die elektrische Ladung auf der Körperoberfläche. Diese kann durch das Aufrichten von Haaren auf der Oberfläche der Haut spürbar sein. Die Wirkung im Inneren des menschlichen Körpers ist deutlich schwächer als an der Oberfläche. Eine Erregung von Nerven und Muskeln kann bei niedrigen Stromdichten ausgeschlossen werden. Ein niederfrequentes magnetisches Feld dringt dagegen fast ungehindert in den Körper ein. Dort können magnetisch induzierte elektrische Felder und Körperströme entstehen. Je nach Stärke des Magnetfeldes kann es zu wahrnehmbaren Reizungen von Nerven und Muskelzellen kommen. Die Wirkung der Felder auf den menschlichen Körper bzw. auf organisches Gewebe hängt von der Stärke der Flussdichte beim magnetischen Feld und von der Feldstärke des elektrischen Feldes ab. Weitere Einflussfaktoren sind die Frequenz der Felder sowie der Abstand zur Quelle. Der Grenzwert für Stromdichten liegt bei ca. 100 mA/m². Ab dieser Feldstärke kann es zu gesundheitlichen Auswirkungen durch Nerven- oder Muskelreizungen kommen. Die natürlichen körpereigenen Felder besitzen eine Stromdichte

von ca. 10 mA/m^2 , die lokal im Gehirn und im Herzmuskel höher sind. Bei niederfrequenten Wechselfeldern bezeichnet der Grenzwert den Schwellenwert für induzierte elektrische Felder im menschlichen Körper, ab dem Körperströme mit belästigender, beeinträchtigender oder gefährlicher Stärke entstehen. In Abb. 1.2 sind beispielhaft die magnetischen und elektrischen Grenzwerte bei einer Frequenz von 50 Hz angegeben, sowie die Auswirkungen bei deutlich höherer Flussdichte, bzw. Feldstärke. Die in der Abbildung genannten Phosphene sind Wahrnehmungsstörungen, die durch die magnetische oder elektrische Strahlung bei Reizung des Sehnervs entstehen können. Diese Phänomene sind im Allgemeinen reversibel und nicht gefährlich (vergl. /QUA 19/).

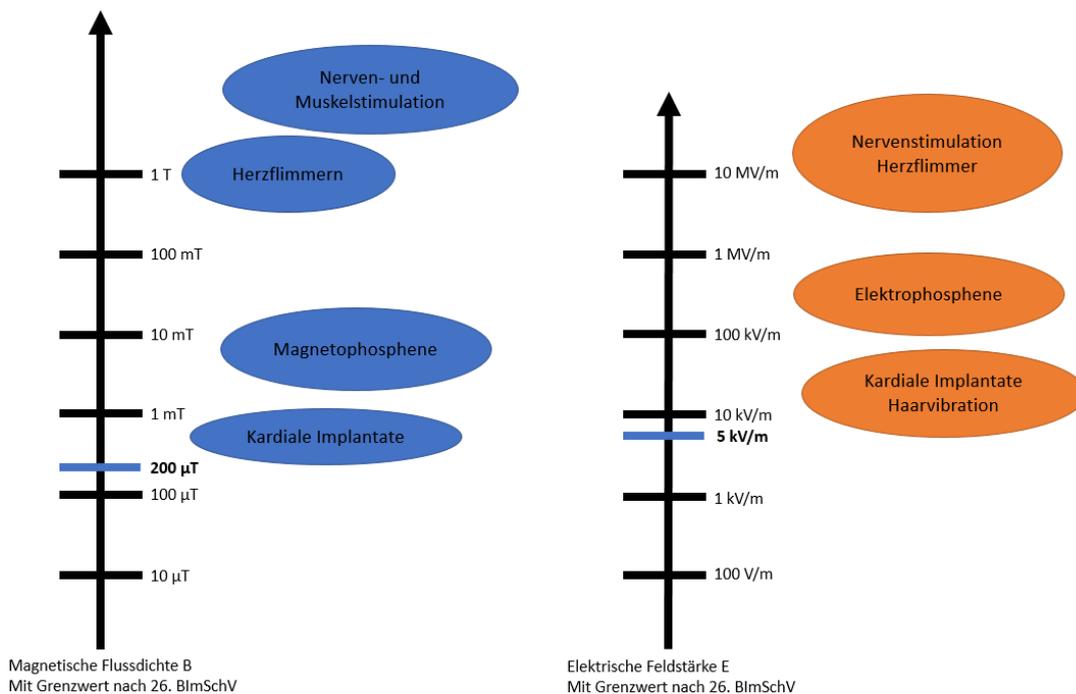


Abb. 1.2 Grenzwerte magnetischer Flussdichte und elektrischer Feldstärke bei einer Frequenz von 50 Hz für die Allgemeinbevölkerung

Bei elektronischen Geräten können hohe Spannungen induziert werden, die zu kurzzeitigen Ausfällen oder sogar zur Zerstörung von Bauteilen führen können.

1.3.3 Strahlung mittlerer Frequenz

Frequenzen zwischen 1 kHz und 10 MHz sind mittlere Frequenzen. In diesem Bereich wird das elektromagnetische Feld zusammenhängend mit zwei Komponenten (elektrisch und magnetisch) betrachtet. Im mittleren Frequenzbereich liegt eine Kombination aus Reizwirkung und Wärmewirkung vor, die mit zunehmender Frequenz in Richtung Wärme

geht. Induzierte elektrische Ströme und Felder im menschlichen Gewebe nehmen mit steigender Frequenz ab. Die Wirkungen der elektromagnetischen Felder mittlerer Frequenzen auf den menschlichen Körper sind weniger stark erforscht als Nieder- und Hochfrequenzfelder.

1.3.4 Strahlung hoher Frequenz

Strahlung mit einer Frequenz zwischen 10 MHz und 300 GHz gilt als Hochfrequenzstrahlung. In diesem Frequenzspektrum steht die Wärmewirkung auf den menschlichen Körper im Vordergrund. Die Wärme entsteht durch periodische Anregung von Dipol-Molekülen und freien Ladungsträgern. Die elektromagnetische Strahlung wirkt eine Kraft auf diese Dipol-Moleküle und freien Ladungsträger aus. Dadurch werden die Moleküle in Bewegung versetzt und erwärmen sich. Je höher die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung ist, desto stärker wird diese an der Körperoberfläche absorbiert. Die Eindringtiefe nimmt ab. Die Eindringtiefe ist jedoch auch von der Stärke des Feldes sowie vom Körper selbst abhängig (vergleiche Abb. 1.3). Da Wassermoleküle besonders stark erwärmt werden, werden Körper bzw. wird Gewebe mit einem hohen Wasseranteil ebenfalls stärker erwärmt. Auch der Salzgehalt im Gewebe hat Auswirkungen auf die Absorption der Strahlung. Die Absorption ist umgekehrt-proportional zur Eindringtiefe. Wird mehr Energie absorbiert und in Wärme umgewandelt, sinkt die Eindringtiefe. Elektromagnetische Strahlung hat im menschlichen Körper eine höhere Eindringtiefe in Knochengewebe und Fett, im Gehirn, den Nieren und Muskeln dagegen wird aufgrund des höheren Wassergehalts mehr Energie absorbiert und in Wärme umgewandelt.

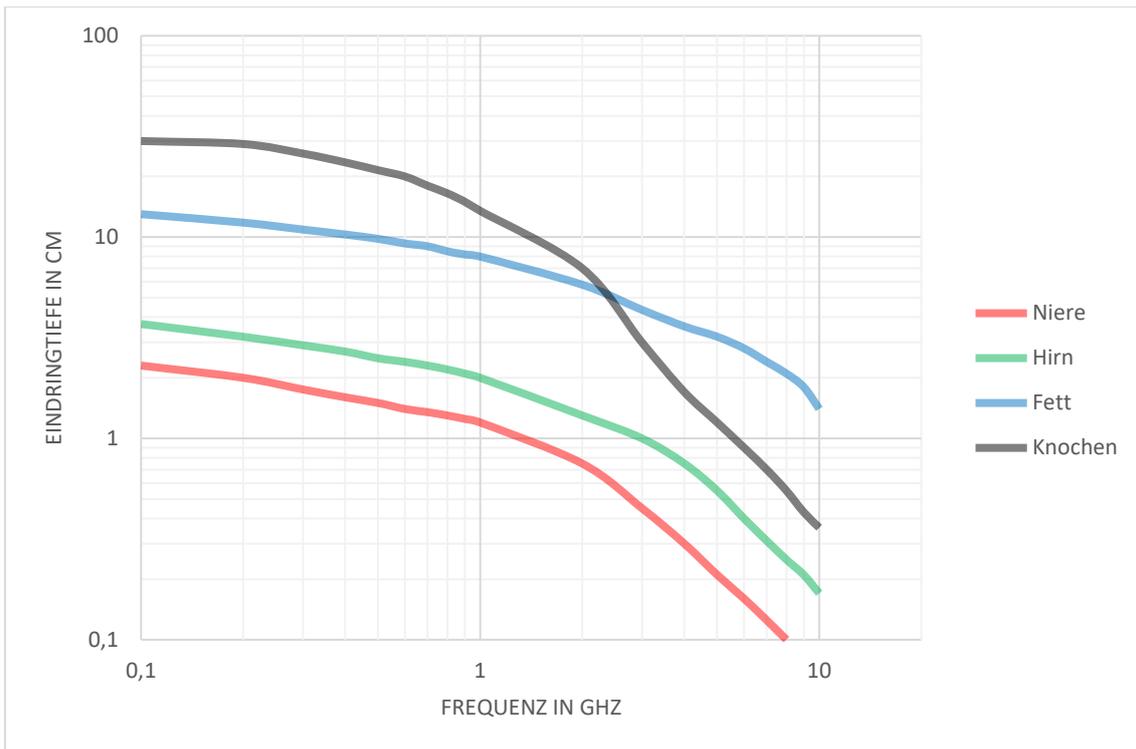


Abb. 1.3 Eindringtiefe in Abhängigkeit der Frequenz (nach /EMF 16/)

Dadurch entstehen im Körper Bereiche, die stärker erwärmt werden als andere. Die Eindringtiefe in Muskelgewebe liegt im unteren Bereich der Hochfrequenzstrahlung (0,5 – 2,5 GHz) bei ca. 1,5 – 0,5 cm und im Bereich von über 10 GHz nur noch bei ca. 0,2 mm oder weniger. Die Abb. 1.3 zeigt die frequenzabhängige Eindringtiefe für verschiedene Teile des menschlichen Körpers nach /EMF 16/.

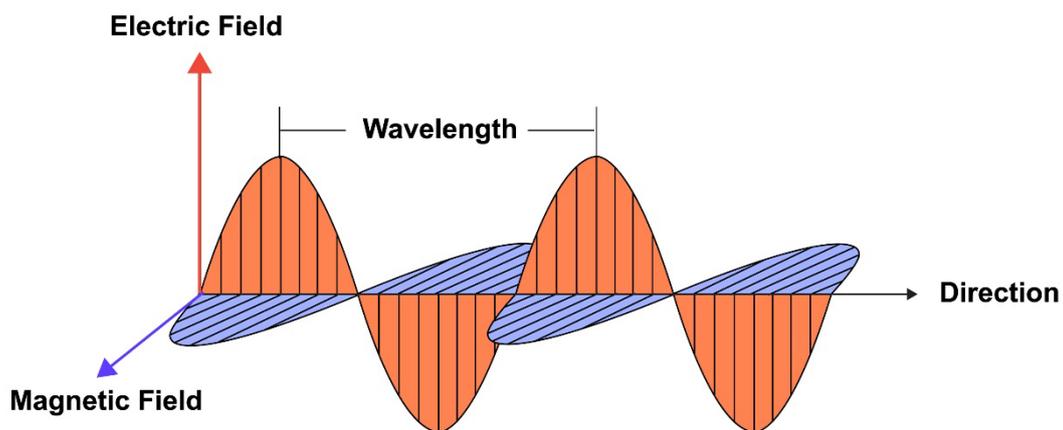
Strahlung im mittleren Bereich der Hochfrequenzstrahlung stellt die gefährliche Strahlung für elektronische Geräte dar. Insbesondere im Frequenzspektrum zwischen 100 MHz und 1 GHz sind elektronische Geräte besonders empfindlich. Auch der Frequenzbereich und die Anstiegszeit des EMP spielt eine Rolle. Je breiter das Frequenzspektrum und je kürzer die Anstiegszeit des EMP ist, desto größer ist die Gefahr.

1.3.5 Strahlung höherer Frequenzen

Elektromagnetische Strahlung über 300 GHz ist im Bereich des sichtbaren Lichtes bzw. bei deutlich höheren Frequenzen im Bereich der Röntgenstrahlung und der Gammastrahlung. Diese Frequenzen werden in dieser Studie nicht weiter betrachtet. Das relevante Frequenzspektrum von EMP liegt bei 30 kHz bis 300 GHz.

1.4 Wiederholbare Erzeugung von schwachen EMP

Der klassische Elektromagnetismus wird als Verknüpfung von Ladungen und Strom mit Feldern beschrieben. Ein veränderliches elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Feld. Ein veränderliches magnetisches Feld erzeugt ebenso ein elektrisches Feld. Elektromagnetische Wellen bestehen aus gekoppelten orts- und zeitabhängigen elektrischen sowie magnetischen Feldern (vergleiche Abb. 1.4). Dieser physikalische Zusammenhang wird mit den Maxwell-Gleichungen beschrieben.



Electromagnetic Wave

Abb. 1.4 Elektromagnetische Welle, Quelle: Kicky_princess/Shutterstock.com

Abb. 1.5 zeigt den Aufbau eines Transformators, in dem durch ein veränderliches elektrisches Feld, beispielsweise Wechselstrom, in der Messschleife ein Strom, proportional zu den Windungen der Messschleife, induziert wird. Im Gegensatz zur elektromagnetischen Induktion werden durch schnell veränderliche elektrische Flüsse magnetische Wirbelfelder erzeugt, die elektromagnetische Raumwellen ermöglichen.

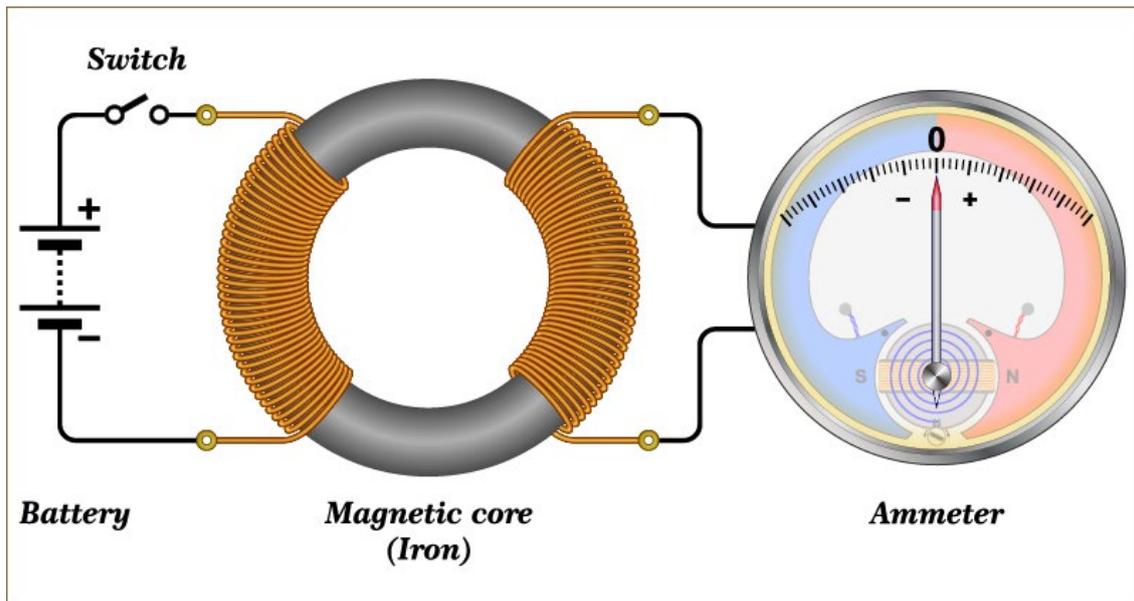


Abb. 1.5 Aufbau eines Transformators, Quelle: Fouad A. Saad/Shutterstock.com

Der elektromagnetische Impuls ist eine kurzzeitige elektromagnetische Welle, die bei einem einmaligen, hochenergetischen Vorgang erzeugt wird. In der Natur kommen solche elektrostatischen Aufladungsprozesse beispielsweise in Blitzen oder nach starken Sonnenstürmen vor, können aber auch in speziellen elektrischen Schaltungen entstehen. Durch die Wechselwirkung der elektromagnetischen Strahlung in Metallen und Halbleitern werden dort Ströme induziert, die deutlich über den normalen Bedingungen liegen können. Dies kann zu kurzfristigen Ausfällen bis hin zur Zerstörung elektrischer oder elektronischer Systeme führen.

Im kleinen Rahmen gibt es immer mehr Möglichkeiten, um EMP als Hilfsmittel einzusetzen und Geräte in der Nähe auszuschalten, zu stören oder zu zerstören. Dies geht bis hin zu Anleitungsvideos auf diversen sozialen Plattformen zum Bau solcher kleinen Geräte. Diese haben nur eine sehr geringe Leistung und Reichweite, jedoch kann dies mit geeigneten Mitteln leicht verstärkt werden. Die einfachste Variante eines EMP-Generators lässt sich aus einem kleinen Eisenstab herstellen, umwickelt mit einem Kupferdraht. An diesen Draht wird ein Kondensator, z. B. aus einer Wegwerfkamera für die Erzeugung des Blitzes, angeschlossen. Durch den entstehenden Kurzschluss wird der Kondensator entladen und erzeugt einen schwachen EMP, der auf die Entfernung von wenigen Zentimetern einfache elektronische Geräte stören kann. Der Bau solcher kleinen EMP-Generatoren lässt sich kostengünstig mit Haushaltsgegenständen umsetzen, oder mit dem entsprechenden Wissen auch professionell durchführen. Die Komponenten sind in den meisten Elektronikmärkten verfügbar. Mit ein wenig Geschick lassen sich

mit den einfachen Komponenten auch stärkere EMP-Generatoren zusammenbauen, deren Wirkung entsprechend stärker ist.

Weitere EMP können mit Hilfe von Magnetrons erzeugt werden. Als Magnetrons werden die Erzeuger von Mikrowellenstrahlung bezeichnet, welche in jeder handelsüblichen Mikrowelle verbaut sind (vergleiche Abb. 1.6). Das Frequenzspektrum reicht von 0,3 GHz bis ca. 300 GHz. Magnetrons in Mikrowellen erzeugen eine Frequenz von 2,455 GHz, obwohl die Resonanzfrequenz von Wasser ca. zehnmal größer ist. Elektromagnetische Strahlung dieser Frequenz unterliegt jedoch der staatlichen Regulierung und hat eine geringere Eindringtiefe in Nahrungsmitteln.



Abb. 1.6 Ausbau eines Magnetrons aus einer Mikrowelle, Quelle: Kalabi Yau/Shutterstock.com

Magnetrons sind Vakuumröhren, mit denen hochfrequente elektromagnetische Schwingungen erzeugt werden können. Magnetrons bestehen aus einer Glühkathode (negativ geladen) innerhalb eines Hohlraums und einer die Kathode umgebenden Anode (positiv geladen), in die Hohlräume (Resonatoren) eingelassen sind (Abb. 1.7). Auf das Bauteil wirkt zusätzlich ein Magnetfeld. An der Glühkathode werden Elektronen frei und werden in Richtung zur Anode radial beschleunigt. Durch das Magnetfeld werden die Elektronen in eine Kreisbahn um die Kathode gelenkt. Die Resonatoren wirken durch deren

Bauweise als kleine Schwingkreise, bestehend aus einem Kondensator (Öffnungsschlitz auf der Seite der Kathode) und einer Spule mit einer Windung (Zylindrische Form). Die auf einer Kreisbahn um die Kathode fliegenden Elektronen passieren an jedem Resonator die Öffnung (den Kondensator) und regen das System zu einer Schwingung an.



Abb. 1.7 Prinzipieller Aufbau eines Magnetrons

Ein schwingender Resonator regt den benachbarten Resonator ebenfalls zum Schwingen an, jedoch mit umgekehrter Polarisierung, also um 180° verzögert. Diese Anregung setzt sich weiter fort und erzeugt eine umlaufende elektromagnetische Welle. Durch die Anregung der Resonatoren und der Vielzahl der Elektronen, werden manche beschleunigt, andere gebremst. Es entstehen Gruppen von Elektronen, die beim Auftreffen auf die Anode Energie abgeben. Ein Teil dieser Energie wird über eine Art Antenne nach außen geführt.

Mikrowellen sind mit einer Abschirmung gebaut, so dass der Mensch beim Betrieb vor der elektromagnetischen Strahlung geschützt wird. Wird der Magnetron jedoch ausgebaut und außerhalb der Abschirmung betrieben, gelangt die elektromagnetische Strahlung in die Umwelt. Mit ein wenig Geschick lassen sich Magnetrons so zusammenbauen, dass deren elektromagnetische Strahlung gebündelt wird und somit in einer größeren Entfernung Schaden anrichten kann. Im großen Maßstab können diese modifizierten Mikrowellenstrahler als Hilfsmittel für Einwirkungen eingesetzt werden, um Elektronik zu stören oder zu zerstören. In einem solchen Fall ist auch von einer erheblichen Gefährdung für den Menschen auszugehen (Beispiel: Havana Syndrom, siehe Kapitel 2).

Stärkere elektromagnetische Wellen oder auch Impulse werden mit Hilfe eines sogenannten Klystrons erzeugt. Klystrons sind Elektronenröhren, in denen Elektronen in

einem Hohlraumresonator durch ein hochfrequentes elektrisches Wechselfeld in der Geschwindigkeit moduliert werden. Die Geschwindigkeitsmodulation bewirkt, ähnlich wie im Magnetron, eine Ansammlung von Elektronen in Gruppen, eine Dichtemodulation. Es können ein oder mehrere Hohlraumresonatoren hintereinandergeschaltet werden. Am letzten Resonator geben die Elektronengruppen einen Teil der Energie als Hochfrequenzenergie ab. Klystrons gibt es in verschiedenen Größen je nach Einsatzgebiet. Klystrons werden in Lasertreibern und Teilchenbeschleunigern sowie auch in elektromagnetischen Impulsgeneratoren eingesetzt. Die Leistung im Impulsbetrieb kann 30 bis 100 Megawatt erreichen.

1.5 Erzeugung einmalig starker EMP

Die stärksten EMP entstehen bei Sonnenstürmen auf natürlichem Weg. Die Auswirkungen dieser natürlichen EMP werden in nachfolgenden Kapiteln weiter behandelt. Hier werden die künstlich erzeugten EMP weiter betrachtet. Die stärksten künstlich erzeugten EMP entstehen bei der Detonation von Kernwaffen in der Atmosphäre. Die bei der Detonation entstehenden hochenergetischen Gammastrahlen ionisieren an der oberen Atmosphäre: durch die hohe Energie der Strahlung werden Elektronen aus den Molekülen der oberen Schichten gelöst. Die Bewegungsrichtung wird größtenteils beibehalten. Auf dem Weg zu dichteren Atmosphärenschichten werden dabei von den gelösten Elektronen weitere Ionisierungen erzeugt, bzw. weitere Elektronen gelöst. Die negativ geladenen herausgelösten Elektronen und die positiv geladenen Ionen der Atmosphäre bilden einen elektrischen Dipol. Gleichzeitig wirkt das Erdmagnetfeld auf die bewegten Teilchen und es entsteht ein magnetischer Dipol. Durch die sich schnell verändernden Dipole entsteht ein breitbandiges Wellenfeld, welches den eigentlichen EMP ergibt. Die dabei entstehenden elektromagnetischen Wellen, die sich aufgrund der Höhe der Detonation sehr weit ausbreiten können, sind besonders stark und können großflächig elektronische und elektrische Geräte beeinflussen. NEMP stellen zwar die stärksten EMP und damit die größte Gefahr dar, jedoch wird der Besitz und die Möglichkeit des Transports einer Kernwaffe in den oberen Bereich der Atmosphäre im Rahmen dieser Studie nicht unterstellt und daher nicht weiter betrachtet. Lediglich die Auswirkungen zeigen die Schäden auf, die durch starke EMP entstehen können. Entsprechend starke Impulse können lokal stark beschränkt erzeugt werden, mit deutlich geringerer Energie und entsprechend niedrigerer Reichweite. Die Auswirkungen können dabei vergleichbar sein, je nach Entfernung von der Quelle zum Ziel.

Zur Erzeugung starker EMP muss eine hohe Energie in sehr kurzer Zeit bereitgestellt und umgewandelt werden. Bei der Erzeugung eines EMP mittels Entladung von Kondensatoren wird eine große Anzahl an Kondensatoren benötigt, um einen entsprechend hohen EMP erzeugen zu können. Dabei müssen die Kondensatoren gleichzeitig entladen werden, was eine große Herausforderung darstellt, insbesondere aufgrund der großen Anzahl, die benötigt wird. Unterschiedlich lange elektrische Leitungen zu den einzelnen Kondensatoren können hier bereits zu ausreichend großen Verzögerungen (Nanosekunden) führen, um die Dauer des EMP zu verlängern und gleichzeitig die Stärke erheblich zu reduzieren. Hohe EMP werden daher häufig mit dem sogenannten Galfenol, einem mit Gallium dotierten Eisenstab, oder Terfenol, einer Legierung aus Eisen, Terbium und Dysprosium, erzielt. Galfenol und Terfenol sind magnetoelastische Materialien, welche unter mechanischem Druck ihre magnetischen Eigenschaften verändern. Damit ist eine Umwandlung von mechanischer in magnetische Energie und umgekehrt möglich. In einem sogenannten Flusskompressionsgenerator wird durch eine nahe Explosion von Sprengstoff das Material besonders schnell und stark verformt. Dies führt zu einem sehr hohen EMP, ist jedoch nicht wiederholbar, da das Werkstück durch die Explosion zerstört wird. Wiederholbare EMP werden durch die Verformung des Materials mit einem neuartigen pneumatischen System erzeugt, welches das Werkstück mittels hoher Drücke verformt. Mit dieser Methode lassen sich mehrere Impulse erzeugen, jedoch sind diese schwächer als bei der Verformung mit Sprengstoff. Bei dieser Methode ist die Haltbarkeit des Werkstücks durch die mechanische Beanspruchung dennoch beschränkt.

Im militärischen Bereich wird häufig ein Vircator eingesetzt, der mit Hilfe eines Marx-Generators gespeist wird. Der Marx-Generator liefert einen Hochspannungspuls. Dieser wird im Vircator zu einer elektromagnetischen Welle umgewandelt und über eine Antenne als intensive Wellenfront abgestrahlt. Die Reichweite eines solchen Geräts wird mit einigen 100 m bis wenige km angegeben. Der Vircator wird häufig beim Einsatz als Waffensystem aufgrund der hohen Belastung zerstört. Leistungen von einigen 100 kW bis zu 40 GW sind möglich. Die Frequenz liegt dabei geometrieabhängig bei 1 – 10 GHz.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von EMP ist die Speisung eines Magnetrons oder eines Klystrons mit einem Impulsgenerator. Dadurch lässt sich die Leistung steigern und es lassen sich deutlich stärkere EMP erzeugen.

1.6 Bündelung von Wellen

Wellen breiten sich grundsätzlich in alle Raumrichtungen gleichzeitig aus. Entsprechend sinkt die Leistung mit steigendem Abstand erheblich. Um die Verluste gering zu halten, können elektromagnetische Strahlen teilweise gebündelt werden. Im Bereich des sichtbaren Lichtes funktioniert dies beispielsweise durch eine Linse (siehe Abb. 1.8 linke und mittlere Darstellung) oder durch eine Anordnung von Spiegeln (Abb. 1.8, Darstellung rechts), welche das Licht in eine Richtung reflektieren.

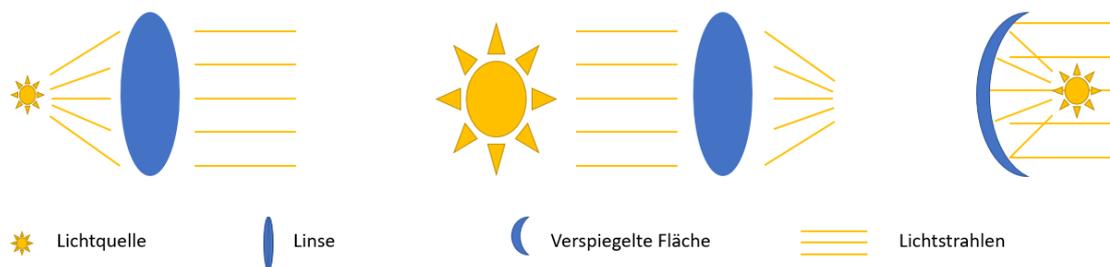


Abb. 1.8 Bündelung von sichtbarem Licht

Je nach Wellenlänge und damit Energie der elektromagnetischen Strahlung ist die Bündelung schwieriger als für das sichtbare Licht. Die Bündelung an einer Linse basiert auf der unterschiedlichen Geschwindigkeit von Licht in den Medien Luft und Glas. Elektromagnetische Strahlung höherer Wellenlängen gelangt jedoch ungebrems durch Glas hindurch. Für energiereichere Strahlung muss auf andere Materialien für Linsen zur Bündelung zurückgegriffen werden. Für Röntgenstrahlung werden beispielsweise Linsen aus Beryllium oder Kohlenstoff verwendet, für Gammastrahlung Linsen aus Silizium oder Gold /MPG 12/. Für Mikrowellenstrahlung hat sich Aluminium als Linsenmaterial etabliert. Für die Bündelung der elektromagnetischen Strahlung eines EMP hat sich jedoch die Verwendung von Linsen bisher nicht etabliert. Aufgrund der Baugröße eines EMP-Generators und der damit verbundenen Größe der Linse sind die Kosten gegenüber dem Nutzen zu hoch. Aufgrund der meistens breitbandigen Strahlung reicht zudem eine Linse kaum aus, da nur bestimmte Wellenlängen gebündelt würden.

Eine weitere Variante der Bündelung ist das sogenannte Beamforming /COM 22/. Dieses Verfahren wird für die Übertragung von Daten im 5G-Netz genutzt. Die Reichweite ist bei gleicher Leistung geringer als die Reichweite des 4G-Netzes. Dies erfordert zur Reduzierung der Strahlenbelastung mehr Sendemasten. Um nicht kontinuierlich Strahlung abzugeben, wird diese nur bei Bedarf und in die erforderliche Richtung abgegeben. Dazu wird das Beamforming angewendet. Um die Strahlung zu „formen“, senden

nebeneinanderliegende Antennen zeitlich versetzte Signale. In Folge kommt es zu Interferenzen der Wellen. In der gewünschten Richtung wirken die sich überlagernden Wellen konstruktiv, also verstärken sich. Außerhalb wirkt die Interferenz destruktiv, das Signal wird deutlich schwächer oder ist kaum noch vorhanden. Dies erfordert im Bereich der für EMP verwendeten Frequenzen eine sehr hohe Synchronisierung und zeitliche Abstimmung. Für unterschiedliche Wellenlängen ist dieses Verfahren nicht geeignet. An Orten, an denen sich bestimmte Frequenzen konstruktiv überlagern, können andere Frequenzen destruktiv sein. Beamforming eignet sich nur für sehr schmalbandige EMP. Daher hat sich auch dieses Verfahren für EMP nicht durchgesetzt.

2 Nationale und internationale Vorfälle mit Verwendung von EMP und deren Übertragbarkeit auf Sicherungssysteme

In diesem Kapitel werden nationale und internationale Vorfälle untersucht, die zumindest unter dem Verdacht der Verwendung von elektromagnetischer Strahlung stehen und Schäden an Menschen oder Infrastruktur erzeugt haben.

Angriffe mit EMP zielen zumeist auf Infrastruktur ab, jedoch kann die Verwendung elektromagnetischer Strahlung auch zu körperlichen Schäden führen. Mehrere Medien berichteten im August 2021 von möglichen Fällen des sogenannten Havanna Syndroms bei Mitarbeitern der US-Botschaft in Berlin (/NTV 21/, /SPI 21/, /WEL 21/). Die Symptome des Havanna Syndroms traten erstmals 2016 bei Mitarbeitern der US-Botschaft in Havanna auf. Mitarbeiter klagten über Kopfschmerzen, Schwindel, Müdigkeit, Ohrenschmerzen, Schlaflosigkeit und Trägheit. Vermutet wurde ein Angriff mit Mikrowellenstrahlung, jedoch konnte dies bisher nicht nachgewiesen werden. Ähnliche Fälle gab es auch aus China, Australien, Russland und Österreich, und betraf stets US-Mitarbeiter in Botschaften und von Geheimdiensten oder deren Familien. Dauerhafte Mikrowellenstrahlung fällt zwar in das elektromagnetische Spektrum, jedoch ist in diesem Fall kein starker Impuls, sondern vermutlich kontinuierliche schwache Bestrahlung eingesetzt worden. Dennoch zeigt dieses Beispiel die möglichen Auswirkungen elektromagnetischer Strahlung auf den menschlichen Körper.

Nationale Vorfälle

Über Angriffe mit Verwendung eines EMP auf Infrastruktur oder Unternehmen innerhalb Deutschlands gibt es keine Informationen. Auch dem Bundeskriminalamt liegen auf Anfrage (Stand: 26.10.2022) keine Erkenntnisse zu etwaigen Vorfällen vor, bei denen EMP gezielt gegen (kritische) Infrastruktur eingesetzt wurde.

Elektromagnetische Störsender, die keinen EMP darstellen, senden vergleichbare elektromagnetische Strahlung niedrigerer Energie über einen längeren Zeitraum aus. Berichte über die Verwendung solcher Störsender, um beispielsweise die Zentralverriegelung von teuren Automobilen zu umgehen, liegen vor. Beispielsweise wurden solche Störsender 2011 in München durch zwei Täter auf Parkplätzen verwendet. Bei Fahrzeugen wurde der Störsender in dem Moment aktiviert, als die Autofahrer ihre Fahrzeuge mit Funkschlüsseln versperren wollten. Das Funksignal des Autoschlüssels wurde durch die elektromagnetische Strahlung gestört und nicht korrekt übertragen. Das Fahrzeug wurde nicht durch das Signal des Autoschlüssels verschlossen und blieb unbeaufsichtigt auf dem Parkplatz zurück. Die Täter konnten dadurch in die nicht verschlossenen Fahrzeuge eindringen und auf diese Weise Beute wie Laptops, Videokameras, Navigationsgeräte, Kreditkarten und Bargeld erlangen /MER 12/.

Im Zuge einer bundesweiten Razzia gegen Reichsbürger und Rechtsextremisten am Morgen des 07.12.2022 (mehrere Medien berichteten, darunter Tagesschau) kam es unter dem Einsatz von 3000 Polizisten zur Durchsuchung von mehr als 130 Häusern, Wohnungen und Büros in ganz Deutschland. Eine Gruppierung, bestehend aus ehemaligen Polizisten und Soldaten, einer Richterin aus Berlin, einer ehemaligen Bundestagsabgeordneten der AfD sowie weiteren Personen, plante demnach, angeführt von einem Mitglied des deutschen Adelsgeschlechts, einen bewaffneten Umsturz der Regierung. Im Zuge dieses geplanten Umsturzes sollten laut /ZEI 22/ mithilfe von EMP großflächig Stromausfälle erzeugt werden, um die Bevölkerung in einen bürgerkriegsähnlichen Zustand zu bringen. Dieser geplante Angriff wurde durch die Behörden im Vorfeld vereitelt. Inwieweit ein solcher EMP-Angriff auf kritische Infrastrukturen zum Erfolg geführt hätte, und welche Konsequenzen entstanden wären, lässt sich nicht ermitteln, da weder Informationen zu den geplanten Mitteln zur Erzeugung und zur Stärke des EMP noch Informationen, welche Infrastruktur angegriffen werden sollte, vorliegen. Andere Medien berichteten anstatt des Einsatzes von EMP über die Sabotage von Strommasten /WEL 23a/. Eine Bestätigung seitens des Bundeskriminalamtes zu den Berichten liegt nicht vor.

2.1 Internationale Vorfälle

2.1.1 Natürliche Ereignisse

Störungen durch elektromagnetische Wellen oder Impulse treten nicht nur künstlich erzeugt, sondern auch natürlich durch die solare kosmische Strahlung (Sonnenwind, vergleiche Abb. 2.1) in Form von geladenen Teilchen (hauptsächlich handelt es sich um Protonen und Elektronen) auf. Eine extreme Variante sind die Sonnenstürme, welche auf Sonneneruptionen oder high speed streams des Sonnenwindes zurückgeführt werden. Dabei handelt es sich um Materieausbrüche – auch koronale Massenauswürfe genannt – in Form von beträchtlichen Plasmamengen, nicht selten von der Masse des Mount Everests, die auf extreme Geschwindigkeiten von bis zu 3000 Kilometern pro Sekunde beschleunigt und ins Weltall geschleudert werden. Die Stärke eines Sonnensturms wird über den K_p -Index oder die G-Skala angegeben. Diese Skalen allein sind nicht geeignet, die Auswirkungen des geomagnetischen Sturms auf Hochspannungsleitungen und Transformatoren zu beurteilen, da sie die Änderungsrate des Erdmagnetfeldes nicht mit einbeziehen. Die geomagnetischen Stürme bestehen überwiegend aus Protonen, einem kleineren Anteil an Alpha-Teilchen und aus Röntgenstrahlung. Damit einher gehen elektromagnetische Interferenzen (EMI), sowie starke Emissionen im Radio- und Röntgenbereich.

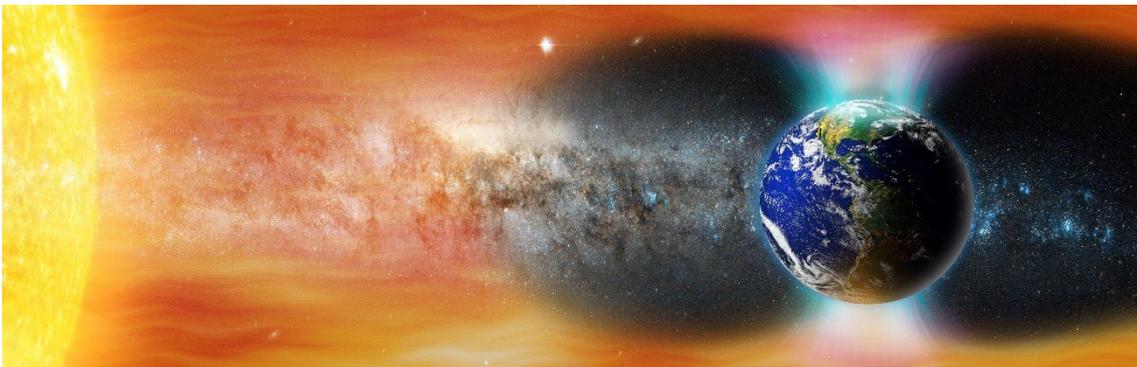


Abb. 2.1 Sonnenwind und der Schutz der Erde durch das Magnetfeld, Quelle: murart/Shutterstock.com

Die Erde besitzt als Schutz gegen Teilchen aus dem All ein starkes Magnetfeld und eine Atmosphäre. Ohne Sonnenwind würden die Feldlinien die Erde völlig symmetrisch umgeben. Die geladenen Teilchen aus Sonnenwind und kosmischer Strahlung werden vom Magnetfeld abgelenkt. Wie in Abb. 2.2 dargestellt verformen sie hierbei das Magnetfeld der Erde. Der Sonnenwind drückt das Erdmagnetfeld auf der der Sonne zugewandten

Seite zusammen und zieht es auf der abgewandten Seite zu einem langen Schweif aus, der mehrere Millionen Kilometer in den Weltraum hinaus reichen kann. Je stärker der Sonnenwind bzw. Sonnensturm, desto stärker die Verformung.

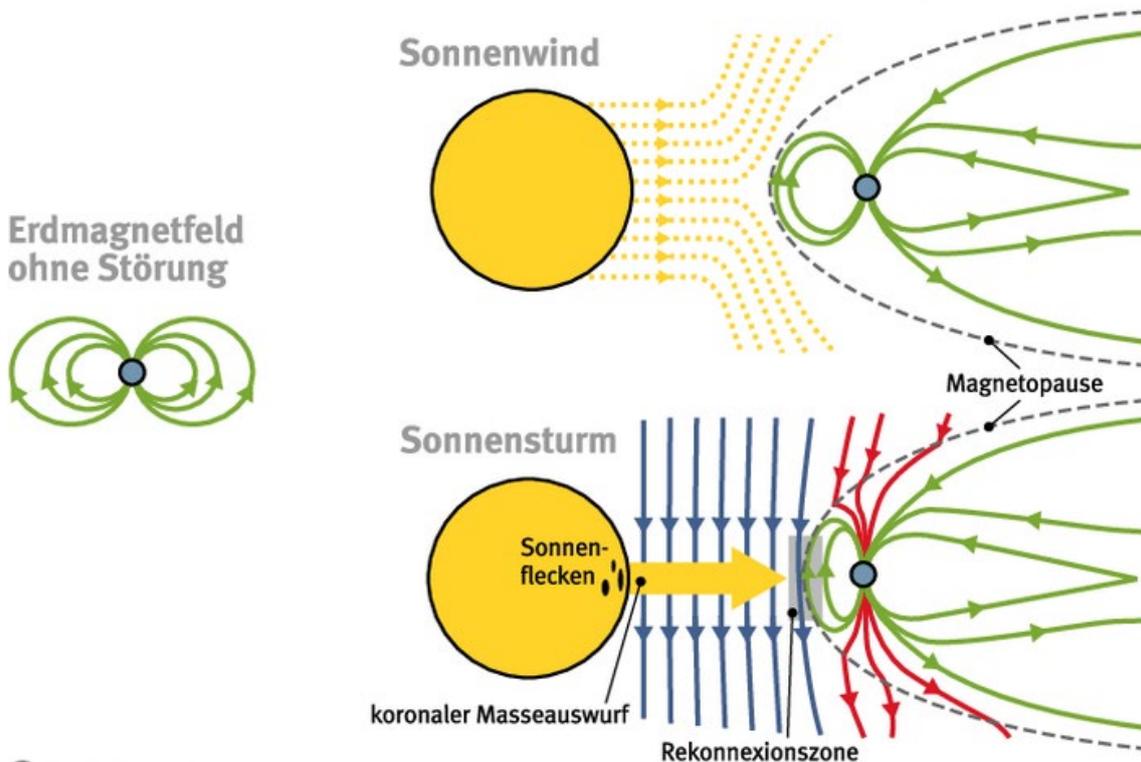


Abb. 2.2 Einfluss von Sonnenstürmen auf das Erdmagnetfeld /SPA 11/

In Polnähe treten die Magnetfeldlinien in die Erde ein. Entlang dieser Linien können die Magnetfeldlinien gemeinsam mit den Feldlinien auf die Atmosphäre treffen. Ein stärkerer Teilchenfluss von der Sonne führt somit auch zu einer größeren Teilchenzahl, die an den Polen auf die Atmosphäre treffen. Ionisieren die geladenen Teilchen den Stickstoff in der Atmosphäre, erscheinen Polarlichter /SPA 11/.

Starke Flares können das Magnetfeld der Erde so weit beeinflussen, dass Fluktuationen im Erdmagnetfeld (geomagnetische Stürme – in der internationalen Literatur wird auch der Begriffe geomagnetic disturbance (GMD) genutzt) auftreten, die zu geomagnetisch induzierten Strömen (en: geomagnetically induced currents (GIC)) führen. Dies sind induzierte Spannungen in ausgedehnten leitenden Systemen. Besonders betroffen können hiervon z. B. Pipelines oder Fernleitungen in hohen Breitengraden sein. Da die Veränderungen des Erdmagnetfeldes aufgrund der Einflüsse der solaren Strahlung relativ langsam (im Vergleich mit Wechselspannung) ablaufen, wird im Wesentlichen eine

Gleichspannungskomponente induziert. Diese kann prinzipiell in Fernleitungsnetzen zu Störungen führen.

Schon im September 1859 kam es zu einem besonders starken Sonnensturm (Carrington-Ereignis, benannt nach dem britischen Astronomen Richard Carrington), der in Europa und den USA zu damals erheblichen Störungen führte. Infolge dieses starken Sonnensturms konnten Polarlichter (vergleiche Abb. 2.3) sogar in Rom, Havanna und Hawaii beobachtet werden. Im Jahr 1989 fielen aufgrund eines Sonnensturms bspw. in Teilen von Kanada für neun Stunden Stromnetze aus.



Abb. 2.3 Polarlichter, Quelle: muratart/Shutterstock.com

Etwa alle elf Jahre erreicht die Sonnenaktivität ihr Maximum. In diesem Maximum kommt es vermehrt zu koronalen Massenauswürfen. Auf der Erde lässt sich dies durch deutlich häufigere Polarlichter erkennen. Diese können bei entsprechend starken Ausbrüchen auch bis nach Deutschland erkennbar sein. So zum Beispiel in der Nacht auf den 06. November 2023, in der Polarlichter über dem Siebengebirge bzw. in Bonn zu sehen waren. Bislang lässt sich das Auftreten schwerer Sonnenstürme zwar nicht vorhersagen, inzwischen werden sie von Forschungssonden im All rechtzeitig aufgespürt und es bleiben ein bis zwei Tage, um auf das aktuelle Weltraumwetter zu reagieren.

2.1.2 Vorfälle aufgrund künstlicher EMP

Elektromagnetische Wellen hoher Stärke kommen nicht nur in der Natur vor, sondern können auch von Menschen erzeugt werden. In der Literatur sind nur wenige Fälle von

IEMI-Angriffen dokumentiert. Insgesamt gab es laut /SAB 20/ acht Vorfälle im internationalen Umfeld, mit dem Einsatz von elektromagnetischer Strahlung:

1. In Japan wurde ein EM-Störsender verwendet, um den Computer eines Spielautomaten zu stören und fälschlicherweise einen Gewinn auszulösen
2. 2006 haben Einbrecher in St. Petersburg einen EM-Störsender genutzt, um die Alarmanlage eines Juweliergeschäfts auszuschalten
3. Am 09. Januar 1996 überfielen tschetschenische Rebellen Kisljar (Dagestan), nahmen mehrere tausend Geiseln und verschanzten sich im Krankenhaus. Dabei soll die Funkkommunikation der Polizei mittels eines EM-Störsenders deaktiviert worden sein
4. In einigen europäischen Städten wurden GSM-Jammer genutzt, um die Zentralverriegelung von Fahrzeugen zu umgehen (Vgl. Kap. 2.1 Nationale Vorfälle)
5. In Russland haben tschetschenische Rebellen einen Störsender genutzt, um ein Sicherheitssystem außer Funktion zu setzen und Zugang in einen gesicherten Bereich zu bekommen
6. In London wurde eine Bank erpresst, wobei der Einsatz eines Störsenders gegen das Bank-IT-System angedroht wurde
7. In den Niederlanden hat eine Einzelperson das IT-Netzwerk einer Bank gestört, da ihm ein Kredit verweigert wurde. Sein Störsender befand sich in einem Aktenkoffer, die Bauanleitung für den Störsender hatte er aus dem Internet
8. In Moskau wurde die automatische Telefonvermittlung durch eine Spannungseinspeisung unterbrochen. Ca. 200.000 Menschen hatten keine Telefonverbindung für einen Tag

2003 plante die USA den Einsatz nicht-tödlicher Mikrowellenwaffen gegen Aufständische im Irak. Diese Mikrowellenwaffen sollten den Menschen hohe Schmerzen bereiten,

ohne bleibende Schäden zu hinterlassen. Jedoch gibt es keine Berichte darüber, ob diese Art der Waffe tatsächlich gegen Menschen eingesetzt wurde /SPI 04/.

Im Zuge eines mit dem Namen Starfish Prime am 09.07.1962 auf dem Johnston-Atoll im pazifischen Ozean durchgeführten Kernwaffentests (vergleiche Abb. 2.4) mit einem 1450 kT TNT-äquivalenten Atomsprengkopf in einer Höhe von 400 km kam es im knapp über 1400 km entfernten Hawaii zu Störungen durch den nuklearen elektro-magnetischen Impuls (NEMP). Mehrere Straßenlampen sowie eine Richtfunkantenne fielen aus. Sogar sechs Satelliten über dem Pazifik waren von der Störung betroffen. Dieser Vorfall machte den NEMP öffentlich bekannt.



Abb. 2.4 Explosion einer Atombombe im Bikini-Atoll, Quelle: Everett Collection/Shutterstock.com

Der NEMP ist eine „Nebenwirkung“ bei einem Einsatz von Atomwaffen. Ob es reine EMP-Bomben gibt, ist nicht bekannt. Informationen zum Einsatz von solchen EMP-Bomben liegen nicht vor. Lediglich der Einsatz von Graphitbomben durch das US-Militär im zweiten Golfkrieg 1990/91 und im Kosovokrieg 1999 lässt sich bestätigen, ein Einsatz dieser sogenannten „Blackout-Bombe“ 2003 in Bagdad wird vermutet. Auch Südkorea arbeitet möglicherweise an einer ähnlichen Waffe, um im anhaltenden Konflikt mit Nordkorea eine neue Option zu schaffen. Eine Graphitbombe löst jedoch keinen EMP aus, sondern führt zu Kurzschlüssen aufgrund von hoch leitfähigem Graphitstaub bzw. Graphitfäden, der nach der Zündung der getränkedosen großen „Streubomben“ auf den Boden sinkt und dort in elektrische Geräte gelangen kann. Im Irakkrieg führten

Graphitbomben zur zeitweisen Störung von 85 % der Stromversorgung. Im Kosovokrieg fielen die Kraftwerke in Pristina sowie in Belgrad für ca. ein bis zwei Tage aus.

Laut /WIK 22/ besitzen die USA eine "Counter-electronics High Power Microwave Advanced Missile" (kurz: CHAMP). Dieser Flugkörper soll einen EMP erzeugen, der stark genug sei, um Elektronik zu zerstören, anstatt nur zu stören. Mit einem Flugkörper sollen dabei bis zu 100 „Schüsse“ pro Einsatz abgegeben werden können. Die US-Luftwaffe soll über 20 dieser Flugkörper verfügen. Als Nachfolger wird an der Entwicklung der sogenannten "High-Powered Joint Electromagnetic Non-Kinetic Strike Weapon" (kurz: HIJENKS) gearbeitet. Neuere und verbesserte Technologien ermöglichen eine Reduktion der Größe und des Gewichts bei größerer Reichweite. Damit kann das verbesserte System auf einer größeren Anzahl von Flugkörpern montiert werden.

Auch China soll eine Hyperschallwaffe entwickeln, die einen intensiven EMP erzeugen kann. Im Gegensatz zur US-Waffe HIJENKS (vergleiche Abb. 2.5), welche mittels eines Hochleistungs-Mikrowellengeräts mehrere Energieimpulse erzeugen kann, erzeugt die chinesische Variante nur einen einzigen, starken EMP mit Hilfe eines Flusskompressionsgenerators. Dabei wird eine chemische Explosion genutzt. Dieser starke EMP soll Kommunikations- und Stromleitungen in einem Umkreis von zwei Kilometern zerstören können /ASI 22/.

Bei diesen Flugkörpern handelt es sich um militärisches Equipment und soll an dieser Stelle die Möglichkeiten aufzeigen, mit denen Angriffe unter Zuhilfenahme von EMP möglich sind. Jedoch stellt ein solches System keine unmittelbare Gefahr für kerntechnische Anlagen und Einrichtungen in Deutschland dar.



Abb. 2.5 HIJENKS-Flugkörper, Quelle: United States Air Force/Facebook

Die Gefahr, ausgehend von EMP, sollte trotz bisher sehr geringer Anwendungen im nicht militärischen Bereich nicht unterschätzt werden. Insbesondere die USA sehen einen Angriff mit EMP bzw. NEMP als große Gefahr für das öffentliche Leben aufgrund der sehr hohen Digitalisierung der Gesellschaft.

2.2 Mögliche Auswirkungen von EMP auf kerntechnische Anlagen

2.2.1 Auswirkungen durch künstliche EMP

Nachfolgend werden weitere denkbare Auswirkungen erörtert, die speziell aus künstlichen EMP herrühren können. Der NEMP ist zwar auch ein künstlicher EMP, jedoch sind hier die Auswirkungen auf lokal beschränkte EMP von Bedeutung.

Es kann nicht ausgeschlossen werden das weitgehend alle elektrischen und elektronischen Komponenten mit EMP-Hilfsmitteln/-Werkzeugen/-Waffen beeinflusst oder gar dauerhaft zerstört werden könnten, die nicht ausreichend geschützt sind. Dies gilt insbesondere für Komponenten mit Prozessoren. Der Umfang der Gefährdung solcher Komponenten hängt von der Stärke des Schutzes (falls vorhanden) sowie von der Intensität, Dauer und Zielgenauigkeit der EMP-Einwirkung ab. Daher können genauere Aussagen

zu den Auswirkungen auf kerntechnische Anlagen im Rahmen dieses Vorhabens nicht getroffen werden. Dazu bedürfte es umfangreicherer Untersuchungen, die als wichtig erachtet werden.

Militärische Handlungen (wie bspw. in der Ukraine) können das Risiko für den Einsatz von EMP-Waffen auf kerntechnische Anlagen erheblich erhöhen.

Störungen bis zu Dysfunktionen und dauerhafte Zerstörung von Technik der Sicherung (bspw. der Detektionstechnik, der Einbruchmeldeanlage (EMA)/Gefahrenmeldeanlage (GMA), Leitungen zur Polizei etc.) durch gezielte EMP-Angriffe können ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Da die Sicherungstechnik im Gegensatz zur Sicherheitstechnik dicht an den Grenzen von Anlagengeländen verbaut ist, wird die Gefährdung ersterer als wesentlich größer erachtet.

2.2.2 Auswirkungen von EMP

Die Auswirkungen von EMP auf elektrische und elektronische Geräte sind sehr unterschiedlich. Wichtige Faktoren für die Auswirkungen sind die Stärke des EMP, der Abstand eines Gerätes zur Quelle der elektromagnetischen Störung sowie dessen Beschaffenheit und Schutz gegen elektromagnetische Strahlung. Die genauen Auswirkungen lassen sich daher nicht verallgemeinern. Die Auswirkungen von EMP können Störungen bis zu einem kompletten Stromausfall, auch Blackout genannt, sein (vergleiche Abb. 2.6).

Nach /WIK 24a/ zeigen kleinere elektrische Geräte grundsätzlich geringere Auswirkungen nach einem EMP als große Geräte. Je kürzer die elektrischen Leitungen in technischen Geräten sind, desto geringer ist die induzierte Spannung. So können kleine Geräte wie Uhren oder Radios einen EMP möglicherweise unbeschadet überstehen.

Die größten Schäden in elektronischen Bauteilen werden nicht durch den eigentlichen EMP verursacht. In den elektrischen Leitungen werden Spannungen induziert, die auf Platinen Ionenkanäle erzeugen. Dadurch werden ungewollte, geschlossene Stromkreise erzeugt, durch die die eigene Stromversorgung fließen kann. Es entstehen Kurzschlüsse. Diese zerstören schließlich Bauteile auf Platinen durch Überspannungen. Ausgeschaltete Geräte sind daher kaum von einem EMP betroffen.



Abb. 2.6 Blackout in einer Stadt, Quelle: hphtns/Shutterstock.com

Durch elektromagnetische Strahlung kommt es zunächst zu Störungen in Bauteilen, welche sich nicht auf die Funktionsfähigkeit auswirken. Um ein Bauteil in so großem Maße zu stören, dass schließlich ein Neustart erforderlich ist, muss das elektrische Feld der Strahlung ca. zehnmals so groß sein, wie das störende elektrische Feld. Um ein elektronisches Bauteil dauerhaft zu beschädigen, muss das elektrische Feld nochmals um den Faktor zehn größer sein.

Als Beispiel für die Auswirkungen eines EMP sei hier ein Automobil angesprochen. Zunächst muss unterschieden werden zwischen einem Automobil mit einem klassischen Verbrennungsmotor und einem Elektroauto. Ein Auto mit Verbrennungsmotor arbeitet überwiegend mechanisch. Hinzu kommen jedoch mehr und mehr elektronische Unterstützungssysteme sowie weitere Elektronik, beispielsweise für die Navigation und die Unterhaltung. Die Anzahl an verbauten Mikroprozessoren, welche praktisch alle Funktionen steuern, stieg über die Jahre immer weiter an. Mit der steigenden Anzahl an Mikroprozessoren und Schaltkreisen steigt die Anfälligkeit gegen elektromagnetische Strahlung. Die Karosserie des Fahrzeugs stellt trotz des Materials keinen Faraday'schen Käfig dar. Die Karosserie eines Automobils ist nicht geschlossen, wodurch die schädliche elektromagnetische Strahlung nahezu ungehindert ins Innere des Fahrzeugs gelangt.

Um die Auswirkungen von EMP auf Automobile zu testen, hat die United States EMP Commission eine Testreihe /USE 08/ durchgeführt. In dieser Testreihe wurden

insgesamt 37 Autos der Baujahre 1986 bis 2002 mit jeweils unterschiedlich hohem Elektronikanteil in einem EMP-Simulationslabor getestet. Die Fahrzeuge wurden teilweise fahrend, teilweise nicht fahrend, nacheinander zunehmenden EMP-Feldintensitäten ausgesetzt. Die Testreihe wurde bis zu einer Feldintensität von ca. 50 kV/m durchgeführt, außer es erfolgte schon bei geringeren Intensitäten eine Reaktion des Fahrzeugs.

Bei ausgeschaltetem Motor wurden keine Auswirkungen beobachtet. Bei laufendem Motor stoppten die Motoren von drei Fahrzeugen bei Feldstärken von ca. 30 kV/m oder höher. Diese Fahrzeuge stoppten und mussten neu gestartet werden. Lediglich bei einem Fahrzeug wurde die Elektronik im Armaturenbrett des Fahrzeugs beschädigt. Insgesamt wiesen 25 Fahrzeuge störende Fehlfunktionen auf, wie eine blinkende Armaturenbrettbeleuchtung. Ein Eingreifen war in diesen Fällen nicht erforderlich. Acht Fahrzeuge zeigten keine Reaktion auf den EMP. Bei höheren Feldstärken wird somit bei ca. zwei Drittel der fahrenden Autos eine Reaktion erwartet, bei ca. 10 % kann es zu schwerwiegenderen Schäden kommen, die teilweise dauerhaft auftreten können.

Neben den Effekten auf die Fahrzeuge kann es im Nachhinein jedoch zu weiteren Schäden kommen. Aufgrund des Stopps einzelner Fahrzeuge oder durch Fehlfunktionen, die zwar reversibel sind, kann es auf Straßen in der Folge zu Verkehrsunfällen und somit auch zu Personenschäden kommen, jedoch nicht als direkte Folge eines EMP-Angriffs.

Elektroautos besitzen deutlich mehr elektronische Systeme und sind daher auch anfälliger. Wahrscheinlich werden jedoch auch Elektroautos nicht dauerhaft beschädigt. Problematisch bei Elektroautos ist die deutlich anfälligere Infrastruktur der Ladestationen, die durch einen EMP beschädigt werden kann. Hier sind die Auswirkungen eher indirekt in der Zeit nach einem Ereignis.

Im Rahmen der Testreihe /USE 08/ wurden des Weiteren 18 LKW der Baujahre 1991 bis 2003 getestet. Auch hier wurden fahrende und nicht fahrende Fahrzeuge betrachtet, vom benzingetriebenen Pickup bis zu großen Dieseltraktoren. Die Ergebnisse waren ähnlich. Bei den ausgeschalteten Lastkraftwagen kam es zu keinen Einschränkungen. Bei den fahrenden LKW zeigten 13 von 18 eine Reaktion. Hier fielen insgesamt drei Motoren aus, von denen zwei sofort neu gestartet werden konnten. Lediglich ein LKW musste zur Reparatur. Zehn LKW zeigten vorübergehende Reaktionen, ein Eingreifen war nicht erforderlich. Fünf LKW zeigten keine Reaktion auf den EMP. Auch in diesem Test wurde die Feldstärke auf bis zu 50 kV/m eingestellt. Bei diesen Feldstärken wird

somit bei ca. 70 % der fahrenden LKW eine Reaktion erwartet, bei ca. 15 % kommt es zu einem Motorstillstand, teilweise mit dauerhaften Schäden.

Die Auswirkungen von EMP auf Kraftwerke insgesamt sind aufgrund der Härtung (Stahlbeton) und den Schutzmaßnahmen gegen Blitzeinschlag eher gering. Ein Stromausfall kann als Folge eines EMP dennoch auftreten. Grund dafür ist die Netzsynchronisation. Ein Stromnetz besteht aus vielen einzelnen Kraftwerken, von der Photovoltaikanlage auf dem Dach eines Privathauses bis zum Kernkraftwerk. Alle diese einzelnen Kraftwerke müssen für den Verbraucher einen Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz erzeugen. Jedoch erzeugen alle Kraftwerke die elektrische Energie unterschiedlich. So muss beispielsweise Gleichstrom bei Photovoltaikanlagen über einen Wechselrichter auf Wechselstrom mit der erforderlichen Frequenz gewandelt werden. Aber auch für den Wechselstrom ist eine Synchronisation aller einzelnen Erzeuger sehr wichtig. Neben der gleichen Frequenz des Wechselstroms muss auch die Phasenlage synchronisiert werden, damit sich die Spannungen nicht gegenseitig aufheben. Kommt es bei der Synchronisation der Frequenz zu einer Störung, erfolgt die Abschaltung eines Erzeugers zum Schutz. Bei einem großflächigen EMP-Ereignis kann es dadurch zum landesweiten Zusammenbruch der Energieversorgung kommen, neben der dennoch möglichen Beschädigung einzelner Komponenten oder auch Kraftwerke. Die Geräte zur Synchronisation, sogenannte Synchronoskope, sind in Umspann- und Kraftwerken verbaut. Je nach Schutz dieser Geräte gegen elektromagnetische Störungen kann ein EMP in der Nähe eines Synchronoskops zu einem Ausfall führen.

Die Schäden bei Angriffen mit EMP lassen sich nach der Dauer eines Effekts an Systemen oder Systemkomponenten kategorisieren:

1. Kein Effekt

Der EMP führte zu keinen Beeinträchtigungen oder Störungen an Systemen oder Systemkomponenten

2. Während Exposition

Der EMP führte nur während der Exposition zu Störungen an Systemen oder Systemkomponenten. Nach Beendigung der Exposition sind die Systeme wieder uneingeschränkt funktionstüchtig

3. Zeitweise

Der EMP führte zu einer kurzzeitigen Störung (auch nach Ende der Exposition) von Systemen oder Systemkomponenten. Das System kann die Funktionalität selbstständig wiederherstellen

4. Bis zum Eingreifen

Der EMP führte zum Ausfall eines Systems oder von Systemkomponenten ohne selbständige Wiederherstellung. Durch ein Eingreifen eines Bedieners kann das System wiederhergestellt werden (Reboot)

5. Dauerhaft

Der EMP führte zur Beschädigung oder Zerstörung von Systemen oder Systemkomponenten. Die Funktionalität lässt sich nur durch Austausch zumindest einzelner Systemkomponenten wiederherstellen

Die Auswirkungen von EMP auf elektrische und elektronische Systeme sind abhängig von der Stärke der elektromagnetischen Beeinflussung, von der Dauer sowie vom Schutz bzw. der Härtung des Systems vor elektromagnetischen Einflüssen.

Die Auswirkungen, ausgelöst durch einen EMP, lassen sich gemäß /SAB 20/ nach der Schwere der Auswirkung in zehn Stufen einteilen:

Tab. 2.1 Kategorisierung der Auswirkungen

Kategorie		Auswirkung
0	Keine	Keine Auswirkungen oder Schäden am System
1	Sehr gering	Sehr geringe oder kaum wahrnehmbare Auswirkungen
2	gering	Geringe Funktionsstörung
3		Funktionseinschränkung, Arbeiterschwernis
4	störend	Funktionseinschränkungen an wichtigen Komponenten
5		Leistungseinschränkungen von Komponenten
6		Ausfall von Teilsystemen, wesentliche Funktionalität noch vorhanden
7	Hoch/ kritisch	Gefahr von Verletzung, Umweltbelastungen
8		Funktionsfähigkeit des Systems ist eingeschränkt
9	katastrophal	Umweltschäden, Lebensgefahr einzelner Personen, Gefahr schwerer Verletzungen
10		Schwere Umweltschäden, Totalverlust des Systems, Gefährdung von Personengruppen

Andere Auswirkungen von EMP sind menschliche Reaktionen auf einen Stromausfall. Insbesondere in urbanen Gebieten mit sozialen Brennpunkten und hoher Unzufriedenheit kann es gegebenenfalls zu Reaktionen kommen, die Einsatzkräfte binden. Dunkelheit, fehlende Kommunikationsmöglichkeiten und ausgeschaltete Alarmanlagen können zu Plünderungen verleiten, wodurch Polizeikräfte eingesetzt werden müssen. Besonders extrem zeigten sich die menschlichen Reaktionen beim Stromausfall 1977 in New York. Während eines 25-stündigen Stromausfalls in einer heißen Sommernacht kam es zu Plünderungen in hunderten Geschäften, mehrere Gebäude wurden in Brand gesteckt. Es gab tausende Verhaftungen.

2.2.3 Auswirkungen durch Sonnenstürme/NEMP

Nachfolgend aufgeführte Auswirkungen bspw. auf kerntechnische Anlagen durch Sonnenstürme, sind bereits bekannt. Generell führten Koronale Massenauswürfe und EMI zur Induzierung von teils beträchtlichen Strömen in elektr. Leitern wie Überlandleitungen und Pipelines. Grundsätzlich werden die geomagnetisch induzierten Ströme umso größer, je länger die Leitung ist. Abhilfe bieten Reihen Kondensatoren zur Begrenzung von Gleichstrom. Es gab nachweislich besonders starke Sonnenstürme, die zu nichtvorhergesehenen Schäden führten. Ein prominentes Beispiel ist der Ausfall und die starke Schädigung im Jahre 1859 des gerade weltweit installierten Telegrafennetzes, was in manchen Ländern mit Waldbränden einherging. Auswirkungen auf Stromnetze sind Spannungsschwankungen, Überspannungen, ein erhöhter Bedarf an Blindleistung,

unbeabsichtigtes Auslösen von Schutzrelais, bis hin zu großflächigen und langfristigen Stromausfällen. Ein vergleichbarer Sonnensturm wie der von 1859 in der heutigen Zeit könnte nach Ansicht verschiedener internationaler Experten verheerende Schäden anrichten. GIC haben keinen direkten Einfluss auf Turbinen und Generatoren von Kraftwerken, können diese aber indirekt über Oberschwingungen und Störungen beschädigen, die durch die Sättigung der Transformatoren entstehen (Überhitzung, mechanische Vibrationen). Die deutschen Kernkraftwerke (KKW) waren prinzipiell gegen Störungen aus dem Stromnetz geschützt (Blockschutz, Generatorschutz). Diese Schutzmaßnahmen waren unabhängig von der Störungsursache und daher auch bei denkbaren Störungen durch die solare Strahlung wirksam. Innerhalb der deutschen KKW war ein Schutz der Komponenten der Leittechnik durch den Überspannungsschutz, Entkopplung zwischen den Leittechnikredundanzen, Abschirmung und ein spezielles Erdungskonzept gegeben. Der hierdurch gewährleistete Schutz deckt die durch die Änderungen des Magnetfeldes induzierte Spannungen bei weitem ab. Auf einen längeren Stromausfall wird weiter unten eingegangen.

Technische Anlagen auf der Erdoberfläche und im Orbit können durch die hochenergetischen Teilchen oder indirekte Auswirkungen von Sonnenstürmen beschädigt werden. Da die Teilchen der kosmischen Strahlung eine ionisierende Wirkung besitzen, können sie Schaltkreise von Computerchips (im wesentlichen Speicherschaltkreise) unerwünscht elektrisch aufladen. Das führt zu einem Fehlerstrom und damit möglicherweise zu einer Fehlfunktion des Bauelements. Selbst Neutronen, die nicht vom Magnetfeld der Erde abgelenkt werden, können in Halbleiterbauelementen Kristallbaufehler hervorrufen, durch welche elektronische Bauteile versagen können.

In den 1980-iger Jahren wurden erstmals solche Fehler in Computerspeichern (s. g. Soft Errors) festgestellt. Der Inhalt der Speicher schien sich ohne erkennbaren Grund zu ändern. Es wurde zu dieser Zeit erkannt, dass die Anzahl der geänderten Bits, der Speichereinheiten des Rechners, von der Höhe des Standorts über dem Meeresspiegel abhing. Dies war ein indirekter Beweis dafür, dass die kosmische Strahlung für die Schäden verantwortlich ist. Lange Zeit wurde vermutet, dass mit steigender Integrationsdichte und größerem Speicher die Anzahl solcher Soft Errors zunehmen würde. Neuere Untersuchungen zeigen allerdings, dass durch die immer kleineren Strukturen in elektronischen Bauelementen die Fehler abnehmen. Vermutlich liegt das daran, dass der Querschnitt kleiner wird und somit die Wahrscheinlichkeit, dass die kosmische Strahlung einen Schaden anrichtet. Die verbleibenden Soft Errors werden in Großrechnern und Servern meist

durch Prüfsummenverfahren korrigiert. Aufgrund des im Weltraum erheblich höheren Strahlungsniveaus, ist für Satelliten und Sonden die Gefahr von Computerausfällen dagegen wesentlich größer. Beispiele sind die beiden Voyager-Raumsonden, die 1977 ins All starteten, oder erhebliche Betriebsstörungen in zwei Kommunikationssatelliten im Jahr 1994, die zu Unterbrechungen des Fernseh- und Rundfunkempfangs in ganz Kanada führten. Darüber hinaus sind auch Mobilfunknetze oder GPS-Systeme gefährdet /SPA 11/.

John Kappenman /KAP 10/ beschreibt den Einfluss von Sonnenstürmen auf Hochspannungstransformatoren. Demnach versagten zwölf Hochspannungstransformatoren bei Kernkraftwerken der USA innerhalb von 25 Monaten seit Beginn des Sonnensturms vom März 1989 (siehe Abb. 2.7). In Teilen von Kanada (vor allem im Staat Québec) kam es bei diesem Sonnensturm zu Stromnetzausfällen von bis zu neun Stunden, was mit Kurzschlüssen und Trafobränden (vergleiche Abb. 2.8) einherging /NER 10/. Auswirkungen auf Transformatoren sind zusammenfassend Fehlströme, sowie asymmetrische Erregerströme, und viele Oberschwingungen. In der Folge kann das zur Abschaltung bis hin zum Totalverlust führen.

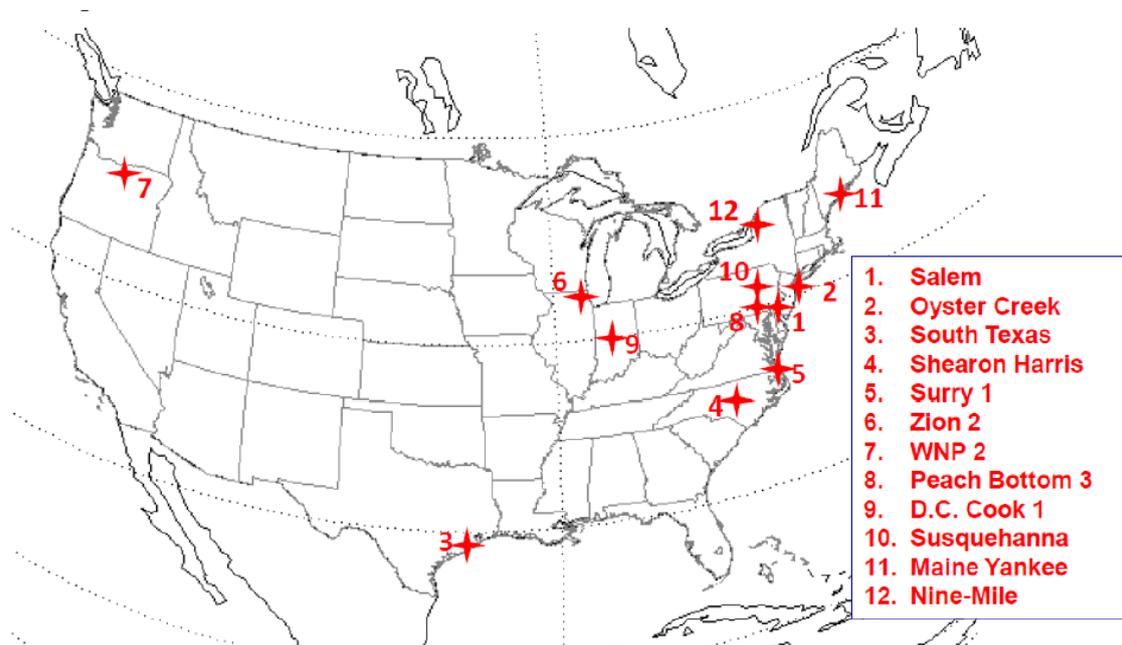


Abb. 2.7 Transformatorversagen bei Kernkraftwerken der USA innerhalb von 25 Monaten seit Beginn des Sonnensturms von März 1989 /KAP 10/



Abb. 2.8 Transformatorschaden während des Sonnensturms /USE 08/

Auch in Südafrika kam es um den Jahreswechsel 2003/2004 zu Schädigungen und Ausfällen von Transformatoren bei Kohle- und Wasserkraftwerken. Weitere Schäden an Stromnetzen und Trafos werden aus Schweden, Großbritannien, Neufundland und China berichtet. Finnland berichtet von häufigen geomagnetisch induzierten Strömen, bislang wurde nicht von Schäden berichtet, was die Finnen auf die großen Reserven bei der Auslegung der Trafos und den Einsatz von Reihenkondensatoren zurückführen.

Für den extremen Fall, dass ein Sonnensturm zum vollständigen Ausfall des deutschen Stromnetzes führt, greifen aus Sicht der GRS folgende Maßnahmen und Vorkehrungen der deutschen KKW:

- bei Abtrennung der Anlage vom Netz erfolgt zunächst ein Lastabwurf auf Eigenbedarf. Falls dieser gelingt, kann die Anlage im Inselbetrieb ihre Stromversorgung sicherstellen
- gelingt der Lastabwurf auf Eigenbedarf nicht, geht die Anlage in den Notstromfall über. Hierfür haben die Anlagen Kraftstoffreserven für 72 h

Ein darüber hinaus längerfristiger Notstromfall wurde von den deutschen Anlagen im Rahmen der RSK-Sicherheitsüberprüfung der deutschen Anlagen im Nachgang zu den Reaktorunfällen in Fukushima untersucht. Einerseits kann durch die gezielte

Abschaltung von Verbrauchern Kraftstoff eingespart werden, was eine Ausdehnung des Notstromfalls auf eine Dauer von ca. einer Woche mit den vorhandenen Kraftstoffreserven ermöglicht. Zudem bestehen hierzulande bevorzugte Lieferverträge mit Kraftstofflieferanten. Jene verfügen über Tankfahrzeuge, die unabhängig von der Verfügbarkeit des Stromnetzes Kraftstoff in den eigenen Tank pumpen, zur Anlage transportieren und in der Anlage abpumpen können. Hiermit ist aus Sicht der GRS eine zeitliche Verlängerung des Notstromfalls über eine Woche hinaus möglich.

Die Auswirkung von Strahlung auf Halbleiterbauteile ist sehr vielfältig. Es gibt deshalb eine große Anzahl verschiedener Testmethoden und Standards, deren Herangehensweise einen Ansatz für die Bewertung dieser Komponenten zum Einsatz in einer kern-technischen Anlage sein können. Die Auswertung der Betriebserfahrung und der Blick auf andere Industrie- und Forschungszweige zeigen verschiedene Beispielfälle auf, in denen Fehlfunktionen und Ausfälle von Komponenten aufgrund von Strahlungseinfluss aufgetreten sind oder der Strahlungseinfluss als Ursache vermutet wird. Da die Auswirkungen in diesen Fällen zum Teil erheblich sind, zeigt sich hier die Relevanz der Betrachtung von Strahlungseffekten auf Halbleiterbauteile. Werden die Einflüsse von außen betrachtet, kann es bei seltenen kosmischen Ereignissen, harter kosmischer Strahlung oder Sonneneruptionen, ebenfalls zu einer starken Beeinflussung der Funktion von Komponenten und Systemen in der Leittechnik und der Energieversorgung kommen /GRS 19/.

Eine große Gefahr bei einem NEMP geht von der Störung des GPS-Signals aus. Über das GPS-Signal werden synchronisierte Zeiten übermittelt, aus deren unterschiedlicher Laufzeit eine Position auf der Erde berechnet werden kann. Diese Zeitsignale dienen auch der Synchronisation. Durch den Ausfall der Synchronisierung kann es zu Ausfällen in der Kommunikation oder auch zu Störungen in der Stromnetzsynchrisation, und damit zum Ausfall von Stromnetzen kommen. Eine solche Störung ist eine indirekte Auswirkung eines großflächigen EMP bzw. NEMP oder Sonnensturms.

Die Auswirkungen erzeugt durch einen NEMP sind vergleichbar. Beide Ereignisse beschreiben jeweils den stärksten natürlichen bzw. künstlich erzeugten EMP. Beide Ereignisse beeinflussen die Elektronik in einem sehr großen Gebiet.

Einwirkungskombinationen:

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei einer detaillierten Abschätzung der Auswirkungen von natürlichen/künstlichen EMP u. ä. Phänomenen auch Einwirkungskombinationen zu betrachten wären. Beispielweise kann es aufgrund großer EMP (wie Sonnenstürme, NEMP, HEMP) nicht nur zur Fremdnetzinstabilität kommen, sondern auch zum Brand von Überlandleitungen, was zu Wald-/Steppenbränden führen kann, die wiederum eine Einwirkung von außen auf KKW darstellen. Darüber hinaus könnte es durch EMP zu Kollision von Fahrzeugen auf dem Anlagengelände kommen, was eine Einwirkung von innen darstellt. Weitere Kombinationen können mittels des Berichts /GRS 18/ abgeleitet werden.

3 **Potenzielle Sicherungsanforderungen und -maßnahmen zu Angriffen mit EMP auf kerntechnische Anlagen und Einrichtungen**

Der Schutz kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen (vergleiche Abb. 3.1) gegen Entwendung und Freisetzung radioaktiver Stoffe hat höchste Priorität. Entsprechend gibt es diverse redundante und diversitäre Sicherungseinrichtungen, die den Schutz gewährleisten sollen. Auch gegen Angriffe mit EMP sollten kerntechnische Anlagen und Einrichtungen geschützt werden, da die technischen Sicherungseinrichtungen anfällig gegen EMP sein könnten. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den möglichen Anforderungen an kerntechnische Einrichtungen für den Schutz gegen EMP.



Abb. 3.1 Blick auf das Kernkraftwerk ISAR I und II, Quelle: [imageBROKER.com/Shutterstock.com](https://www.imageBROKER.com/Shutterstock.com)

3.1 **Potenzieller Angreifer**

Die Art und Stärke einer EMP- bzw. einer IEMI-Störquelle hängen von verschiedenen Faktoren ab. Neben den fachlichen Fähigkeiten eines potenziellen Angreifers hängt der Bau einer Störquelle auch davon ab, ob ein entsprechendes Gerät selbst gebaut wird, bzw. ob die Bauteile bei mangelnder Kenntnis käuflich erworben werden können, von

den finanziellen Mitteln, die dem potenziellen Angreifer zur Verfügung stehen, sowie von der gewünschten Mobilität.

Um die Gefahr besser einschätzen zu können, welche Mittel einem potenziellen Angreifer zur Verfügung stehen können, werden im Folgenden die Einflussfaktoren betrachtet. Die Kategorisierung der Fachkenntnisse (siehe Tabellen 3.1) sowie der finanziellen Mittel (siehe Tabelle 3.2) eines potenziellen Angreifers ist angelehnt an die Kategorisierung nach /SAB 20/.

Tab. 3.1 Kategorisierung der Fachkenntnisse

K	Fachwissen	Beschreibung
1	Allgemeinwissen	Ohne Fachkenntnisse, Laie
2	Grundverständnis	Angelernt, Hobbyelektroniker
3	Fachkenntnisse	Abgeschlossene technische Berufsausbildung, Handwerker
4	Akademisches Wissen	Akademische Ausbildung und Berufserfahrung, Ingenieur
5	Expertenwissen	Experte mit praktischer Erfahrung oder Promotion in diesem Fachgebiet

Für den Entwurf, den Bau und den Betrieb einer Störquelle gelten unterschiedliche Anforderungen. Die höchste Anforderung liegt im Entwurf und im Bau, der Betrieb hat meistens die geringsten Anforderungen an Fachwissen. Je nach Störquelle reicht das Wissen über den Betrieb aus, sofern die Störquelle am Markt verfügbar ist und die entsprechenden finanziellen Mittel vorliegen.

Tab. 3.2 Kategorisierung nach finanziellen Mitteln

F	Finanzielle Ressourcen	Beschreibung
1	gering	$X < 1.000 \text{ €}$
2	Durchschnittlich	$1.000 \text{ €} \leq X < 10.000 \text{ €}$
3	Überdurchschnittlich	$10.000 \text{ €} \leq X < 100.000 \text{ €}$
4	hoch	$100.000 \text{ €} \leq X < 1.000.000 \text{ €}$
5	Sehr hoch	$1.000.000 \text{ €} \leq X$

Das Statistische Bundesamt veröffentlicht regelmäßig die Verteilung unterschiedlicher Bildungsabschlüsse in Deutschland für Personen im Alter von 15 Jahren und mehr (Für das Jahr 2019 in Abb. 3.2). Die 25,2 % ohne Bildungsabschluss beinhalten neben Personen mit abgebrochener Schulausbildung auch den Anteil an Schülern in weiterführenden Schulen. Die Verteilung dient als Anhaltspunkt für die Abschätzung, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein entsprechendes Fachwissen vorliegen könnte.

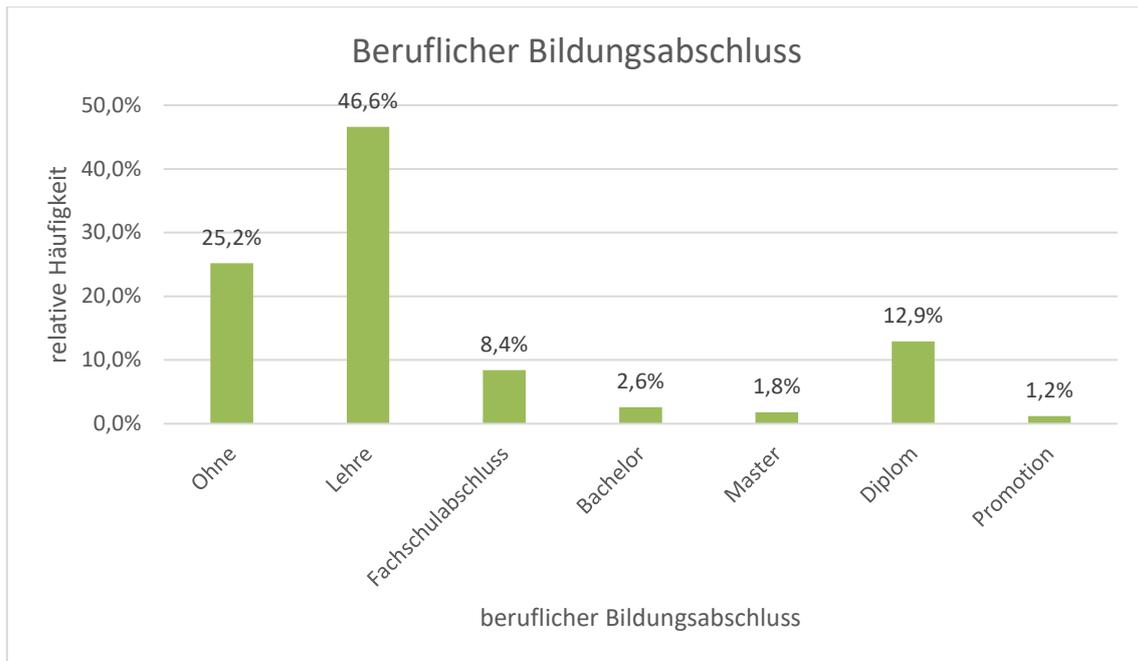


Abb. 3.2 Bevölkerung nach beruflichem Bildungsabschluss 2019 von Personen im Alter von 15 Jahren und mehr, Stand 25.11.2020, Quelle: Statistisches Bundesamt

Die Kategorisierung in Tabelle 3.1 wird in Verbindung mit Abbildung 3.2 gebracht:

Kategorie K1: ohne beruflichen Bildungsabschluss

Kategorie K2: Hobbyelektroniker, kein Bildungsabschluss nach Abbildung 3.2

Kategorie K3: Lehre, Fachschulabschluss

Kategorie K4: Bachelor, Master, Diplom

Kategorie K5: Promotion

In der Kategorisierung werden keine technischen und nicht-technischen Bildungsabschlüsse unterschieden. Die durch das Statistische Bundesamt veröffentlichte Verteilung nach Fächergruppen dient als Anhaltspunkt über den Zugang eines potenziellen Angreifers zu Fachwissen (Abb. 3.3).

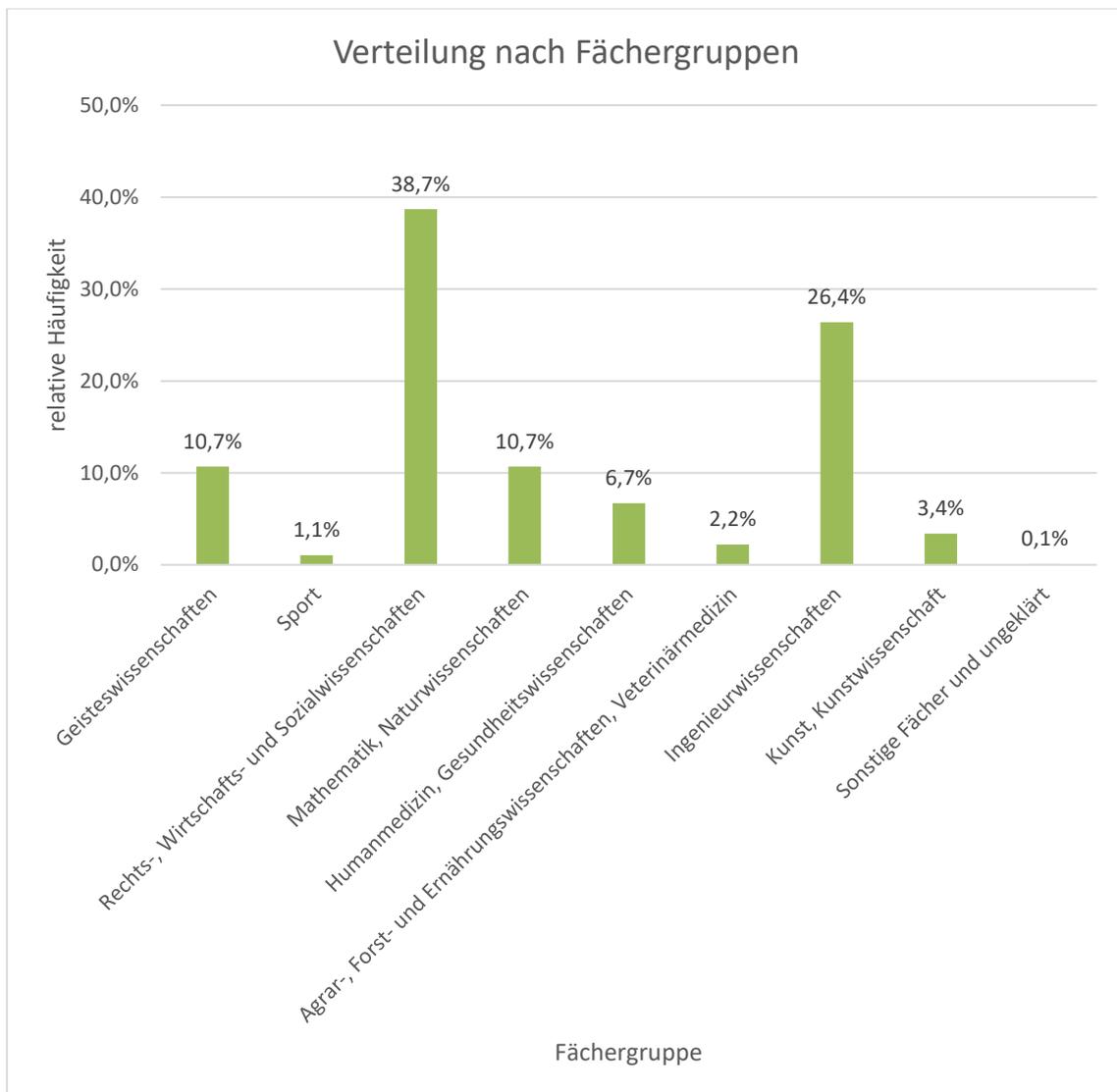


Abb. 3.3 Verteilung Studium nach Fächern im Jahr 2021/2022, Stand 05.08.2022, Quelle: Statistisches Bundesamt

Je nach Gruppe potenzieller Angreifer kann die Verteilung der beruflichen Bildungsabschlüsse und auch der Verteilung der Fächer erheblich abweichen. So haben Gambetta und Hetog in einer Studie /GAM 09/ herausgefunden, dass die Tätergruppe islamistischer Terroristen über einen erhöhten Bildungsabschluss verfügt. Weiter besitzen überdurchschnittlich viele Personen dieser Tätergruppe einen Abschluss in Ingenieurwissenschaften (44 %). Eine Studie von Lochner und Moretti /LOC 04/ dagegen zeigt auf, dass die Insassen in US-Gefängnissen mehrheitlich über einen niedrigen oder gar keinen beruflichen Bildungsabschluss verfügen. Da es keine Daten zu Gruppen potenzieller Angreifer auf kerntechnische Anlagen und Einrichtungen oder kritische Infrastruktur allgemein gibt, wird die Verteilung aller Studierenden bzw. die beruflichen Bildungsabschlüsse aller Menschen in Deutschland betrachtet (siehe Abb. 3.3).

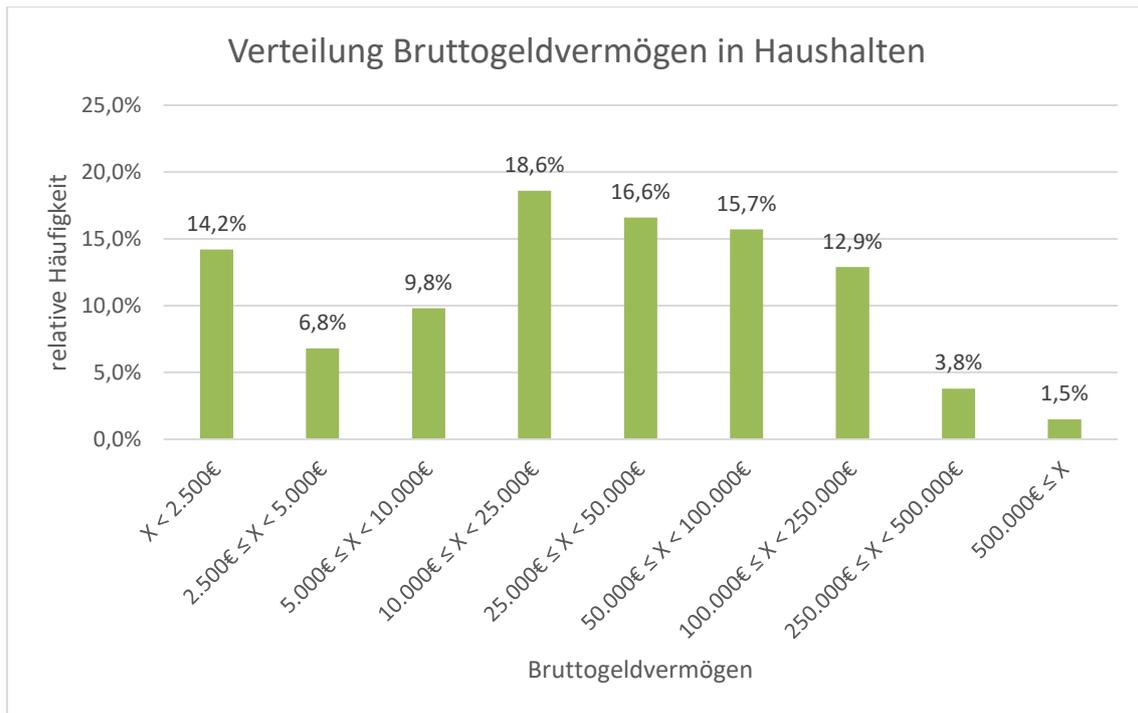


Abb. 3.4 Verteilung des Bruttogeldvermögens pro Haushalt, Stand: 01.01.2018, Quelle: Statistisches Bundesamt

Eine Tätergruppe besteht aus vielen Individuen, während sich das Kapital kumulativ mit jedem weiteren Mitglied erhöht, bleibt das Level der Kenntnisse auf dem Maximum des Individuums mit dem höchsten Bildungsabschluss bzw. der höchsten Kenntnisse auf dem betreffenden Gebiet. So kann eine Tätergruppe über deutlich größere finanzielle Mittel verfügen als ein Einzeltäter. Da es jedoch bisher kaum Daten zu Tätergruppen, die EMP zum Angriff bzw. für verbrecherische Tätigkeiten genutzt haben, gibt, kann eine Tätergruppe derzeit nicht in eine bestimmte Kategorie eingeordnet werden. Das Bruttogeldvermögen (siehe Abb. 3.4) sowie der Kenntnisstand (siehe Abb. 3.2) werden daher für die Wahrscheinlichkeit des Besitzes einer EM-Störquelle lediglich abgeschätzt.

3.2 Aufbau einer EM-Störquelle

Wie in Kapitel 1.3 und 1.4 beschrieben, ist die wesentliche Funktion einer Störquelle die schnelle Abstrahlung elektromagnetischer Strahlung hoher Leistung. Um diese Funktion zu erfüllen, weisen EM-Störquellen stets den gleichen prinzipiellen Aufbau auf (Abb. 3.5).

Benötigt werden:

- eine Hochleistungsimpulsquelle, bestehend aus einer Primärenergiequelle, einem Energiespeicher und einer Impulsformung
- ein Hochfrequenzmodulator
- ein Antennensystem, bestehend aus einer Antennenanpassung und einer Antenne

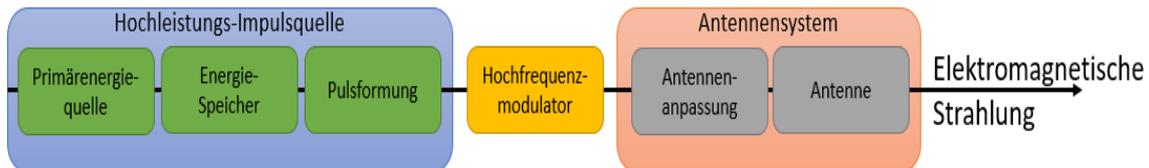


Abb. 3.5 Prinzipieller Aufbau einer EM-Störquelle

Die Primärenergiequelle ist zwar durch das Energieversorgungsnetz gegeben, da jedoch von einem mobilen Betrieb ausgegangen werden soll, muss die Energie zwischengespeichert werden. Dazu werden entweder Akkumulatoren oder Hochspannungskondensatoren benötigt oder die Energie wird durch vor Ort bereitgestellt. Die Erzeugung elektrischer Energie vor Ort wird jedoch aus Gründen der Schall- und Wärmeemission von Stromerzeugeraggregaten nicht angenommen. Benötigt wird Gleichstrom hoher Spannung. Gegebenenfalls müssen ein Gleichspannungswandler oder Transformatoren zwischengeschaltet werden. Um eine ausreichend hohe Spannung für den Hochfrequenzmodulator zu erzeugen, wird die elektrische Energie in einem Energiespeicher zwischengespeichert. Besonders wichtig bei der Auslegung des Energiespeichers ist die hohe Energiedichte sowie sehr kurze Entladezeiten, um einen möglichst starken EMP zu erzeugen. Die Entladezeit sollte im Bereich weniger Nanosekunden liegen, weshalb vorwiegend auf Kondensatoren als kapazitive Energiespeicher zurückgegriffen wird (siehe Abb. 3.6).

Der Energiespeicher wird zur Erzeugung eines EMP in den Hochfrequenzmodulator entladen. In vielen Fällen muss das Signal umgeformt werden. In der impulsformenden Schaltung wird beispielsweise der Anstieg der Spannungsflanke erhöht oder die Signaldauer verkürzt. Im Hochfrequenzmodulator wird das abzustrahlende Signal mit hoher Frequenz und hoher Leistung erzeugt und über das Antennensystem in die Umgebung abgestrahlt. Je nach Komplexität ist eine Anpassungsschaltung vor der Antenne notwendig.

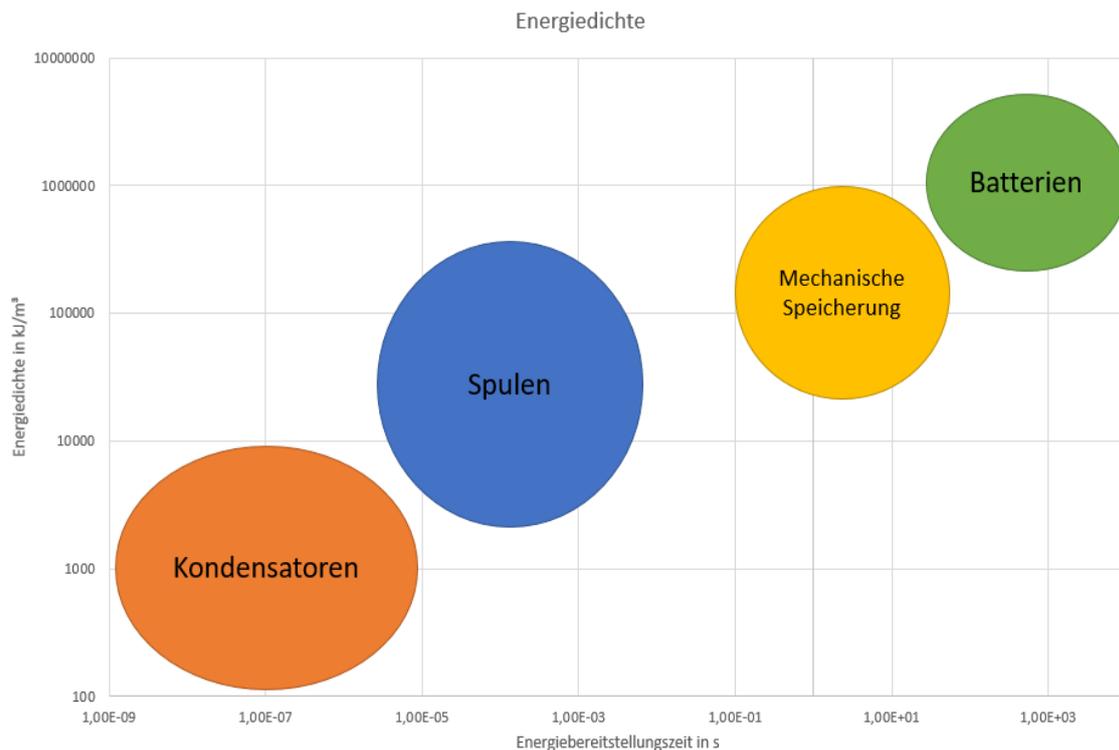


Abb. 3.6 Volumetrische Energiedichte und Entladezeit verschiedener Energiespeicher

Die oben aufgeführten Bauteile sind für den prinzipiellen Aufbau einer EM-Störquelle wichtig. Weitere Baugruppen, wie beispielsweise Kühlsysteme oder Umwälzpumpen, können je nach Größe und Stärke des Gesamtsystems notwendig sein und erhöhen die Komplexität und die Größe des Aufbaus und schränken möglicherweise die Mobilität ein. Auch durch den Bedarf einer weiteren Energiequelle für den Betrieb der zusätzlichen Bauteile wird das System größer und schwerer.

3.3 Kategorisierung von Bauteilen von EM-Störquellen

Die Kategorisierung eines potenziellen Angreifers nach seinem Fachwissen bezüglich der Auslegung, dem Bau und dem Betrieb einer EM-Störquelle ist erforderlich, sofern die Bauteile oder ein Gesamtsystem nicht marktverfügbar sind. Die folgende Tabelle (siehe Tab. 3.3) kategorisiert die Verfügbarkeit von Bauteilen und hilft dabei, die Wahrscheinlichkeit für die Nutzung eines Bauteils durch einen potenziellen Angreifer besser einschätzen zu können.

Tab. 3.3 Kategorisierung nach Verfügbarkeit

V	Verfügbarkeit	Beschreibung
0	Nicht verfügbar	Wird nicht auf dem Markt angeboten
1	Marktüblich	Ist als Gebrauchsgegenstand überall erhältlich
2	Fachgeschäft	Kann ohne Einschränkung in Fachgeschäften erworben werden
3	Fachhandel, gewerblich	Im Fachhandel für Unternehmen erhältlich
4	Beschränkter Erwerb	Erwerb unter Auflagen, Spezialanfertigung
5	Stark eingeschränkte Verfügbarkeit	Verbot des Handels oder des Besitzes

Ein weiterer Faktor bei der Auslegung und beim Bau einer EM-Störquelle ist die Größe bzw. die Mobilität des Systems (siehe Tab. 3.4). Je nach Größe kann für den Transport ein Fahrzeug notwendig werden. Je größer das System, desto mehr Leistung kann grundsätzlich erzeugt werden, jedoch nimmt die Distanz von der Quelle zum Ziel höchstwahrscheinlich deutlich zu. Eine EM-Störquelle in einem Aktenkoffer kann mit in ein Gebäude genommen werden und möglicherweise dadurch sogar in unmittelbarer Nähe zum Ziel zur Wirkung kommen. Ein LKW oder Van muss gegebenenfalls weit entfernt auf einem Parkplatz oder zumindest einer Freifläche abgestellt werden. Zur Kategorisierung der Größe und damit auch der Mobilität dient die folgende Tabelle:

Tab. 3.4 Kategorisierung nach Mobilität

M	Mobilität	Baugröße	Beispiel
1	Hoch mobil	$X < 0,02 \text{ m}^3$	Aktenkoffer
2	Sehr mobil	$0,02 \text{ m}^3 \leq X < 0,1 \text{ m}^3$	Koffer, Rucksack
3	Mobil	$0,1 \text{ m}^3 \leq X < 2 \text{ m}^3$	PKW
4	Leicht transportabel	$2 \text{ m}^3 \leq X < 15 \text{ m}^3$	Van
5	Transportabel	$15 \text{ m}^3 \leq X < 77 \text{ m}^3$	LKW, Container (10 ‘-45 ‘)
6	Stationär	$77 \text{ m}^3 \leq X$	Ortsfeste Anlage

Als Grenze zwischen stationär und transportabel wurde ein Container der Größe 45 ‘ mit einem Nutzvolumen von ca. 77 m^3 gewählt. Dies entspricht der Größe eines klassischen Sattelauflegers und stellt damit die Grenze dessen dar, was auf der Straße noch ohne zusätzlichen logistischen Aufwand transportiert werden darf. Größere Systeme gelten daher als stationär. Systeme der Kategorie „leicht transportabel“ und höher können üblicherweise auch während des Transportes betrieben werden.

3.4 Beispiele von EM-Störquellen

3.4.1 Primärenergiequelle

Die wahrscheinlichste Form einer Primärenergiequelle ist ein Akkumulatorsystem, da Hochspannungskondensatoren eine deutlich niedrigere Energiedichte aufweisen. Die Erzeugung von elektrischer Energie vor Ort mittels Stromerzeugeraggregaten wird als sehr unwahrscheinlich betrachtet, da diese Variante viel Schall und Wärme produziert und damit eine zu große Gefahr der Erkennung eines Angriffs darstellt. Zudem sind Lithium-Ionen-Akkumulatorsysteme die häufigste Form und überall auf dem Markt zu günstigen Preisen verfügbar. Durch die Nutzung in der Elektromobilität ist die Energiedichte ausreichend hoch, um starke EMP erzeugen zu können. Durch Serien- und Parallelschaltung können mehrere einzelne Akkumulator-Zellen kombiniert werden, um die Spannung und den Strom zu erhöhen. Die folgenden grünen Tabellen zeigen Bewertungen verschiedener Bauteile oder gesamter Systeme. Die Bewertungen erfolgen anhand der Kriterien Fachwissen (siehe Tab. 3.1), Verfügbarkeit (siehe Tab. 3.3) und Kosten (siehe Tab. 3.2). Tabelle 3.5 zeigt die Bewertung von gängigen Lithium-Ionen-Akkus.

Tab. 3.5 Bewertung Primärenergiequelle

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Lithium-Ionen-Akkumulatorsystem sind die am häufigsten verwendete Energiequelle in mobilen EMP-Störquellen
Fachwissen -Design	K=2	Die Auslegung eines Lithium-Ionen-Akkumulators erfordert Grundverständnis.
-Bau	K=2	Der Bau eines Akkumulatorpacks aus einzelnen Lithium-Ionen-Zellen erfordert Grundverständnis.
-Betrieb	K=1	Der Betrieb einer Primärenergiequelle aus Lithium-Ionen-Akkumulatoren erfordert Allgemeinwissen.
Verfügbarkeit -Komponenten	V=2	Lithium-Ionen-Zellen sind im Fachhandel erhältlich
-Primärenergiequelle	V=1-2	Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind je nach Kapazität im freien Handel, im Fachhandel oder im gewerblichen Handel bzw. in Online-Shops erhältlich
Kosten	F=1	Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind für weniger als 100 € erhältlich, leistungsstarke Varianten im gewerblichen Fachhandel für unter 1.000 €.

3.4.2 Hochspannungsquelle

Gängige Akkumulatorsysteme arbeiten im Bereich von 3 V – 48 V. Eine geringe Spannung dieser Größe muss auf ein deutlich höheres Spannungsniveau im kV-Bereich überführt werden, um einen EMP erzeugen zu können. Um die Spannung entsprechend zu erhöhen, wird ein Gleichspannungswandler benötigt. Die Leistung im System bleibt gleich. Da die Spannung im Ausgang deutlich erhöht wird, nimmt die Stromstärke in dem Verhältnis der Verstärkung ab. Die Spannung liegt im kV-Bereich, daher wird ein maximaler Strom höchstens im mA-Bereich vorliegen. Tabelle 3.6 zeigt die Bewertung der Hochspannungsquellen nach benötigtem Fachwissen, Verfügbarkeit der Komponenten sowie der Kosten für das Bauteil.

Tab. 3.6 Bewertung Hochspannungsquelle

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Eine Hochspannungsquelle besteht in den meisten Fällen aus Gleichspannungswandlerschaltungen, die die Eingangsspannung der Primärenergiequelle in eine höhere Ausgangsspannung umwandeln.
Fachwissen		
-Design	K=2	Das Design erfordert Grundkenntnisse.
-Bau	K=2-3	Der Bau einer Hochspannungsquelle erfordert Grundverständnis bis Fachkenntnisse.
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis.
Verfügbarkeit		
-Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich oder in Onlineshops.
-Hochspannungs-quelle	V=2-3	Gleichspannungswandler sind im Fachhandel oder im gewerblichen Fachhandel erhältlich.
Kosten		
	F=1-2	Einfache Gleichspannungswandler sind für unter 1.000 € erhältlich. Professionellere Geräte im gewerblichen Fachhandel sind für unter 10.000 € erhältlich.

3.4.3 Hochspannungsimpulsquelle

Um einen EMP zu erzeugen, muss die elektrische Energie über Kompressionsstufen zwischengespeichert werden, um die Leistung zu erhöhen und sie anschließend in einem kurzen Impuls mit hoher Spannung und hoher Stromstärke an den radio-frequency (RF)-Modulator abzugeben. Die Energie wird in einer Kompressionsstufe kapazitiv, induktiv oder hybrid aus beidem zwischengespeichert und über einen schnellen Schalter schließlich über den Hochfrequenzmodulator entladen. Um die Leistung zu erhöhen, können mehrere Kompressionsstufen in Reihe geschaltet werden. Laut /SAB 20/ gibt es vier Funktionsprinzipien, um eine Kompressionsstufe zu realisieren:

- Kompressionsstufe mit kapazitivem Energiespeicher und schließendem Schalter
- Kompressionsstufe mit induktivem Energiespeicher und öffnendem Schalter
- hybride Kompressionsstufe mit kapazitivem Energiespeicher und nachgeschaltetem induktivem Energiezwischenspeicher
- hybride Kompressionsstufe mit induktivem Energiespeicher und nachgeschaltetem kapazitiven Energiezwischenspeicher

Bei einem Marx-Generator (Bewertung siehe Tab. 3.7) bestehen die Energiespeicher aus Kondensatoren (kapazitiv). Die Kondensatoren werden in Parallelschaltung mit niedriger Spannung aufgeladen und, bei Betätigung des Schalters, in Reihenschaltung entladen. Dadurch werden die Spannungen addiert. Der Faktor der Verstärkung entspricht theoretisch der Anzahl der Kondensatorstufen.

Tab. 3.7 Bewertung Hochspannungsimpulsquelle Marx-Generator

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Marx-Generator als Hochspannungsimpulsquelle
Fachwissen		
-Design	K=2	Das Design erfordert Grundverständnis
-Bau	K=2	Der Bau erfordert Grundverständnis, Anleitungsvideos sind im Internet vorhanden
-Betrieb	K=1-2	Für den Betrieb sind Allgemeinwissen bis Grundverständnis erforderlich
Verfügbarkeit		
-Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Impulsquelle	V=2-3	Einfache Marx-Generatoren sind in Onlineshops verfügbar, leistungsstärkere Varianten im gewerblichen Fachhandel (MV)
Kosten	F=1-3	Die Preisspanne reicht von einfachen Marx-Generatoren für deutlich unter 1.000 € bis zu leistungsstarken für bis zu 100.000 €

Der Tesla-Transformator (Bewertung siehe Tab. 3.8) ist eine Hybridbauform bestehend aus einem kapazitiven und nachgeschalteten induktiven Energiespeicher, somit ist diese Form aufgebaut wie gekoppelte Schwingkreise. Die Sekundärspule ist meistens lang mit einer hohen Windungszahl von einigen hundert bis über tausend Windungen und liegt im Magnetfeld der kurzen Primärspule mit einer sehr geringen Windungszahl von unter zehn. Die Primärspule hat dementsprechend einen größeren Durchmesser, so dass die Primärspule innerhalb der Sekundärspule platziert werden kann und ein gemeinsamer Eisenkern aufgrund der Kopplung nicht nötig ist. Primär- und Sekundärspule werden so ausgelegt, dass sie die gleiche Resonanzfrequenz aufweisen. Das hohe Verhältnis der Windungen führt auf der Sekundärseite zu hohen Spannungen. Im Vergleich zum Marx-Generator arbeitet der Tesla-Transformator mit einer höheren Impulswiederholfrequenz, kann jedoch aufgrund der induktiven Speicherung der Energie diese nicht über einen längeren Zeitraum zwischenspeichern.

Tab. 3.8 Bewertung Hochspannungsimpulsquelle Tesla-Transformator

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Tesla-Transformator als Hochenergiequelle
Fachwissen-Design	K=2	Das Design eines Tesla-Transformators erfordert Grundverständnis
-Bau	K=2	Der Bau erfordert Grundverständnis
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit-Komponenten	V=2	Die benötigten Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Impulsquelle	V=2-3	Bausätze für Tesla-Transformatoren sind im Fachhandel erhältlich
Kosten	F=1-3	Einfache Tesla-Transformatoren sind für unter 1.000 € erhältlich, leistungsstärkere Varianten sind für unter 100.000 € im gewerblichen Fachhandel erhältlich.

Bei einem XRAM-Generator (Bewertung siehe Tab. 3.9) bestehen die Energiespeicher aus mehreren in Serie geschalteten Spulen, sind also induktiv. Beim Öffnen des Ladekreises und gleichzeitigem Schließen anderer Schalter werden die Spulen parallelgeschaltet und entladen sich. Dabei wird die Spannung reduziert, die Stromstärke jedoch um den gleichen Faktor vervielfacht. Daher ist der XRAM-Generator eine Hochstromquelle. Diese müsste mit einem Transformator umgewandelt werden, um eine Hochspannung zu erzeugen. XRAM-Generatoren werden derzeit erforscht und sind nicht auf dem freien Markt verfügbar.

Tab. 3.9 Bewertung Hochspannungsimpulsquelle XRAM-Generator

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		XRAM-Generator als Hochstromimpulsquelle
Fachwissen-Design	K=4	Das Design eines XRAM-Generators erfordert mindestens akademisches Wissen
-Bau	K=3	Der Bau erfordert Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit-Komponenten	V=2	Die benötigten Komponenten sind teilweise im Fachhandel erhältlich. Die übrigen Komponenten können selbst angefertigt werden.
-Impulsquelle	V=0	XRAM-Generatoren sind auf dem Markt nicht verfügbar
Kosten	F=2-3	Die Kosten für den Bau werden auf 10.000 € – 100.000 € geschätzt

Eine neue Entwicklung sind Halbleiter-Pulsgeneratoren (Bewertung siehe Tab. 3.10). Schnell schließende oder öffnende Schalter werden dabei durch Dioden ersetzt. Schalter können zwar hohe Spannungen und Stromstärken schalten, sind jedoch eingeschränkt, was die Wiederholungsrate der Impulse angeht. Hierbei bieten Dioden eine deutlich höhere Frequenz an Impulsen an. Halbleiter-Pulsgeneratoren funktionieren über den sogenannten Lawinendurchbruch. Eine in Sperrrichtung geschaltete Diode wird durch einen Kondensator bis fast an die Durchbruchspannung geladen. Bei Schließen eines Schalters entlädt sich der Kondensator und die Spannung an der Diode überschreitet die Durchbruchspannung. Die Diode wird durchlässig. Sind mehrere solcher Schaltungen hintereinandergeschaltet, wird durch den Durchbruch an der ersten Diode die nächste Stufe geschlossen. Ein weiterer Kondensator entlädt sich und die Durchbruchspannung an der nächsten Diode wird überschritten. Die Spannung wird durch den zweiten Kondensator verdoppelt. Dieses Prinzip lässt sich mehrfach hintereinanderschalten, so dass die Spannung am Ende dem Vielfachen der ursprünglichen Spannung entspricht.

Ein 20 MW Halbleiter-Leistungsmodulator-System wird von Dominik Bortis in seiner Dissertation /BOR 09/ beschrieben.

Tab. 3.10 Bewertung Hochspannungsimpulsquelle Halbleiter-Pulsgenerator

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Halbleiter-Pulsgenerator als Hochspannungsimpulsquelle
Fachwissen -Design	K=4	Das Design eines Halbleiter-Pulsgenerators erfordert akademisches Wissen
-Bau	K=2-3	Der Bau erfordert Grundverständnis bis Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit -Komponenten	V=2	Die benötigten Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Primärenergiequelle	V=3	Einfache Generatoren sind im gewerblichen Fachhandel erhältlich (bis ca. 50 kV)
Kosten	F=1-3	Einfache Generatoren sind für unter 1.000 € erhältlich. Leistungsstarke Generatoren können für unter 100.000 € erworben werden.

Um die Gefahr der EMP-Quellen besser abzuschätzen, sind die verschiedenen Impuls-generatoren nach Stärke und Größe zu betrachten. Neben der traditionellen Bauweise mit moderater Leistung können auch hochentwickelte Technologien verwendet werden, um die Leistung erheblich zu steigern. Nach der Berechnung von F. Sabath /SAB 20/ ergibt sich die in Tabelle 3.11 dargestellte Übersicht über ungefähre Leistung und Mobilität:

Tab. 3.11 Übersicht über Leistung und Mobilität von EMP-Quellen

Mobilität/Volumen	Traditionell durchschnittliche Leistung	Traditionell maximale Leistung	hochentwickelt
Hoch mobil	0,07-0,18 GW	0,25-0,7 GW	100-2000 GW
Sehr mobil	0,5-1,3 GW	2-5 GW	55000-1.200000 GW
Mobil	12-15 GW	40-60 GW	-
Leicht transportabel	20-40 GW	90-160 GW	-
Transportabel	90-250 GW	350-1000 GW	-

Für hochentwickelte Technologien wird jedoch ein hohes Maß an Fachkenntnis vorausgesetzt, da die Bauteile nur sehr eingeschränkt verfügbar sind und wahrscheinlich selbst gebaut werden müssen. Nach F. Sabath /SAB 20/ ergibt sich die in Tabelle 3.12 dargestellte Einschätzung über Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten:

Tab. 3.12 Kategorisierung nach Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten

Kriterium	Traditionell Durchschnitt	Traditionell Maximum	hochentwickelt
Fachwissen			
-Design	K=2-3	K=3	K=4-5
-Bau	K=2	K=2	K=4
-Betrieb	K=1-2	K=1-2	K=3
Verfügbarkeit			
-Komponenten	V=2	V=2	V=3-4
-Impulsgenerator	V=3	V=3	V=4
Kosten	F=1-2	F=2-3	F=3-4

Die traditionellen Generatoren werden mit den klassischen Bauteilen wie Spulen und Kondensatoren betrieben. Explosionsgetriebene Generatoren oder Generatoren mit hochentwickelten Materialien sind als „Hochentwickelt“ klassifiziert.

3.4.4 Hochfrequenzmodulator

Um den Wirkungsgrad des Signals aus dem Hochspannungsimpulsgenerator zu erhöhen und das Signal an den Frequenzbereich des Ziels anzupassen, muss das abzu-strahlende Signal in einem Hochfrequenzmodulator erzeugt werden. Nach /SAB 20/ sind die am häufigsten eingesetzten Modulatoren:

- Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)
- Magnetron
- Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)
- Klystron
- Leitungsresonatoren
- Switched Oscillator
- resonante Antennen

Im Folgenden werden die verschiedenen Hochfrequenzmodulatoren bewertet. Eine detailliertere technische Beschreibung der unterschiedlichen Hochfrequenzmodulatoren ist in der Habilitationsschrift von Sabath /SAB 20/ zu finden.

Der sogenannte VIRCATOR (Bewertung siehe Tab. 3.13) ist eine Vakuum-Elektronenröhre, die aufgrund ihrer geringen Effizienz industriell kaum eingesetzt wird. VIRCATORen sind einfach und robust aufgebaut. Die Hauptanwendung liegt im militärischen Bereich bei der elektronischen Kampfführung.

Tab. 3.13 Bewertung Virtual Cathode Oscillator

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		VIRCATOR
Fachwissen -Design	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen
-Bau	K=3	Der Bau erfordert Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit -Komponenten	V=2-3	Die meisten Bauteile sind im Fachhandel oder gewerblichen Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=0	VIRCATORen werden nicht im Handel angeboten, da häufig im militärischen Bereich eingesetzt
Kosten	F=2	Die Kosten für den Bau liegen bei unter 10.000 €
Frequenzbereich		0,3 – 10 GHz
Mobilität	M=1-3	Die Größe richtet sich nach der Wellenlänge des Signals

Das Magnetron (Bewertung siehe Tab. 3.14) ist ein weit verbreiteter Hochfrequenzmodulator, der als stabile und robuste Hochfrequenzquelle in den meisten handelsüblichen Mikrowellen verbaut ist. Auch in Radargeräten, in der Medizin und in industriellen Anwendungen wird das Magnetron häufig eingesetzt. Dadurch ist die Verbreitung sehr hoch und der Preis für einfache Geräte ist entsprechend niedrig. Das Magnetron ist für den Dauerbetrieb entwickelt. Industrielle Geräte verfügen über eine deutlich erhöhte Leistung bei geringfügig höherem Volumen und können auch im Impulsbetrieb arbeiten. Dabei kann jedoch eine externe Kühlung notwendig werden.

Tab. 3.14 Bewertung Magnetron

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Magnetron
Fachwissen -Design	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen
-Bau	K=3	Der Bau erfordert Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit -Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=1-2	Magnetrons sind am freien Markt und im Fachhandel erhältlich
Kosten	F=1-3	In Mikrowellen für deutlich unter 1.000 € erhältlich. Leistungsstarke Varianten sind für über 10.000 € erhältlich
Frequenzbereich		0,3 – 300 GHz
Mobilität	M=1-3	Die Größe des Magnetrons ist abhängig von der gewünschten Frequenz

Der MILO (Bewertung siehe Tab. 3.15) funktioniert ähnlich wie ein Magnetron. Der Aufbau ist jedoch linear und arbeitet im Vergleich zum Magnetron nicht mit einem externen Magnetfeld. Dadurch ist der MILO leicht und kompakt, benötigt jedoch sehr hohe Spannungen für den Betrieb. Der MILO kann elektromagnetische Felder im Gigawattbereich erzeugen. Aufgrund der geringen Effizienz wird der MILO jedoch nicht kommerziell vermarktet.

Tab. 3.15 Bewertung MILO

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		MILO
Fachwissen-Design	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen
-Bau	K=3	Der Bau erfordert Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit-Komponenten	V=2-3	Die Komponenten sind im Fachhandel oder im gewerblichen Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=0	MILOs sind nicht auf dem Markt erhältlich
Kosten	F=2	Die Kosten für den Bau liegen bei unter 10.000 €
Frequenzbereich		1 – 12 GHz
Mobilität	M=1-3	Die Größe des MILO ist abhängig von der gewünschten Frequenz

Das Klystron (Bewertung siehe Tab. 3.16) funktioniert über eine Modulation der Geschwindigkeit des Elektronenstrahls in einem Vakuum. Dadurch bilden sich unterschiedlich dichte Elektronenwolken. Dieser modulierte Elektronenstrahl wird durch einen oder mehrere Hohlraumresonatoren geführt und am Ende kann Hochfrequenzenergie entnommen werden. Das Klystron wirkt dadurch als Verstärker.

Tab. 3.16 Bewertung Klystron

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Klystron
Fachwissen-Design	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen
-Bau	K=3-4	Der Bau erfordert Fachkenntnisse bis akademisches Wissen
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit-Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=3	Klystrons sind im gewerblichen Fachhandel erhältlich
Kosten	F=3	Die Kosten liegen bei unter 100.000 €
Frequenzbereich		0,3 – 30 GHz
Mobilität	M=1-2	Die Größe des Klystrons ist abhängig von der gewünschten Frequenz

Die bisher betrachteten Hochfrequenzmodulatoren benötigen eine Speisespannung über einen Zeitraum von mindestens 100 ns. Schnellere Hochspannungsimpulse werden daher häufig ohne Hochfrequenzmodulatoren direkt an die Antenne gegeben. Für den Betrieb einer EMP-Störquelle kann es jedoch erforderlich sein, eine hohe Impuls-wiederholfrequenz zu erzeugen. Solche hochfrequenten Störsignale lassen sich mit Lei-tungsresonatoren (Bewertung siehe Tab. 3.17) generieren.

Tab. 3.17 Bewertung Leitungsresonator

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Leitungsresonator
Fachwissen		
-Design	K=3	Das Design erfordert Fachkenntnisse
-Bau	K=3	Der Bau erfordert Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit		
-Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=1-2	Leitungsresonatoren sind nicht auf dem Markt erhältlich
Kosten	F=2	Die Kosten für den Bau liegen bei unter 10.000 €
Frequenzbereich		1 – 12 GHz
Mobilität	M=1-3	Die Größe des Leitungsresonators ist abhängig von der gewünschten Frequenz

Der Switched Oscillator stellt eine Weiterentwicklung des zuvor dargestellten Leitungsresonators dar. Der Switched Oscillator besteht aus einer Resonanzleitung der Länge $\lambda/4$, ein Viertel der operativen Wellenlänge, mit einer Antenne am Ende. Aufgeladen wird die Schaltung durch eine Hochspannungsquelle mit einem schnell schließenden Schalter, zum Beispiel einer Funkenstrecke. Zunächst wird die Schaltung mit Antenne als Kapazität betrieben und aufgeladen. Nach Überschreitung der Schaltschwelle des Schalters schließt dieser und erzeugt eine Spannungswelle.

Tab. 3.18 Bewertung Switched Oscillator

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Switched Oscillator
Fachwissen -Design	K=2-3	Das Design erfordert Grundverständnis bis Fachkenntnisse
-Bau	K=2-3	Der Bau erfordert Grundverständnis bis Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit -Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=4	Switched Oscillator sind nur eingeschränkt im gewerblichen Fachhandel erhältlich
Kosten	F=1-3	Die Kosten liegen bei unter 100.000 € im Handel. Die Bauteile sind für unter 1.000 € erhältlich
Frequenzbereich		0,03 – 2 GHz
Mobilität	M=1-3	Die Größe des Switched Oscillator ist abhängig von der gewünschten Frequenz

Die bisher beschriebenen und bewerteten Hochfrequenzmodulatoren funktionieren getrennt von der Antenne. Alternativ kann der Switched Oscillator in die Antennenstruktur integriert werden. In dieser Anordnung funktioniert die Antenne zusätzlich als Energiespeicher und als impulsformende Schaltung. So entsteht eine kompaktere EMP-Störquelle (Antennenoszillatoren, Bewertung siehe Tab. 3.19).

Tab. 3.19 Bewertung Antennenoszillatoren

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Antennenoszillatoren
Fachwissen-Design	K=1-3	Das Design erfordert Allgemeinwissen bis Fachkenntnisse
-Bau	K=2-3	Der Bau erfordert Grundverständnis bis Fachkenntnisse
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit-Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=0	Antennenoszillatoren sind nicht im Handel erhältlich
Kosten	F=1-3	Die Kosten für ein Gesamtsystem liegen bei unter 100.000 € im Handel. Die Bauteile sind für unter 1.000 € erhältlich
Frequenzbereich		0,03 – 1 GHz
Mobilität	M=1-4	Die Größe des Antennenoszillators ist abhängig von der gewünschten Frequenz

Die aufgezeigten Hochfrequenzmodulatoren stellen eine nicht vollständige Übersicht dar, diese beinhaltet jedoch die gängigsten Varianten. Allgemein lassen sich EMP-Störquellen anhand des Hochfrequenzmodulators weiter einteilen in das Frequenzband. EMP-Störquellen mit Frequenzmodulator haben entsprechend schmal- oder breitbandige Hochfrequenzmodulatoren verbaut. Impulsabstrahlende EMP-Störquellen sind ohne Hochfrequenzmodulator konstruiert. Zu den schmalbandigen Hochfrequenzmodulatoren zählen VIRCATOR, Magnetron, MILO und Klystron. Die breitbandigen umfassen Leitungsresonator, Switched Oscillator und Antennenoszillator.

Ein Blick in die Charakterisierung zeigt, dass für schmalbandige Hochfrequenzmodulatoren ein sehr hoher Grad an Fachwissen für den Bau und das Design vorhanden sein muss, während der Betrieb nahezu keine Anforderungen umfasst. Die marktverfügbaren Varianten (Magnetron und Klystron) besitzen eine geringe Leistung (bis ca. 0,5 GW), stärkere Varianten (bis ca. 10 GW) werden eher auftragsbezogen für spezielle Unternehmen oder Universitäten/Forschungseinrichtungen gebaut. Für eine solche EMP-

Störquelle hoher Energie muss höchstwahrscheinlich ein Eigenbau verwendet werden. Die Bauteile sind im Fachhandel verfügbar. Bei der Betrachtung der breitbandigen Hochfrequenzmodulatoren fällt auf, dass auch hier für das Design und den Bau ein gewisser Grad an Fachwissen erforderlich ist. Insgesamt betrachtet sind die Anforderungen etwas geringer als bei den schmalbandigen Hochfrequenzmodulatoren. Bei dem Betrieb sind die Anforderungen ebenfalls sehr niedrig. Der Leitungsresonator stellt die einzige marktverfügbare Variante dar. Auch hier ist dies die schwächere Variante (bis ca. 0,5 MW). Die deutlich stärkeren Varianten Switched Oscillator (bis ca. 1 GW) und Antennenoszillator (bis ca. 10 GW) sind nicht oder nur sehr eingeschränkt auf dem Markt verfügbar. Die Tabelle 3.20 zeigt eine kurze Übersicht über die gängigen Hochfrequenzmodulatoren nach Frequenzband und Verfügbarkeit.

Tab. 3.20 Übersicht Hochfrequenzmodulatoren

	Schmalband		Breitband	
	niedrige Leistung	Hohe Leistung	niedrige Leistung	Hohe Leistung
Marktverfügbar	<u>MS-1</u> Konventionelles Magnetron	<u>MS-2</u> Konventionelles Klystron	<u>MB-1</u> Leitungsresonator	
Spezial-/Eigenbau	<u>ES-1</u> Relativistisches Magnetron	<u>ES-2</u> Relativistisches Klystron	<u>EB-1</u> Antennenoszillator	<u>EB-2</u> Switched Oscillator

3.4.5 Impulsformende Schaltung für Impulsabstrahlende Quellen

Impulsabstrahlende EMP-Störquellen werden ohne Hochfrequenzmodulator konstruiert. Dennoch kann eine impulsformende Schaltung (Bewertung siehe Tab. 3.21) zwischen die Hochspannungsquelle und die Antenne geschaltet werden, um die Parameter des elektromagnetischen Feldes anzupassen. So kann der Anstieg der Spannungsflanke erhöht werden.

Tab. 3.21 Bewertung Impulsformende Schaltung

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Impulsformende Schaltung
Fachwissen		
-Design	K=2	Das Design erfordert Grundverständnis
-Bau	K=2	Der Bau erfordert Grundverständnis
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit		
-Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Modulator	V=0	Pulsformende Schaltungen sind nicht auf dem Markt erhältlich
Kosten	F=1	Die Kosten für den Bau liegen bei unter 1.000 €
Mobilität	M=2	

3.4.6 Antennensysteme

Um die Hochfrequenzsignale in eine abstrahlende elektromagnetische Welle umzuwandeln ist eine Antenne erforderlich. Neben dem einfachen Draht mit entsprechend niedriger Effizienz gibt es verschiedene Varianten von Antennen. Durch die Anpassung der Baugröße an die Wellenlänge kann die Effizienz und sogar die Reichweite erhöht werden. Da Antennen in vielen Bereichen eingesetzt werden, gibt es viele marktverfügbare Arten. Allerdings sind alle Antenne für den speziellen Einsatz konzipiert und haben in dem für ihren Einsatzbereich erforderlichen Spektrum die höchste Effizienz. Die am häufigsten verwendeten Antennentypen sind laut /SAB 20/:

- Dipolantenne
- Konusantenne
- Hornantenne
- Reflektor-Antenne
- Impulsabstrahlende Reflektor-Antenne
- TEM-Hornantenne
- Slotted Waveguide Antenne

Antennen (siehe Abb. 3.7) können als Gruppe (Array) verwendet werden, um die Richtwirkung zu erhöhen. Die einfachsten Antennenformen sind die Dipol- und die Konusantenne.

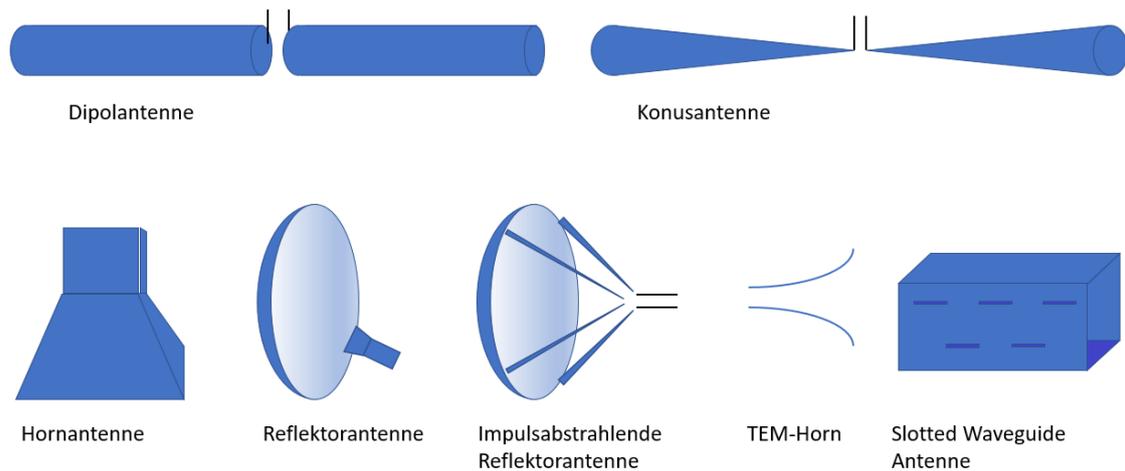


Abb. 3.7 Schematische Darstellung verschiedener Antennentypen

Die in Abbildung 3.7 dargestellten Antennenformen werden in Tabelle 3.22 nach dem für die Konstruktion erforderlichen Fachwissen kategorisiert. Außer Dipol- und Konusantenne wird jeweils ein höheres Fachwissen benötigt. Damit sind Dipol- und Konusantenne die wahrscheinlichsten Formen.

Tab. 3.22 Kategorisierung von Antennen nach erforderlichen Kenntnissen

Antenne	Kategorie	Beschreibung
Dipolantenne	K=2	Das Design erfordert Fachkenntnisse
Konusantenne	K=2	Das Design erfordert Fachkenntnisse
Hornantenne	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen
Reflektorantenne	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen
Impulsabstrahlende Reflektorantenne	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen
TEM-Hornantenne	K=3	Das Design erfordert Fachkenntnisse
Slotted Waveguide Antenne	K=4	Das Design erfordert akademisches Wissen

In Tabelle 3.23 werden die Antennen weiter nach Fachwissen, Verfügbarkeit, Kosten und Mobilität kategorisiert.

Tab. 3.23 Kategorisierung von Antennen

Kriterium	Kategorie	Beschreibung
Technologie		Antennen
Fachwissen		
-Design	K=2-4	Siehe Tabelle 3.22
-Bau	K=2	Der Bau erfordert Grundverständnis
-Betrieb	K=1-2	Der Betrieb erfordert Allgemeinwissen bis Grundverständnis
Verfügbarkeit		
-Komponenten	V=2	Die Komponenten sind im Fachhandel erhältlich
-Antenne	V=2	Verschiedene Antennen sind im Fachhandel erhältlich
Kosten	F=1-2	Die Kosten für den Bau liegen bei unter 1.000 €, Die Kosten für handelsübliche Antennen liegen bei unter 10.000 €
Mobilität	M=1-3	Die Größe ist abhängig von der Antenne und vom Frequenzbereich

3.4.7 EMP-Störquelle

Um eine EMP-Störquelle (siehe Abb. 3.8) zu bauen, werden die in Kapitel 3.4.1 bis 3.4.6 beschriebenen Komponenten benötigt und müssen zusammengebaut werden. Je nach Fachwissen und finanziellen Mitteln können entsprechend starke Quellen generiert werden. Die meisten Bauteile sind verfügbar und kostengünstig. Leistungsstärkere Varianten benötigen jedoch jeweils höhere Kenntnisse und finanzielle Mittel.

Beim Bau einer EMP-Störquelle hängt die Leistung von der Baugröße und somit auch von der Mobilität ab. Die Gesamtgröße der Störquelle ist für den Faktor der Mobilität und somit für den Einsatzort bestimmend. Die Größe der Energiequelle, bestehend aus Primärenergie- und Hochspannungsquelle, ist maßgebend für die verfügbare Energie und für die Betriebsdauer, allerdings auch für das Gesamtgewicht und damit auch für die Mobilität (maximale Nutzlast von Fahrzeugen). Bei kleinvolumigen Systemen kann die Ausgangsleistung zu gering sein, um technische Systeme zu zerstören. In diesem Fall wird ein repetierender Betrieb, das bedeutet mehrere Impulse über einen längeren Zeitraum, angestrebt.

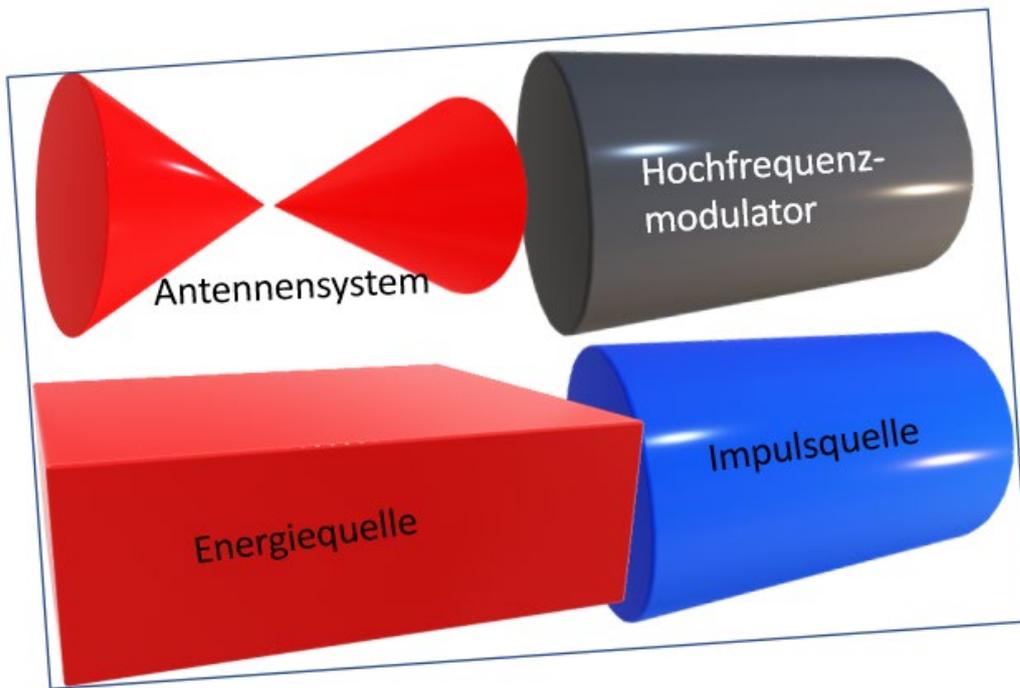


Abb. 3.8 Schematischer Aufbau einer EMP-Störquelle

Zudem kann bei EMP-Störsendern geringer Größe meistens die Impulsquelle nicht die maximal mögliche Ausgangsleistung erzeugen. In der Praxis werden Energiequelle und Impulsquelle von der Baugröße gleich groß ausgelegt. Die maximal erreichbare Leistung in diesem Fall ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 3.24 Baugröße der Impulsquelle für maximale Ausgangsleistung des Hochfrequenzmodulators

	Max. Leistung in MW	Baugröße in $10^{-3}m^3$
MS-1	10	1
MS-2	500	100
MB-1	0,5	0,05
ES-1	1.000	550
ES-2	10.000	5.500
EB-1	10	1,5
EB-2	1.000	250

Zum Bau einer mobilen EMP-Störquelle bedarf es einiger Anpassungen. Die maximale Leistung eines Hochfrequenzmodulators kann meistens aufgrund der Gesamtgröße des Systems (Energiequelle, Impulsquelle, Hochfrequenzmodulator und Antennensystem) nicht erreicht werden. So muss bei gegebener Größe das System optimiert werden. Impulsquelle und Energiequelle werden meistens gleich groß gebaut. Häufige Varianten sind die Aufteilung der vier Baugruppen in gleichgroße Viertel oder die Aufteilung in Sechstel, wobei Energiequelle und Impulsquelle jeweils zwei Sechstel und Antenne und

Hochfrequenzmodulator jeweils ein Sechstel der Baugröße bilden. Es gibt auch Varianten, in denen Impulsquelle und Energiequelle in der Antenne (Dipol- oder Konusantenne) integriert wird. Jedoch ist die Leistung dieser Variante eher gering (< 10 MW).

Nun werden generische EMP-Störquellen als Ganzes betrachtet und anhand der bisher betrachteten Eigenschaften nach Wahrscheinlichkeit des Besitzes und der Verwendung durch einen potenziellen Täter charakterisiert. Beispielhaft werden für verschiedene Baugrößen mögliche EMP-Störquellen aufgeführt. Die dargestellten Wahrscheinlichkeiten in den Beispielen Mobilität 1 – 3 (Siehe Abb. 3.9, 3.10 und 3.11) sind Schätzungen verschiedener Experten aus /SAB 20/. Die Beispiele 4 und 5 sind auf den Berechnungsgrundlagen von /SAB 20/ aufbauend und die Schätzungen basieren auf den vorangegangenen Daten. Diese Studie beschränkt sich auf die Werte der verschiedenen Beispiele. Die Formeln sowie die Herleitungen für die Berechnungen können ebenfalls in /SAB 20/ nachgelesen werden.

Mobilität 1: Beispiel einer EMP-Störquelle in einer Kaffeedose

In diesem Beispiel wird eine hochmobile EMP-Störquelle betrachtet, die in einem Alltagsgegenstand (Zylinder, Höhe ca. 175 mm, Durchmesser ca. 120 mm, vergleiche Abb. 3.9) versteckt werden kann.



Abb. 3.9 Beispiel einer kleinen Dose als Behälter für eine EMP-Störquelle, Quelle: Monster_Design/Shutterstock.com

Die Leistung wird aufgrund der geringen Baugröße und des damit verbundenen geringen Energiespeichers relativ niedrig sein, allerdings kann dieser Gegenstand möglicherweise in unmittelbarer Nähe zum Ziel aktiviert werden. Die Grenze für das erforderliche Fachwissen wird auf Grundverständnis ($K = 2$) begrenzt. Als Hochfrequenzmodulator wird ein Antennenoszillator gewählt. Dieser besitzt eine kompakte Bauform und eine maximale Ausgangsleistung von bis zu 10 MW. Aufgrund des Grundverständnisses wird keine Hochleistungstechnologie angenommen. Mit der Wahl des Hochfrequenzmodulators wird die Integration der Bauteile Impulsquelle und Energiequelle in die Antenne angenommen. Bei dieser Baugröße und Variante wird mit einem Wirkungsgrad von ca. 50 % nach /SAB 20/ eine Impulsleistung von 3,5 MW und eine Feldstärke von

$$E_{max} * r = 13 \text{ kV}$$

erreicht. Die geschätzten Wahrscheinlichkeiten sowie die Bewertungen von Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten sind in der Tabelle 3.25 dargestellt. Ausschlaggebend für die Wahrscheinlichkeiten ist die sehr geringe Baugröße und die Verfügbarkeit der kleinen Impulsquelle.

Tab. 3.25 Wahrscheinlichkeit für den Bau einer EMP-Störquelle in einer Kaffeedose

System 1: Kaffeedose			Kumulierte Wahrscheinlichkeit
Mobilität	M=1	Ca. 175 mm hoch, Radius ca. 60 mm	
Fachwissen	K=2	Grundverständnis für Integration	50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=1	Marktverfügbar	90 %-97 %
Kosten	F=1	Kosten <10 €	90 %-97 %
Wahrscheinlichkeit der Plattform			50 %-75 %
Primärenergie und Hochspannungsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=2		25 %-50 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit der Energiequelle			25 %-50 %
Impulsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=3		5 %-12 %
Kosten	F=2		12 %-25 %
Wahrscheinlichkeit der Impulsquelle			5 %-12 %
Hochfrequenzmodulator			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=2		25 %-50 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit des Hochfrequenzmodulators			25 %-50 %
Antenne entfällt, da Bestandteil des Antennenoszillators			
Impulsleistung	3,5 MW		
Elektrisches Feld	13 kV		$E_{max} * r$
Wahrscheinlichkeit, dass ein Angreifer über das Gesamtsystem verfügen kann			5 %-12 %

Die Gesamtwahrscheinlichkeiten werden in diesen Beispielen nicht multipliziert, sondern als Minimum der Einzelwahrscheinlichkeiten betrachtet, da die Aspekte Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten teilweise korrelieren. Die Impulsquelle ist in diesem System der bestimmende Faktor.

Mobilität 2: Beispiel einer EMP-Störquelle in einem Aktenkoffer

Im zweiten Beispiel einer generischen EMP-Störquelle wird die Integration in einem größeren Alltagsgegenstand (Aktenkoffer, vergleiche Abb. 3.10) betrachtet.



Abb. 3.10 Beispiel eines Aktenkoffers als Behälter für eine EMP-Störquelle, Quelle: CapturePB/Shutterstock.com

Als Hochfrequenzmodulator wird ein handelsübliches Magnetron verwendet. Design und Bau sind somit nicht erforderlich. Die Fachkenntnisse werden auf Grundverständnis begrenzt. Der Nachteil eines handelsüblichen Magnetrons ist die geringe Ausgangsleistung von maximal 10 MW. Aufgrund der geringen Ausgangsleistung kann die Baugröße der Energiequelle, der Hochspannungsquelle und der Impulsquelle gering ausfallen. Der Hochfrequenzmodulator kann mit maximaler Leistung betrieben werden. Die geschätzten Wahrscheinlichkeiten sowie die Bewertungen von Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten sind in der Tabelle 3.26 dargestellt.

Tab. 3.26 Wahrscheinlichkeit für den Bau einer EMP-Störquelle in einem Aktenkoffer

System 2: Aktenkoffer			Kumulierte Wahrscheinlichkeit
Mobilität	M=2	Maße ca. 460 mm*350 mm*205 mm	
Fachwissen	K=1	Grundverständnis für Integration	90 %-97 %
Verfügbarkeit	V=1	Marktverfügbar	75 %-90 %
Kosten	F=1	Kosten <100 €	90 %-97 %
Wahrscheinlichkeit der Plattform			75 %-90 %
Primärenergie und Hochspannungsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=2		25 %-50 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit der Energiequelle			25 %-50 %
Impulsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=2		25 %-50 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit der Impulsquelle			25 %-50 %
Hochfrequenzmodulator			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=2		25 %-50 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit des Hochfrequenzmodulators			25 %-50 %
Antenne (Hornantenne)			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=1		25 %-50 %
Kosten	F=1		90 %-97 %
Wahrscheinlichkeit der Antenne			25 %-50 %
Impulsleistung	10 MW		
Elektrisches Feld	58 kV		$E_{max} * r$
Wahrscheinlichkeit, dass ein Angreifer über das Gesamtsystem verfügen kann			25 %-50 %

In diesem System ist die Baugröße deutlich größer als im System 1, was die Einschränkung auf sehr kompakte Bauteile entfernt. Durch die Verwendung eines handelsüblichen Magnetrons erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Impulsquelle und auch des Gesamtsystems.

Mobilität 2: Beispiel einer EMP-Störquelle in einem Transportkoffer

In diesem Beispiel wird eine EMP-Störquelle in einem Koffer vergleichbarer Größe zum zweiten Beispiel (Abb. 3.11), jedoch mit einem erheblich stärkeren Hochfrequenzmodulator, beschrieben.



Abb. 3.11 Transportkoffer als Behälter für eine EMP-Störquelle, Quelle: Josep Curto/Shutterstock.com

In dieser generischen EMP-Störquelle wird ein Switched Oscillator verwendet. Die Baugröße der einzelnen Bauteile wird wie oben beschrieben in Sechstel aufgeteilt. Energiequelle und Impulsquelle füllen jeweils ein Drittel des Volumens, Hochfrequenzmodulator und Antenne jeweils ein Sechstel. Die geschätzten Wahrscheinlichkeiten sowie die Bewertungen von Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten sind in der Tabelle 3.27 dargestellt. Aufgrund der stärkeren Impulsquelle sinkt die Verfügbarkeit, was sich auf die Wahrscheinlichkeit auswirkt.

Tab. 3.27 Wahrscheinlichkeit für den Bau einer EMP-Störquelle in einem Transportkoffer

System 3: Transportkoffer			Kumulierte Wahrscheinlichkeit
Mobilität	M=2	Maße ca. 500 mm*410 mm*200 mm	
Fachwissen	K=1	Grundverständnis für Integration	90 %-97 %
Verfügbarkeit	V=1	Marktverfügbar	75 %-90 %
Kosten	F=1	Kosten ca. 300 €	90 %-97 %
Wahrscheinlichkeit der Plattform			75 %-90 %
Primärenergie und Hochspannungsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=3		12 %-25 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit der Energiequelle			12 %-25 %
Impulsquelle			
Fachwissen	K=3		25 %-50 %
Verfügbarkeit	V=3		12 %-25 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit der Impulsquelle			12 %-25 %
Hochfrequenzmodulator			
Fachwissen	K=2-3		25 %-50 %
Verfügbarkeit	V=2		25 %-50 %
Kosten	F=2		25 %-50 %
Wahrscheinlichkeit des Hochfrequenzmodulators			25 %-50 %
Antenne (Konusantenne)			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=2		75 %-90 %
Kosten	F=1		90 %-97 %
Wahrscheinlichkeit der Antenne			50 %-75 %
Impulsleistung	310 MW		
Elektrisches Feld	124 kV 227 kV	Ohne Reflektor Mit Reflektor	$E_{max} * r$
Wahrscheinlichkeit, dass ein Angreifer über das Gesamtsystem verfügen kann			12 %-25 %

Diese Variante wurde in ähnlicher Bauform durch die Firma Diehl Defence gebaut und stellt damit ein reales System dar.

Mobilität 3: Beispiel einer EMP-Störquelle in einem handelsüblichen Fahrzeug

In dieser Variante wird eine EMP-Störquelle beschrieben, die aufgrund der Größe deutlich höhere Leistungen erzielt, jedoch in einigem Abstand betrieben werden muss. Aufgrund der höheren Leistung sind die Auswirkungen auf einen größeren Bereich ausgeht. Als Trägerplattform wird der Kofferraum eines Kombinationskraftwagen, kurz: Kombi, (Abb. 3.12) gewählt.



Abb. 3.12 Beispiel eines Kombinationskraftwagen als Träger einer EMP-Störquelle, Quelle: LIAL/Shutterstock.com

Das Kofferraumvolumen beträgt mindestens 500 l bis zu ca. 2.000 l bei Mitnutzung der hinteren Sitzreihe. In diesem Beispiel wird ein Kofferraumvolumen von 800 l, aufgeteilt in Viertel, angenommen. Ein 10 kWh Speicher mit ungefähr 200 l Volumen hat ein Gewicht von ca. 170 kg und stellt damit keine Einschränkung des Gesamtgewichts dar. Weiterhin wird in dieser Variante ein relativistisches Klystron mit höchster Leistung angenommen. Dadurch wird ein sehr hoher Kenntnisstand erforderlich. Die geschätzten Wahrscheinlichkeiten sowie die Bewertungen von Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten sind in der Tabelle 3.28 dargestellt. Das relativistische Klystron ist ausschlaggebend für die geringe Wahrscheinlichkeit, bietet jedoch eine sehr hohe Leistung.

Tab. 3.28 Wahrscheinlichkeit für den Bau einer EMP-Störquelle im Kofferraum eines Kombinationskraftwagen

System 4: Transportkiste in Kfz			Kumulierte Wahrscheinlichkeit
Mobilität	M=3	Kombinationskraftwagen	
Fachwissen	K=1	Grundverständnis für Integration	90 %-97 %
Verfügbarkeit	V=1	Marktverfügbar	75 %-90 %
Kosten	F=2	Kosten Gebraucht-Kfz: <10.000 €	50 %-75 %
Wahrscheinlichkeit der Plattform			50 %-75 %
Primärenergie und Hochspannungsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=3		12 %-25 %
Kosten	F=3		12 %-25 %
Wahrscheinlichkeit der Energiequelle			12 %-25 %
Impulsquelle			
Fachwissen	K=3		5 %-12 %
Verfügbarkeit	V=3		5 %-12 %
Kosten	F=3		2 %-5 %
Wahrscheinlichkeit der Impulsquelle			2 %-5 %
Hochfrequenzmodulator			
Fachwissen	K=4		0,5 %-1 %
Verfügbarkeit	V=3		5 %-12 %
Kosten	F=3		2 %-5 %
Wahrscheinlichkeit des Hochfrequenzmodulators			0,5 %-1 %
Antenne (Konusantenne)			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=2		75 %-90 %
Kosten	F=1		90 %-97 %
Wahrscheinlichkeit der Antenne			50 %-75 %
Impulsleistung	2,19 GW	40 % Wirkungsgrad rel. Klystron	
Elektrisches Feld	328 kV 590 kV	Ohne Reflektor Mit Reflektor	$E_{max} * r$
Wahrscheinlichkeit, dass ein Angreifer über das Gesamtsystem verfügen kann			0,5 %-1 %

Trotz des sehr hohen geforderten Kenntnisstandes für den Bau eines Hochfrequenzmodulators der entsprechenden Leistung mit einer Wahrscheinlichkeit von < 0,5 % wird die Wahrscheinlichkeit aufgrund der Möglichkeit des Online-Kenntniserwerbs leicht erhöht.

Mobilität 4: Beispiel einer EMP-Störquelle in einem Kleintransporter

Als nächstes Beispiel wird eine EMP-Störquelle in einem Kleintransporter (Abb. 3.13) betrachtet.



Abb. 3.13 Bild eines handelsüblichen Kleintransporters als Träger einer EMP-Störquelle, Quelle: Andrei Kuzmik/Shutterstock.com

Diese generische EMP-Störquelle kann nur in größerem Abstand zum Ziel zur Wirkung kommen, ermöglicht jedoch aufgrund der nochmals höheren Baugröße eine deutlich höhere Leistung. Als Beispiel wird ein Kastenwagen mit einem Ladevolumen von $11,5 \text{ m}^3$ (Beispiel Ford Transit; Laderaum: $1894 \times 1784 \times 3396 \text{ mm}$, $h \times b \times t$) oder 13 m^3 (Beispiel Mercedes Sprinter lang; Laderaum: $1930 \times 1870 \times 4070 \text{ mm}$, $h \times b \times t$) betrachtet. Das Volumen der Plattform wird mit 8 m^3 angenommen. Damit erhöht sich das Gesamtgewicht der Energiequelle auf ca. 1,5 t. Aufgrund der Bauweise des Fahrzeuges sollte dies jedoch kein Problem darstellen. Die Baugruppen sind identisch mit den Baugruppen im System Nr. 4, lediglich die Baugröße der einzelnen Komponenten und damit die möglichen Leistungsparameter werden erhöht. Die geschätzten Wahrscheinlichkeiten sowie die Bewertungen von Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten sind in der Tabelle 3.29 dargestellt. Auch in diesem System stellt das relativistische Klystron den ausschlaggebenden Faktor für die Gesamtwahrscheinlichkeit dar.

Tab. 3.29 Wahrscheinlichkeit für den Bau einer EMP-Störquelle auf der Ladefläche eines Kleintransporters

System 5: Kleintransporter			Kumulierte Wahrscheinlichkeit
Mobilität	M=4	Maße 4070 mm*1870 mm*1930 mm	
Fachwissen	K=1	Grundverständnis für Integration	90 %-97 %
Verfügbarkeit	V=1	Im Autohaus oder Autovermietung	75 %-90 %
Kosten	F=1-2	Mietfahrzeug oder kaufen (gebraucht für unter 10.000 € erhältlich)	50 %-90 %
Wahrscheinlichkeit der Plattform			50 %-75 %
Primärenergie und Hochspannungsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=3		12 %-25 %
Kosten	F=4		1 %-2 %
Wahrscheinlichkeit der Energiequelle			1 %-2 %
Impulsquelle			
Fachwissen	K=3		5 %-12 %
Verfügbarkeit	V=3		5 %-12 %
Kosten	F=3		2 %-5 %
Wahrscheinlichkeit der Impulsquelle			2 %-5 %
Hochfrequenzmodulator			
Fachwissen	K=4		0,5 %-1 %
Verfügbarkeit	V=3		5 %-12 %
Kosten	F=4		1 %-2 %
Wahrscheinlichkeit des Hochfrequenzmodulators			0,5 %-1 %
Impulsleistung	16,5 GW	40 % Wirkungsgrad rel. Klystron	
Elektrisches Feld	900 kV 1600 kV	Ohne Reflektor Mit Reflektor	$E_{max} * r$
Wahrscheinlichkeit, dass ein Angreifer über das Gesamtsystem verfügen kann			0,5 %-1 %

Der Hochfrequenzmodulator dieser Stärke ist das bestimmende Bauteil für die sehr geringe Wahrscheinlichkeit, da ein sehr hohes Fachwissen erforderlich ist.

Mobilität 5: Beispiel einer EMP-Störquelle in einem LKW

Im letzten Beispiel (Abb. 3.14) wird die größtmögliche transportable EMP-Störquelle betrachtet. Das Transportvolumen eines LKW kann bis zu 77 m³ betragen.



Abb. 3.14 Beispiel eines LKW mit Container als Träger einer EMP-Störquelle, Quelle: Siwakorn1933/Shutterstock.com

Durch die hohe Zuladung kann eine entsprechend große Energiequelle mitgeführt werden. Die Bauteile sind in dieser Variante identisch mit den beiden vorangegangenen Beispielen. Dabei wurde eine möglichst große Bauteilgröße gewählt, um einen leistungsstarken EMP erzeugen zu können. Da das Antennensystem bei dieser Größenordnung nicht in dem Maße Volumen beansprucht, wird ein Großteil des verfügbaren Volumens durch die Energiequelle und den Hochfrequenzmodulator veranschlagt. Für beide Teilsysteme werden jeweils 25 m³ eingeplant, um die Leistung zu berechnen. Das Gesamtgewicht der Energiequelle würde bei diesem Volumen geschätzt bei 20 t liegen. Die geschätzten Wahrscheinlichkeiten sowie die Bewertungen von Fachwissen, Verfügbarkeit und Kosten sind in der Tabelle 3.30 dargestellt. Auch in diesem System stellt das relativistische Klystron die Gesamtwahrscheinlichkeit dar. Ein weiterer wichtiger Faktor sind die deutlich höheren Kosten im Vergleich zu den vorangegangenen Systemen.

Tab. 3.30 Wahrscheinlichkeit für den Bau einer EMP-Störquelle auf der Ladefläche eines LKW

System 6: Lastkraftwagen			Kumulierte Wahrscheinlichkeit
Mobilität	M=4	Maße 13566 mm*2438 mm*2695 mm (45 ')	
Fachwissen	K=1	Grundverständnis für Integration	90 %-97 %
Verfügbarkeit	V=2	Im Fachhandel (online) erhältlich	75 %-90 %
Kosten	F=3	Container 45 ' für unter 5.000 € Sattelzug gebraucht für unter 100.000 € erhältlich	2 %-5 %
Wahrscheinlichkeit der Plattform			2 %-5 %
Primärenergie und Hochspannungsquelle			
Fachwissen	K=2		50 %-75 %
Verfügbarkeit	V=3		12 %-25 %
Kosten	F=4		1 %-2 %
Wahrscheinlichkeit der Energiequelle			1 %-2 %
Impulsquelle			
Fachwissen	K=3		5 %-12 %
Verfügbarkeit	V=3		5 %-12 %
Kosten	F=3		1 %-2 %
Wahrscheinlichkeit der Impulsquelle			1 %-2 %
Hochfrequenzmodulator			
Fachwissen	K=4		0,5 %-1 %
Verfügbarkeit	V=3		5 %-12 %
Kosten	F=4		<0,5 %
Wahrscheinlichkeit des Hochfrequenzmodulators			<0,5 %
Impulsleistung	~150 GW	40 % Wirkungsgrad rel. Klystron	
Elektrisches Feld	~2,7 MV ~4,9 MV	Ohne Reflektor Mit Reflektor	$E_{max} * r$
Wahrscheinlichkeit, dass ein Angreifer über das Gesamtsystem verfügen kann			<0,5 %

Dieses System stellt die stärkste mobile Variante dar. Das relativistische Klystron ist aufgrund des sehr hohen erforderlichen Fachwissens ausschlaggebend für die geringe Wahrscheinlichkeit. Ein solches System fällt jedoch schon aufgrund der Größe frühzeitig auf.

Alle berechneten Leistungsdaten sind theoretische Angaben ohne Anspruch auf Korrektheit. Die tatsächliche Leistung hängt dabei von vielen Faktoren ab und kann aufgrund nicht sorgfältig geführter Arbeit auch deutlich niedriger oder aufgrund neuartiger Technik sogar höher ausfallen. Die Beispiele sollen einen Anhalt über generische EMP-Störquellen darstellen, um die Gefahr und damit die Schutzmöglichkeiten besser einschätzen zu können.

3.5 Erkennen von Angriffen mit EMP

Im Gegensatz zu physischen Angriffen lassen sich Angriffe mit elektromagnetischen Wellen nicht direkt erkennen. Elektromagnetische Wellen sind, außer LASER, deren Frequenz im Bereich des sichtbaren Lichts liegt, nicht direkt mit den menschlichen Organen wahrnehmbar und lassen sich nicht lokalisieren. Lediglich elektrische und elektronische Geräte werden durch die Strahlung beeinflusst. Ein Ausfall von technischen Sicherungseinrichtungen kann auch andere Ursachen als einen elektromagnetischen Angriff haben. Zudem sind die Angriffe je nach verwendetem EMP-Generator lokal beschränkt. Jedoch fallen nicht nur die Sicherungseinrichtungen aus, sondern voraussichtlich alle elektrischen und elektronischen Geräte wie Funkgeräte und Mobiltelefone. Anders verhält es sich, wenn der EMP so stark ist, dass es zur Entstehung von Funken oder sogar Bränden kommt. Solche Auswirkungen können leichter erkannt werden, jedoch ist der Angreifer weiterhin nicht auszumachen. Je nach Generator kann sich ein Angreifer in einiger Entfernung zum Ziel befinden. Durch den Ausfall von Kommunikationseinrichtungen wird auch die Suche nach dem oder den Angreifern erschwert. Die Kommunikationsmöglichkeit mit der Polizei und im Objektsicherungsdienst untereinander wird ggf. eingeschränkt oder fällt aus.



Abb. 3.15 Lokalisierung von Radiowellen durch das Militär, Quelle: Pictures of your Life/Shutterstock.com

Um den Angreifer identifizieren und festsetzen zu können, ist der Ort der Quelle der elektromagnetischen Strahlung zu bestimmen. Zur Lokalisierung von Radiowellen gibt es verschiedene Hilfsmittel (siehe Abb. 3.15). Diese sind jedoch nicht in der Lage, elektromagnetische Strahlung von sehr kurzer Dauer wie bei einem EMP zu lokalisieren.

Dazu arbeiten Forschungseinrichtungen an Detektoren zur Erkennung elektromagnetischer Angriffe. Auf der Internetseite des Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT wird ein HPEM-Detektor vorgestellt (/GOL 13/ und /INT 24/). Dieser soll in der Lage sein, Feldstärken, Frequenz und Richtung von Angriffen mit elektromagnetischen Wellen zu messen und zu orten. Der Detektor besteht aus einer Antennenanordnung mit vier um jeweils 90° versetzte Spiralantennen, einer Hochfrequenzaufbereitung, einem Oszilloskop und einem kleinen Computer mit Auswertesoftware. Der Detektor befindet sich in der stetigen Weiterentwicklung und das aktuelle Konzept hat derzeit den Stand eines Labordemonstrators. Das größte Problem bei der Detektion ist die sehr kurze Dauer eines EMP. Diese liegt im Bereich weniger Nanosekunden. Die Dauer der Messung ist daher nur sehr kurz und muss trotzdem präzise sein.

3.6 Potenzielle Auswirkungen auf Sicherheitseinrichtungen

Die durch die EMP-Störquellen erzeugten elektrischen Feldstärken können bei mehreren 100 kV/m liegen. Die Störfestigkeit von herkömmlichen elektronischen Geräten liegt bei ca. 10 V/m. Je nach Abstand zur Quelle und Abschirmung können Störungen oder Zerstörungen eintreten. Die Feldstärke nimmt mit dem Faktor $1/r$ bis $1/r^2$, je nach Wellenform, im Fernfeld ab.

Im Rahmen der Studie der United States EMP Commission /USE 08/ wurden neben Fahrzeugen auch Infrastruktursysteme auf die Auswirkungen nach einem EMP-Angriff überprüft. Getestet wurde beispielsweise eine Ampelanlage samt Steuerungssystem mit mehreren Platinen. Bei einem schwachen elektrischen Feld (1 bis 5 kV/m) wurde die Gelbphase übersprungen, der Fehler in der Steuerung hat sich aber beim nächsten Durchlauf wieder normalisiert. Bei einem mittleren elektrischen Feld (5 bis 10 kV/m) wurde der Zyklus der Schaltung in einen anderen Rhythmus verändert. Der Controller musste zurückgesetzt werden oder wurde beschädigt. Bei einem hohen elektrischen Feld (10 bis 15 kV/m) wurde der Zyklus der Schaltung ausgesetzt. Die Ampelanlage schaltete nicht mehr oder fing an, unkontrolliert zu blinken. Der Controller musste zurückgesetzt werden oder wurde beschädigt.

Weiterhin wurden in der Studie Computernetzwerke getestet, um die Auswirkungen auf die Flugüberwachung zu überprüfen. Deren Netzwerke basieren auf handelsüblichen Computern. Ab einem elektrischen Feld von ca. 4 kV/m kam es zu Funktionsstörungen, die einen manuellen Eingriff erforderlich machten. Dauerhafte Schäden wurden ab einem elektrischen Feld von ca. 8 kV/m beobachtet, traten jedoch erst ab einem elektrischen Feld von über 15 kV/m häufiger auf.

Im Test von verschiedenen Radios auf die Auswirkungen von EMP zeigte kein Gerät Schäden bei elektrischen Feldern bis zu 50 kV/m. Bei höheren elektrischen Feldern kam es zu Störungen, die durch Aus- und erneutes Einschalten behoben werden konnten. Ein Radio ist ein Empfänger und benötigt einen Sender mit Funkwellen. Da es in Computern bereits ab ca. 4 kV/m zu Störungen kommen kann, können die Rundfunkstationen oder Sendeanlagen von Störungen betroffen sein. Indirekt kann es somit auch zu Beeinträchtigungen von Geräten kommen, die nicht direkt von einem EMP betroffen sind.

Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung beschreibt auf der eigenen Internetseite die Auswirkungen von Sonnenstürmen. Da auch hier elektromagnetische Strahlung auftritt, sind die Auswirkungen ähnlich. Gemäß /MPS 13/ kommt es bei EMP zu erhöhten Feldstärken in Stromleitungen, die aufgrund der weiten Strecken hohe Spannungen aufbauen können. Dadurch werden elektrische Systeme beschädigt oder zerstört. Richtfunkstrecken von Mobilfunknetzen sind dagegen kaum betroffen.

Die Beispiele zeigen, dass die Auswirkungen auf elektrische und elektronische Systeme sehr unterschiedlich sein können. Auch Systeme, die nicht direkt betroffen sind, können indirekt, durch Schäden an übergeordneten Systemen, ausfallen. Das Gleiche gilt auch für Sicherungseinrichtungen von kerntechnischen Einrichtungen. Diese Anlagen sind grundsätzlich aufgrund der Gebäude mit Wänden aus Stahlbeton geschützt. Der Stahlbeton wirkt ähnlich wie ein Faraday'scher Käfig und schützt die innerhalb des Gebäudes liegenden elektronischen und elektrischen Systeme vor Störungen von außerhalb, beziehungsweise auch theoretisch Geräte außerhalb vor elektromagnetischen Wellen von innen. Dieser Faraday'sche Käfig ist jedoch nicht geschlossen, es gibt Schwachstellen, wie Fenster, Fugen, Türrahmen etc., durch die die elektromagnetische Strahlung eindringen kann. Für einen vollumfänglichen Schutz müsste ein solcher Käfig um das gesamte Kraftwerk gebaut werden, bzw. um jedes einzelne Gebäude mit Komponenten der Anlagensicherung und der Sicherheit. Viele Sicherungseinrichtungen und Computer (vergleiche Abb. 3.16) liegen im inneren Bereich des Kraftwerks und sind zumindest

teilweise geschützt. Gefährdet sind die außen liegenden Sicherungseinrichtungen, Erdkabel ins Innere sowie die Kommunikationsverbindungen.



Abb. 3.16 Wachdienst mit Bildschirmen zur Kameraüberwachung, Quelle: Gordenkoff/Shutterstock.com

Kameras lassen sich durch einen EMP ebenfalls stören oder zerstören. Die Sensoren sind jedoch auch sehr anfällig gegen Laserlicht und lassen sich auf kostengünstigere Weise manipulieren. So warnt Sony auf der Supportseite /SON 22/ davor, Laserstrahlen direkt in die Kamera zu richten. Auf YouTube sind Videos verfügbar, die die Beschädigung von Sensoren durch Lasershows zeigen. In den Videos erscheinen durch die kurze Bestrahlung weiße Streifen, der Sensor wird dauerhaft beschädigt. Ein gezielter Angriff kann den Sensor großflächig zerstören. Die präzise Ausrichtung des Laserstrahls auf die Kamera über eine größere Entfernung stellt das größte Problem dar.

Die Auswirkungen von Stromschwankungen lassen sich an einem Vorfall im schwedischen Kernkraftwerk Forsmark erkennen. 2006 kam es nach /SPI 06/ durch einen Kurzschluss in der Umspannstation zur Trennung des Reaktors von der Stromversorgung. Aufgrund des Versagens von Teilen der Notstromversorgung sprang das Notkühlsystem nicht wie vorgesehen komplett an. Zwei Dieselgeneratoren fielen aus. Zwei weitere Generatoren fielen trotz gleicher Voraussetzungen nicht aus und konnten die Anlage kühlen. Durch die Stromunterbrechung fiel ebenfalls ein Teil des Steuerungssystems aus, wodurch der Gesamtüberblick über die Anlage für ca. 20 Minuten nicht gegeben war.

3.7 Möglichkeiten zum Schutz vor EMP

Schutzmaßnahmen sind davon abhängig, ob ein einmaliges Ereignis auftritt, oder ob kontinuierlich elektromagnetische Strahlung ausgesendet wird, um beispielsweise die Kommunikationsverbindung über einen längeren Zeitraum zu stören. So können Funkgeräte zwar vor einem einmalig hohen EMP geschützt gelagert werden, jedoch sind auch diese Geräte bei einem schwächeren, langanhaltenden, elektromagnetischen Störsignal im gleichen Frequenzband in der Funktion eingeschränkt. Für die meisten Sicherungsmaßnahmen existieren Ersatzmaßnahmen, wodurch dessen Funktion bei Ausfall ausgeglichen werden kann.

EMP wirkt durch eine elektromagnetische Welle, die im Bruchteil einer Sekunde ihre Energie abgibt. Ein Schutz gestaltet sich daher schwierig. Der beste Schutz gegen elektromagnetische Strahlung ist eine komplette Abschirmung in Form eines Faraday'schen Käfigs. Dies lässt sich für kleine Bauteile noch realisieren, jedoch ganze Gebäude oder Gebäudekomplexe zu umschließen, ist aufwendig und teuer. Die Stahlbeton-Konstruktion eines KKW liefert bereits einen teilweisen Schutz. Zumindest vor den direkten Auswirkungen der Strahlung. Um die Eintrittsstellen von Leitungen so gering wie möglich zu halten, müssten Sensorkabel möglichst an einer einzigen Stelle in Gebäude führen, was das System jedoch konventionell angreifbar machen würde. Je tiefer elektrische Leitungen unter der Erde verlegt werden, desto größer ist auch hier der Schutz, da die Strahlung abgeleitet werden kann. Insbesondere Kommunikationsverbindungen lassen sich durch den Gebrauch von Glasfaserkabeln schützen, die aufgrund des Materials nicht anfällig gegen EMP sind. Auch Blitzschutzsysteme (siehe Abb. 3.17) und Überspannungsableiter können eine kerntechnische Anlage in kleinem Maße schützen.

Auf dem Markt gibt es EMP-geschützte Sicherungseinrichtungen wie Kameras. Diese werden durch ein entsprechendes Gehäuse sowie eines Gitters vor der Linse wie in einem Faraday'schen Käfig gegen elektromagnetische Strahlung geschützt. Kerntechnische Einrichtungen sind größtenteils innerhalb einer dicken Stahlbetonmauer. Schwachstellen sind Fenster in manchen Räumen, jedoch sind Fenster in Räumen der Anlagensicherung äußerst selten und gehärtet durch Gitter. Hier kann eine entsprechende Wabenkonstruktion am Fenster angebracht werden, die verhindert, dass elektromagnetische Strahlung ins Innere eindringen kann. An elektrischen Leitungen und Versorgungsleitungen ist ebenfalls eine Möglichkeit des Eindringens elektromagnetischer Strahlung ins Innere eines Gebäudes vorhanden.



Abb. 3.17 Überspannungsableiter/Blitzableiter, Quelle: Alis Leonte/Shutterstock.com

Eine Möglichkeit zum Schutz besteht darin, diese Leitungen in ein metallisches Rohr mit Erdung zu legen. Dieses Rohr kommt senkrecht aus der Wand heraus und umschließt die Leitungen. Je nach Dicke dieses Rohres muss eine bestimmte Länge vorhanden sein, um die Strahlung abzuschirmen.

3.8 Schutzanforderungen und -maßnahmen für kerntechnische Anlagen und Einrichtungen

KKW in Deutschland sind grundsätzlich gegen Störungen aus dem Stromnetz geschützt. Dies beinhaltet auch einen Blitz- oder Überspannungsschutz. Durch den bereits vorhandenen Schutz der Komponenten der Leittechnik sowie dem Erdungskonzept besteht in Verbindung mit den Umschließungen in Stahlbeton ein ausreichend hoher Schutz gegen Überspannungen, auch ausgelöst durch einen EMP. Insbesondere die regelmäßige Erdung kann Überspannungen rechtzeitig in den Erdboden leiten, um die angeschlossene Technik zu schützen.

Betroffen wären bei einem EMP größtenteils die Komponenten der Anlagensicherung, die sich in der Nähe der Quelle der elektromagnetischen Störung befinden. Durch die administrativen Maßnahmen sind Bereiche im inneren Sicherungsbereich

weitestgehend vor einem Einbringen einer EMP-Quelle geschützt. Die außen befindlichen elektrischen Sicherungseinrichtungen könnten beschädigt werden, jedoch sind in KKW Ersatzmaßnahmen für den Ausfall eines oder auch mehrerer elektrischer Sicherungseinrichtungen vorgesehen. Die baulichen Sicherungseinrichtungen bleiben unberührt und bilden weiterhin eine ausreichende Barriere gegen ein Eindringen. Kommunikationsverbindungen sind teilweise geschützt. Auch Mobiltelefone können im Inneren eines Gebäudes vor einem EMP geschützt gelagert werden. Netzwerkverbindungen aus Glasfaser sind resistent gegen elektromagnetische Störungen und sollten daher bevorzugt verwendet werden.

Sollte eine EMP-Störquelle innerhalb der äußeren Umschließung zur Wirkung kommen, können die Auswirkungen entsprechend größer sein. Insbesondere im Anlagensicherungstechnikraum oder in der Sicherungszentrale kann ein EMP zu größeren Ausfällen der Sicherungstechnik führen. Jedoch gibt es auch für einen solchen Fall administrative Ersatzmaßnahmen, um das Sicherungsniveau aufrecht zu erhalten.

Kerntechnische Anlagen sind durch das Konzept aus verschiedenen bautechnischen, elektronischen und administrativen/personellen Sicherungsmaßnahmen sowie Ersatzmaßnahmen für den Ausfall einzelner oder aller technischen Sicherungsmaßnahmen ausreichend gegen Angriffe mit EMP gesichert.

4 Nutzungsmöglichkeit von EMP im Bereich der Gefahrenabwehr von Angriffen mit autonomen Systemen auf kritische Infrastruktur

Funkferngesteuerte und autonome Systeme stellen eine steigende Bedrohung für kern-technische Anlagen dar. So steigt die Anzahl an Überflügen mit Drohnen (Multicopter) stetig, da diese kostengünstiger und leichter in der Bedienung werden. Bisher werden diese Drohnen hauptsächlich für die Erstellung von digitalen Fotografien oder Videoaufnahmen genutzt. Aufgrund steigender Tragfähigkeit fliegender Systeme sind andere Verwendungen jedoch nicht ausgeschlossen (vergleiche Abb. 4.1). Die Verbreitung von fliegenden Systemen ist aufgrund deren Popularität weit gestreut, jedoch ist auch die Verwendung von wassergestützten/fahrbaren funkferngesteuerten oder autonomen Systemen möglich.



Abb. 4.1 Drohne mit unten angehängter Last, Quelle: Flystock/Shutterstock.com

In den letzten Jahren haben Vorfälle mit Drohnen deutlich zugenommen. Neben Überflügen von Menschen in Städten /EDP 19/ und Gärten /ALL 20/ über vermeintlich harmlose Flüge in der Nähe von Flughäfen, die zu hohen Beeinträchtigungen führen können /FNP 21/ bis hin zu Transporten von Waffen /THE 21/ und Mobiltelefonen /UPI 18/ in Gefängnisse nehmen die Vorfälle weiter zu. Kleine Drohnen mit Kameras oder kleiner Transportkapazität sind mittlerweile sehr kostengünstig im Onlinehandel oder Elektronikmarkt für jedermann erhältlich. Einschränkungen beim Kauf waren lange Zeit nicht

vorhanden. Drohnen unter 250 g sind weiterhin frei erhältlich, müssen aber gemeldet und mit einem Drohnen-Kennzeichen versehen werden. Diese Drohnen machen mit Abstand den größten Anteil am Markt aus. Für Drohnen über 250 g wird ein Drohnenführerschein benötigt.

Drohnen können teilweise ein Vielfaches des eigenen Gewichts an Nutzlast aufnehmen. Die größten Drohnen sind in der Lage, ein Gesamtgewicht von 300 kg (Drohne Griff 300) zu heben. Geplant sind Drohnen, die ein Gesamtgewicht von bis zu 800 kg (z. B. Drohne Griff 800) tragen können. Durch diese hohe Nutzlast können schwere Werkzeuge oder sogar kleine Personengruppen transportiert werden. Ein Abwehrsystem gegen Drohnen kann daher in manchen Fällen nötig sein. Da sich ein Abschuss aufgrund der Geschwindigkeit und Flughöhe oder auch der geringen Größe als äußerst schwierig darstellt, greifen Hersteller zu weiteren Methoden zur Drohnenabwehr. Als mögliche Abwehrmaßnahme gegen Drohnen stellt der EMP eine gute Möglichkeit dar.

4.1 Auswirkungen von EMP auf autonome Systeme

EMP dauern nur den Bruchteil einer Sekunde, sind jedoch energieintensiv. Dadurch werden im Zielsystem Ströme und Spannungen von teilweise zerstörerischer Wirkung verursacht. Die Wirkung hängt von der Art des autonomen Systems, von dessen Größe, der Stärke des Impulses, der Entfernung zum Ziel und den Schutzmaßnahmen des Ziels gegen elektromagnetische Strahlung ab. Insbesondere gegen landgebundene autonome Systeme oder gegen Fahrzeuge kann die Wirkung eines EMP eher gering ausfallen. Aufgrund der bauartbedingten großflächigen Umschließung der Karosserie aus Metall, besitzen Fahrzeuge einen häufig ausreichenden Schutz gegen EMP. Ein Fahrzeug kann mit Hilfe eines EMP nur mit geringer Wahrscheinlichkeit zum Stoppen gebracht werden. Ein autonomes Fahrzeug kann durch einen EMP, zumindest kurzfristig, ein Signal verlieren. Durch die Störung eines Steuerungssignals oder des Navigationssignals kann ein autonomes Fahrzeug zumindest kurzfristig vom Kurs abgebracht werden. In einem solchen Fall ist Timing die beste Möglichkeit, um das Signal möglichst in einer Kurve zu stören und dadurch ein Lenken des Fahrzeugs zu verhindern. Im besten Fall führt eine Signalstörung in der Folge zu einem Unfall mit Ausfall des Fahrzeugs.

Durch die Erhöhung von Computersystemen, die in Fahrzeugen verbaut werden, steigt die Anfälligkeit gegenüber EMP. Bei Verwendung von Leichtbauweisen (Kohlenfaser-

verstärkte Kunststoffe anstatt Metall) kann die Wirkung von EMP deutlich höher ausfallen.

Anders verhält es sich mit luftgebundenen autonomen Systemen. Fliegende Systeme sind auf ein geringes Gewicht ausgelegt. Ein Gehäuse aus Metall ist in den meisten zivil verfügbaren Drohnen unwahrscheinlich. Insbesondere Drehflügler bestehen häufig aus leichtem Kunststoff, auch um noch eine kleine Nutzlast transportieren zu können. Durch die Kunststoffhülle kann ein elektromagnetisches Störsignal fast ungehindert auf die Elektronik der Drohne wirken. Schwache Impulse stören das Zielsystem oder bringen es zur kurzzeitigen Überlastung oder Abschaltung. Stärkere Impulse können elektrische Bauteile sogar dauerhaft zerstören. Im Bereich der Drohnenabwehr ist aufgrund der Flughöhe und der Größe der Waffe die Wirkung meistens auf eine Störung des Funksignals beschränkt. Je nach Programmierung der Drohne hat ein Störsignal eine unterschiedliche Wirkung auf die Reaktion der Drohne. Nach einer Störung kann die Drohne zum Startpunkt oder an einen Sammelpunkt zurückkehren, an der aktuellen Position verweilen, eine Notlandung durchführen oder abstürzen. Um eine Drohne in der Luft mit Hilfe eines EMP zu beschädigen, muss ein entsprechend starker Impuls verwendet werden. Ein starker Impuls kann jedoch auch weitere Elektronik beschädigen, daher ist hier eine gerichtete elektromagnetische Welle von Vorteil, auch um den Leistungsverlust in einer größeren Entfernung gering zu halten. Hier gibt es mittlerweile einige marktverfügbare Geräte.

Eine chinesische Studie /IBE 21/ beschäftigt sich mit den Auswirkungen von EMP auf UAV. Die getestete Drohne ist eine DJI Mavic Pro, ein kompakter Quadrocopter mit integrierter Kamera. Die Drohne wurde einem EMP-Feld mit niedriger Leistung ausgesetzt, zunächst einem elektrischen Feld in einer Entfernung von 12 m zur Quelle von 22 kV/m. Als Reaktion drehten sich die Rotorblätter mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit. Bei einem elektrischen Feld in einer Entfernung von 10 m zur Quelle in Höhe von 22,4 kV/m stoppten die Rotoren für fünf Sekunden und drehten sich im Anschluss mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit. Als letztes wurde ein elektrisches Feld in einer Entfernung von 8 m zur Quelle von 24 kV/m getestet. Bei dieser Feldstärke kam es zu einer verzögerten Reaktion auf die Steuerung, zum Rotorausfall und zu einer ungleichmäßigen Rotorbewegung. Eine dauerhafte Beschädigung gab es bei der getesteten Feldstärke nicht. Diese Studie zeigt, dass bei Drohnen bereits geringe Feldstärken ausreichend sein können, um die Drohne zu beeinflussen.

4.2 Nutzungsmöglichkeiten gegen autonome Flugsysteme

Um die Effektivität eines Wirkmittels gegen ein autonomes Flugsystem besser abschätzen zu können, müssen Drohnen in Kategorien eingeteilt werden. Es gibt unterschiedliche Kriterien zur Kategorisierung. Zum einen gibt es die Kategorien C0 - C4 für die „offenen Drohnen“ mit CE-Klassenkennzeichnung (siehe Tab. 4.1). Zum Fliegen von Drohnen werden je nach Größe unterschiedliche Anforderungen gestellt.

Tab. 4.1 Kategorisierung von Drohnen nach Gewicht gemäß der EU-Drohnenverordnung

Kat.	Gewicht	Unterkategorie	Betriebsbereich	Qualifikation
C0	< 250 g	A1 Nahe Menschen	Überflug	Keine
C1	< 900 g	A1 Nahe Menschen	Kein Überflug	Training & Prüfung
C2	< 4 kg	A2 Sichere Distanz zu Menschen	30 m Sicherheitsabstand zu Menschen	
C3	< 25 kg	A3 Weit entfernt von Menschen	150 m Sicherheitsabstand zu Menschen	
C4	< 25 kg		Menschen	

Diese Kategorisierung dient dem Lizenzerhalt zum Führen von Drohnen nach der EU-Drohnenverordnung sowie den rechtlichen Grundlagen. Zur Abwehr von Drohnen ist eine solche Kategorisierung nicht hilfreich. Von der Industrie (hier: Kategorisierung nach der Firma MARSS) werden Drohnen aufgrund ihrer Größe und ihrer Nutzlast in Kategorien eingeteilt, um die Wirksamkeit ihrer Drohnenabwehrsysteme zu klassifizieren.

Tab. 4.2 Kategorisierung von Drohnen nach Nutzlast und Reichweite gemäß MARSS

Kategorie	Flughöhe	Nutzlast	Reichweite	Einsatz
Mikrodrohne	60 m	200 g – 2 kg	Bis 5 km	Hobby, Kamera
Kat. I	1000 m	2 kg - 20 kg	Bis 25 km	Hobby, Transport
Kat. II	1500 m	20 kg – 150 kg	Bis 25 km	Hobby, Transport
Kat. III	Bis 5000 m	Über 150 kg	Bis 200 km	Taktisch
Kat. IV	Über 5000 m	Über 600 kg	Nicht limitiert	Operativ

Mikrodrohnen werden hauptsächlich für Videozwecke eingesetzt, hierbei handelt es sich meistens um Drehflügler, die teilweise auch eine geringe Nutzlast transportieren können. Drohnen der Kategorien I und II werden häufiger zum Transport größerer Nutzlast oder auch als Waffe (Bsp. Kamikaze-Drohne) eingesetzt. Je nach Größe und Einsatzart ist der Übergang von einem Drehflügler zu einem Starrflügler fließend. Größere Drohnen

der Kategorien III und IV sind hauptsächlich im militärischen Bereich zu finden. Hierbei handelt es sich größtenteils um bewaffnete Starrflügler-Drohnen oder um Aufklärungsdrohnen mit sehr hoher Reichweite. Aber auch im Bereich der Drehflügler gibt es eine Entwicklung hin zu Drohnen mit einer sehr hohen Nutzlast (Lastendrohnen mit mehreren 100 kg Nutzlast möglich). Diese sind dann nicht rein militärisch, sondern frei auf dem Markt verfügbar.

Die Nutzung von Drohnen steigt stetig weiter an. Um Drohnen jedoch bekämpfen zu können, müssen diese erst einmal rechtzeitig erkannt werden. Das größte Problem stellt die geringe Größe sowie die hohe Geschwindigkeit einer Drohne dar.

Mit dem menschlichen Auge lassen sich Drohnen gar nicht oder erst sehr spät erkennen. Auf eine Entfernung von wenigen 100 Metern ist eine kleine Drohne als solche kaum zu identifizieren, insbesondere, wenn sich die Farbe kaum vom Hintergrund abhebt. Eine Erkennung ist erst auf sehr geringe Entfernung möglich, so dass eine Bekämpfung nicht mehr möglich ist. In der Industrie werden daher einige technische Detektionssysteme entwickelt. Bisher sind vier verschiedene Detektionssysteme für Drohnen vorhanden:

- Radar
- Frequenzanalyse
- Video
- Audio

Audiosysteme zur akustischen Detektion der Fluggeräusche von Drohnen sind zwar möglich, jedoch kaum effektiv. Aufgrund der Größe des Luftraums, der geringen Geräusch-Emission sowie möglicher weiterer Schallquellen kann eine Drohne nur sehr schwer akustisch erkannt werden. Auch Videosysteme eignen sich kaum zur Detektion von anfliegenden Drohnen, jedoch dienen Kameras, nach der Detektion, der Verifikation von Objekten. Die meisten Detektionssysteme in der Industrie sind Radarsysteme oder Systeme zur Signalerkennung der Steuer- und Videosignale. Radarsysteme arbeiten aktiv durch die Aussendung von Radarstrahlung und die Erfassung der durch die Objekte reflektierten Strahlen. Dadurch sind solche Systeme in der Lage, weitreichend Objekte zu erfassen. Eine Verifizierung ist mittels Radars kaum möglich. Mit dem Mikrodoppler-Effekt lassen sich teilweise Rückschlüsse auf die eingesetzte Drohne ziehen. Systeme, die Drohnen durch Signalauswertung detektieren, arbeiten passiv. Dabei werden die ausgehenden Signale zur Steuerung von Drohnen und die Videosignale erfasst und ausgewertet. Dabei lässt sich teilweise sogar der Drohnentyp ermitteln. Diese Systeme

haben ebenfalls eine hohe Reichweite, können jedoch nur Drohnen und deren Piloten erfassen, die ein Signal aussenden. Manche militärischen Drohnen verfügen über Trägheitsnavigationssysteme und fliegen einen vorprogrammierten Kurs ab. Eine Steuerung findet nicht unbedingt statt. Solche Drohnen können von einem passiven System nicht geortet werden. Die besten Ergebnisse werden aus einem Verbund von Radar, Signalauswertung und Verifizierung mit Kameras erzielt. Ein großes Problem dabei sind Fehlalarme, ausgelöst durch Drohnen von Nachrichtensendern, von Landwirten, die ihre Felder beispielsweise nach Rehkitzen absuchen oder durch Drohnen der Polizei. Daher muss eine anfliegende Drohne nicht nur erkannt, sondern auch einwandfrei identifiziert werden können. Hier ist die Größe wichtig und ob die Drohne eine Nutzlast trägt, und damit eine Gefahr darstellen könnte.

Zur Abwehr von Drohnen gibt es verschiedene Wirkmittel. Aufgrund der zumeist geringen Größe und hohen Geschwindigkeit ist es nahezu unmöglich, fliegende Drohnen in großer Höhe mit konventionellen Waffen zu bekämpfen. Durch die stetig steigende Anzahl und Verfügbarkeit auch kostengünstiger Drohnen auf dem zivilen Markt haben sich einige Firmen mit der Entwicklung von speziellen Waffen zur Bekämpfung von Drohnen beschäftigt. Das Spektrum von Drohnenabwehrwaffen umfasst Systeme mit verschiedenen Wirkmitteln, welche die Drohne zerstören (hard kill) oder zur Landung zwingen (soft kill). Im Folgenden werden einige exemplarische Abwehrsysteme vorgestellt.

Der Nachrichtensender NTV berichtete am 07.10.2022 auf seiner Internetseite über ein Gewehr, mit dem Drohnen vom Himmel geholt werden. Das Gewehr ist ein spezielles Stör-Gewehr mit der Bezeichnung EDM4 oder EDM4 SkyWiper (Electronic Drone Mitigation 4 - System) der litauischen Firma NT Service, welches erstmalig 2019 auf der Security and Counter Terror Exhibition in London vorgestellt wurde. Es wurde entwickelt, um kleine und mittlere UAVs zu stören.

Das EMP-Gewehr besteht aus Aluminium und hat die Form ähnlich einem Gewehr mit Visier und Abzug und kann von einer Person getragen und bedient werden. Das Gewicht wird mit 5,5 kg angegeben. Die Maße sind 1050 mm*220 mm*360 mm bzw. 830 mm*220 mm*360 mm mit eingeklappter Schulterstütze. Die Waffe wird mit einer 24V Batterie betrieben und hat eine Einsatzdauer von maximal 35 Minuten. Die Reichweite des EMP zur Störung beträgt 3 - 5 km. Das Gerät ist mit mehreren Antennen (vergleiche Abb. 4.2) ausgestattet. Standardmäßig kann ein Impuls in den Frequenzbändern 2,4 GHz und 5,8 GHz mit einer Leistung von 10 W abgegeben werden. Des Weiteren

kann im Frequenzband 1,5 GHz ebenfalls mit einer Leistung von 10 W GPS sowie GLONASS gestört werden.



Abb. 4.2 Darstellung eines Antennenaufbaus zur Bekämpfung von Drohnen mit elektromagnetischen Wellen, Quelle: Audrius Merfeldas/Shutterstock.com

Der erste Einsatz des EMP-Gewehrs EDM4S-UA (Stückpreis ca. 15.000 \$) war im Jahr 2021 durch die ukrainischen Streitkräfte im Donbas gegen die russischen Separatisten. Im Verlauf des Krieges zwischen Russland und der Ukraine wurde das EMP-Gewehr weiter eingesetzt. Als Beispiel für die Wirkung der Waffe wird der Abschuss einer russischen Eleron-3 Drohne im Juni 2022 genannt.

Auch die Bundeswehr entwickelt und erprobt Abwehrmöglichkeiten gegen Drohnen. An der Wehrtechnischen Dienststelle 91 in Meppen werden die Abwehrsysteme getestet. Das System der Bundeswehr besteht aus einem Störsender und aus einem modifizierten Gewehr. Der Störsender blockiert den Empfang von Signalen. Für den Fall, dass die Drohne in der Luft stehen bleibt, kommt die zweite Komponente des Systems zur

Wirkung (vergleiche Abb. 4.3). Die Gewehre G27 und G95 sind mit einer intelligenten Visierausstattung versehen. Das System bietet eine elektronische Unterstützung bei der Zielaufnahme und berechnet einen Vorhalt für die Visiereinrichtung, um die Trefferwahrscheinlichkeit zu erhöhen und das relativ kleine Ziel effektiver bekämpfen zu können. Ein Abschuss mit einem Gewehr stellt eine große Herausforderung dar. Durch das Wehrwissenschaftliche Institut für Schutztechnologien wurden Beschussversuche durchgeführt. Auch bei mehreren Treffern und auch bei Ausfall eines Rotors, war die Drohne häufig noch in der Lage, die Beschädigungen auszugleichen und den Flug fortzusetzen. Für einen Abschuss ist ein präziser Treffer an der richtigen Stelle nötig, was aufgrund der notwendigen großen Entfernung eine besondere Schwierigkeit darstellt, auch mit optischen Hilfsmitteln.



Abb. 4.3 Versuch eines Abschusses einer Drohne mit einem automatischen Gewehr, Quelle: Reshetnikov_art/Shutterstock.com

Als alternative Variante zur Bekämpfung von Drohnen mittels EMP setzt die Polizei in Bayern die sogenannte „Dropster Gun“ ein. Diese Waffe erzeugt keinen EMP, sondern verschießt Projektile, die sich in der Luft zu einem Netz entfalten (vergleichbar Abb. 4.4) und so Drohnen aus bis zu 30 - 50 m bekämpfen können. Zur Erhöhung der Wirksamkeit sollte diese Netzpistole mit einem Störsender kombiniert eingesetzt werden, um die Drohne zum Stillstand zu zwingen und die Treffsicherheit zu erhöhen.



Abb. 4.4 Drohne eingefangen mit einem Netz, Quelle: Gorlov Alexander/Shutterstock.com

Eine Netzkanone mit größerer Reichweite ist die SkyWall 100. Diese Waffe verschießt ebenfalls Netze gegen Drohnen mit einer Reichweite von bis zu 100 m. Dadurch wird eine entsprechend größere Waffe notwendig. Die schultergestützte Waffe hat ein Gewicht von ca. 10 kg und enthält eine Zielerfassungshilfe, mit der das Ziel mühelos erfasst und getroffen werden kann. Im verschossenen Netz ist ein kleiner Fallschirm integriert, der das getroffene Ziel sicher auf den Boden bringt.

Neben tragbaren Systemen werden von der Industrie auch Systeme zum Schutz von Gelände entwickelt. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Detektion und Identifizierung, teilweise verbunden mit einem Störsignal. Beispielsweise wirbt Rohde & Schwarz auf seiner Internetseite /ROH 23/ für ein Drohnenabwehrsystem, welches spezialisiert ist, auf die spezifische Signalerkennung einer fliegenden Drohne. Durch die Analyse des Funksignals kann zum einen das wichtige Signal in einer ggf. großen Menge an Funksignalen herausgefiltert werden. Zum anderen lässt sich sogar die Position des Drohnenpiloten ermitteln, um direkt gegen die angreifende Person vorgehen zu können. Das herausgefilterte Signal wird dann gezielt gestört, wobei das System sogar auf die Frequenzsprünge des Steuersignals reagieren kann. Diese Frequenzsprünge innerhalb des zugelassenen Funkfrequenzbandes dienen der Robustheit gegen Störungen. Wird das Steuersignal nur auf einer Frequenz gestört, so kann die Wirkung ggf. verfehlt werden, da auf anderen Frequenzen das Steuersignal weiterhin empfangen wird.

Gegen Starrflügler-Drohnen gibt es im Bereich des Militärs die Möglichkeit, diese mittels Flugabwehrkanonen zu Bekämpfen. Die Bundeswehr verfügt zum Beispiel über das Flugabwehrsystem MANTIS, welches alle möglichen Flugobjekte, von der Granate bis zum Flugzeug, mit 35 mm Geschossen bekämpft. Das System ortet die Flugkörper und richtet die Kanone automatisch auf das Ziel aus. Die Geschosse werden so programmiert, dass diese in möglichst naher Entfernung detonieren und dadurch das anfliegende Objekt zerstören. Ein solches System kann jedoch aus juristischen Gründen und möglichen Kollateralschäden nicht für den Schutz von kritischer Infrastruktur eingesetzt werden.

Im Bereich Wirkmittel mit EMP gibt es beispielsweise das US-System THOR (Tactical High Power Operational Responder) /AIR 21/. Dabei handelt es sich um eine Mikrowellenkanone, die in einem 20 '-Container untergebracht ist. Die leistungsstarken Mikrowellenstrahlen werden gebündelt auf anfliegende Drohnen gestrahlt und sollen diese auch in großer Entfernung zerstören können. Während ein LASER jeweils pro Schuss nur eine Drohne zerstören kann, ist ein EMP großflächiger und kann Gruppen oder Schwärme von Drohnen zerstören. Auch in Deutschland wird an einer entsprechenden Technologie gearbeitet. So berichtete Welt /WEL 22/ über eine Strahlenkanone der Firma DIEHL, die bei der ILA in Berlin vorgestellt wurde.

Mittlerweile arbeiten mehrere Länder nicht nur an der Verbesserung von Drohnen, sondern auch daran, dass diese miteinander kommunizieren können und so einen intelligenten Schwarm bilden können. Dies wurde optisch genutzt, um „Bilder“ bei Nacht an den Himmel zu malen. Drohnen im Formationsflug mit LEDs ausgestattet, können faszinierende Lichtbilder am Nachthimmel erstellen (siehe Abb. 4.5).

Der Schwarmflug lässt sich so besonders gut erkennen. Zu diesem Thema gibt es auf YouTube einige Videos. Aber auch im militärischen Bereich sollen Drohnenschwärme eingesetzt werden. Die Steuerung hunderter oder gar tausender einzelner Drohnen durch den Menschen ist ohne entsprechend großen Sicherheitsabstands nahezu ausgeschlossen. Durch die Kommunikation untereinander wie in einem Schwarm können die Drohnen jedoch Ziele gezielt von mehreren Seiten aus angreifen und die Drohnenabwehr wird massiv erschwert. Im Oktober 2016 gelang es der US-Army, 103 Drohnen als Schwarm fliegen zu lassen /RES 22/. Die Drohnen wurden von drei Flugzeugen aus abgeworfen und flogen teilautonom. Dabei fliegen die Drohnen Ziele an und weichen sich gegenseitig automatisch aus, um sich nicht zu beschädigen. Dennoch können

einzelne Drohnen aus dem Schwarm austreten und eigene Ziele bekämpfen bzw. eigene Aufgaben ausführen.



Abb. 4.5 Lichtershow bei Nacht dargestellt mit einem Drohnenschwarm, Quelle: Sarunyu L/Shutterstock.com

Die USA plant jedoch, weitaus größere Drohnenschwärme (vergleiche Abb. 4.6) einzusetzen /STE 22/. Auch China arbeitet laut diesem Artikel an Drohnenschwärmen und hat diese im Frühjahr 2022 in einem dichten Bambuswald getestet. Die Drohnen flogen in Formation autonom zwischen den Bäumen hindurch, ohne gegenseitig oder mit den Bäumen zu kollidieren. Nach dem automatischen Ausweichen von Hindernissen, nahm jede Drohne wieder ihren Platz in der Formation ein.

Wie in Kapitel 1 bereits beschrieben wurde, führen militärische Entwicklungen häufig auch zu einem zivilen Interesse. Bei Drohnenschwärmen wird dieses Schwarmverhalten bisher friedlich genutzt („Bilder malen“). Jedoch ist auch ein Interesse aus krimineller Sicht nicht auszuschließen. Einzelne Drohnen lassen sich noch mit den oben beschriebenen Netz- und EMP-Gewehren bekämpfen. Gegen Drohnenschwärme sind solche Waffen nahezu wirkungslos. Einzelne Drohnen aus dem Schwarm können zwar bekämpft werden, jedoch wird bei entsprechend großer Anzahl eine bestimmte Menge an

Drohnen ihr Ziel erreichen, bzw. können so mehrere entferntere Ziele gleichzeitig bekämpft werden.



Abb. 4.6 Drohnenschwarm, Quelle: SLSK Photography/Shutterstock.com

Die Bekämpfung von Drohnenschwärmen wird zu einer größeren Herausforderung. Aber auch zu diesem Angriffsszenario arbeiten Firmen an Wirkmitteln, wie Mikrowellenstrahlen, LASER oder auch EMP. Damit lassen sich größere Schwärme in Sekundenschnelle unschädlich machen.

Durch die stetige Verbesserung der Drohnenerkennung arbeiten Nationen wie die USA, Russland und China bereits an Stealth (Tarnkappen)-Drohnen. Auch Airbus hat eine Stealth-Drohne entwickelt. Diese kaum zu erkennenden Drohnen haben zwar noch nicht den Weg auf den zivilen Markt gefunden, jedoch ist dies nicht auszuschließen. Es gibt einen stetigen Wettkampf zwischen der Möglichkeit, Drohnen aufzuspüren und diese zu tarnen, um das Aufspüren unmöglich zu machen oder zumindest ausreichend zu erschweren. Die USA ist im Besitz von Stealth-Drohnen zum Betanken von Kampfflugzeugen in der Luft. Die Drohne MQ-25 Stingray von Boeing wird auf Flugzeugträgern eingesetzt, um die Entfernung zum Einsatzort zu vergrößern. Dabei soll die Drohne eine Tankkapazität von ca. 6800 kg Treibstoff besitzen /WIK 24b/.

Neben professionellen Stealth-Drohnen /STE 19/ werden im Krieg zwischen Russland und der Ukraine durch die ukrainischen Streitkräfte selbstgebaute „Stealth“-Drohnen aus

Pappe eingesetzt /WEL 23b/. Diese Art Drohnen sind besonders leicht und verfügen über eine hohe Reichweite. Durch die Verwendung von Pappe sind diese nur sehr schwer durch Radare aufzuspüren. Während militärische Stealth-Drohnen auf radarabweisende Strukturen setzen, sind die durch die Ukraine eingesetzten Drohnen technologisch sehr schlicht gehalten, bieten jedoch den Vorteil, sehr kostengünstig produziert werden zu können.

Die Wirkmittel zur Bekämpfung von Drohnen haben ein breites Spektrum. Dabei wird im zivilen Bereich fast ausschließlich der sogenannte Soft-Kill verwendet, um Drohnen zu bekämpfen. Dies umfasst das Jammen, die Übernahme der Drohnensteuerung oder eine Bekämpfung mit Netzen. Im Bereich des sogenannten Hard-Kills liegen verschiedene Wirkmittel vor, diese bestehen aber aus militärischen Mitteln und sind für die Bekämpfung größerer Drohnen vorgesehen. Diese Wirkmittel umfassen den physischen Abschuss mittels Flugabwehrkanonen oder -Raketen, den Einsatz von LASER oder auch EMP. Diese Wirkmittel sind jedoch nicht für jedermann verfügbar und können auch eine Gefahr für Unbeteiligte darstellen (Kollateralschäden). EMP bietet daher die Möglichkeit zur Bekämpfung von Drohnen, ist jedoch auf den militärischen Bereich beschränkt. Das einzige elektromagnetische Wirkmittel stellt der Jammer da, wirkt jedoch nur so lange wie der Jammer aktiv ist und bindet gegebenenfalls Personal.

4.3 Nutzungsmöglichkeit gegen bodengebundene autonome Systeme

Die Studie der United States EMP Commission hat sich mit den Auswirkungen von EMP auf Fahrzeuge beschäftigt (siehe Kapitel 2.3.1.2). Gemäß der Studie /USE 08/ wurden insgesamt 37 Automobile einem steigenden EMP-Feld ausgesetzt. Die meisten Fahrzeuge zeigten keine bis geringe Auswirkungen. Auch in Deutschland wurden Studien durchgeführt, mit dem Ziel, EMP gegen Fahrzeuge einzusetzen. Ursprünglich war die Technik gedacht, um in Verfolgungsjagden die Fahrzeuge von Kriminellen zu stoppen oder die Fahrzeuge von Politikern während der Fahrt zu schützen. Seit den islamistischen Anschlägen, bei denen Fahrzeuge gezielt als Waffe missbraucht wurden, wie in London, Stockholm, Nizza, Berlin oder Barcelona, soll diese Technik auch für solche Fälle anwendbar sein. Fahrende Fahrzeuge lassen sich kaum stoppen, ohne diese zu zerstören und damit andere Verkehrsteilnehmer oder Unbeteiligte in der Nähe zu gefährden. Durch den Einsatz von EMP als Wirkmittel sollen Risiken von Querschlägern und außer Kontrolle geratenen Fahrzeugen, zum Beispiel durch zerschossene Reifen, minimiert werden. Zeit Online berichtet in einem Artikel /ZEI 17/ über das Gerät „HPEM

Carstop“ der Firma Diehl Defence. Dieses soll in der Lage sein, bei bis zu 70 % der fahrenden Fahrzeuge in einer Entfernung bis ca. 15 m die Elektronik zu stören und das Fahrzeug dadurch zum Anhalten zu bringen. Das Fahrzeug soll dabei nicht dauerhaft beschädigt werden, lediglich die Motorelektronik wird gezielt gestört. Dies soll an 60 verschiedenen Fahrzeugtypen erfolgreich getestet worden sein. Jedoch ist auch hier das Problem, ähnlich wie in der Studie der United States EMP Commission /USE 08/, dass nicht alle Fahrzeuge gestoppt werden können. Insbesondere alte Fahrzeuge, ohne elektronisches Motormanagement oder elektronische Zündung, zeigen keine oder nur eine geringe Wirkung auf EMP. Über die Stärke des EMP des HPEM Carstop gibt es weder auf Zeit Online noch auf der Internetseite der Firma Diehl Defence Auskünfte. Im Rahmen der Studie der United States EMP Commission wurden elektrische Felder bis 50 kV/m an Fahrzeugen getestet. Ob das Modell der Firma Diehl Defence deutlich höhere elektrische Felder im Nahbereich bis 15 m generieren kann, ist nicht bekannt.

Es lässt sich nicht vorhersagen, welche Fahrzeuge wie auf einen EMP reagieren. Ob ein Fahrzeug Störungen zeigt, es neu gestartet werden muss oder gar dauerhaft beschädigt wird, hängt von vielen Faktoren ab. Es kann lediglich die Aussage getroffen werden, dass Fahrzeuge durch einen EMP mit hoher Wahrscheinlichkeit, mindestens kurzzeitig, in der Fahrt unterbrochen oder gestört werden können. Je mehr Technik im Fahrzeug verbaut ist, desto anfälliger wird das Fahrzeug auf einen EMP reagieren. Auch Fahrzeuge in Leichtbauweise (kohlenfaserverstärkte Kunststoffe, CFK) werden deutlich anfälliger reagieren, da die schützende Metallhülle fehlt und die elektromagnetische Strahlung ungehindert die Elektronik stören kann. Derzeit sind tragbare bzw. kleine EM-Störquellen, die genutzt werden, um Fahrzeuge zu stören, in der Leistung begrenzt. Neuere Entwicklungen und modernere Technik kann die Stärke eines EMP in einer koffergroßen Störquelle vielleicht erheblich steigern. Derzeit lässt sich in einer solchen Quelle ein elektrisches Feld von ca. 227 kV/m erzielen (HPEM-Case der Firma DIEHL). Mit entsprechend leistungsfähigeren Komponenten lassen sich vielleicht in den nächsten Jahren EM-Störquellen herstellen, die ein Vielfaches an Leistung erbringen können, und so die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls bei einem fahrenden Automobil deutlich erhöhen. Derzeit bietet ein EMP jedoch keine verlässliche Möglichkeit, ein Fahrzeug zu stoppen.

4.4 Nutzungsmöglichkeit gegen technische Hilfsmittel

Ein EMP bietet die Möglichkeit, gegen UAS und Fahrzeuge eingesetzt zu werden. Da es jedoch auch andere technische Hilfsmittel gibt, stellt sich die Frage, ob ein EMP auch gegen solche Angriffe helfen kann. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt wurde, lässt sich keine konkrete Aussage treffen, wie ein technisches System auf einen EMP reagiert. Daher könnte auch ein EMP helfen, technische Hilfsmittel bei SEWD zu stören oder auszuschalten. Hierbei ist jedoch ein großer Aufwand nötig, um auf dem gesamten Gelände kerntechnischer Einrichtungen EMP zum Schutz gegen technische Hilfsmittel auslösen zu können. Zum anderen ist der Schaden deutlich größer als der Nutzen, da eigene technische Sicherungseinrichtungen sowie angrenzende zivile Infrastrukturen ebenfalls betroffen werden. Ein grundsätzlicher Schutz kerntechnischer Einrichtungen gegen technische Hilfsmittel mittels EMP ist daher nicht zielführend.

5 Schnittstellen zu weiteren Eigenforschungen der GRS

In diesem Kapitel wird diese Eigenforschung mit vorangegangenen und zukünftigen Projekten der GRS verglichen. Die hier vorliegende Eigenforschung befasst sich mit den Auswirkungen von und Sicherungsmaßnahmen gegen EMP sowie der Gefahr durch Drohnen und deren Abwehrmöglichkeiten.

Bisher hat es in der GRS keine Forschungen zum Thema elektromagnetische Auswirkungen auf sicherungstechnische Einrichtungen gegeben. Schwerpunkt der Forschung im Bereich elektromagnetischer Strahlung war die Auswirkung auf die Anlagensicherheit.

In dem Eigenforschungsvorhaben „Erfassung und Verfolgung von technischen Entwicklungen zur Abschätzung von Einsatzmöglichkeiten und eventueller Gefahren von UAS (Drohnen) im Bereich der Sicherung und der nuklearen Gefahrenabwehr“ sollten umfangreiche Informationen zum Thema Drohnen und dessen mögliches Gefährdungspotenzial im Rahmen von SEWD auf kerntechnische Anlagen und Einrichtungen sowie zu möglichen Anwendungen im Bereich der Sicherung erarbeitet werden.

Die Themen Einsatzmöglichkeiten, Abwehrmaßnahmen und Vorfälle sollten in dem Eigenforschungsvorhaben 4723R01530 detaillierter behandelt werden. In der hier vorliegenden Eigenforschung wird auf diese gemeinsamen Themen nur insoweit eingegangen, um die Bedrohungslage darzustellen und kurz Detektions- und Abwehrmaßnahmen vorzustellen, wobei der Schwerpunkt der Abwehrmaßnahmen auf EMP liegt. Im Eigenforschungsvorhaben 4723R01530 sollten weitere Abwehrmaßnahmen detaillierter dargestellt und bewertet werden. Das Eigenforschungsvorhaben wurde jedoch zunächst nicht umgesetzt.

6 Zusammenfassung

Dieses Eigenforschungsvorhaben beschäftigt sich mit EMP und dessen Auswirkungen auf Mensch und Technik sowie die Nutzungsmöglichkeit von EMP gegen UAS. Nach den Grundlagen und den Auswirkungen von verschiedenen Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung wurden nationale und internationale Vorfälle mit EMP aufgeführt. Schließlich wurden mögliche EM-Störquellen mit ihren technischen Leistungsparametern aufgelistet und bewertet. Im Anschluss wurden die Auswirkungen auf kerntechnische Anlagen bzw. deren Sicherungseinrichtungen und Schutzmöglichkeiten dargestellt.

Derzeit sind starke EMP-Generatoren vergleichsweise groß. Tragbare Versionen sind eher schwach oder erfordern ein sehr hohes technisches Verständnis sowie einen Zugang, um das Gerät in unmittelbarer Nähe zur Wirkung bringen zu können. Technische Entwicklungen könnten dazu führen, dass sogar NEMP-Generatoren deutlich kleiner und handlicher werden. Möglicherweise könnten solche Generatoren in einen tragbaren Koffer passen, was zu einer neuen Bewertung führen muss.

KKW sind mit einem hohen Schutz gegen elektromagnetische Strahlung ausgestattet. Der Schutz gegen EMP ist ausreichend groß. Auch die technischen Sicherungseinrichtungen bieten einen gewissen Schutz gegen EMP. Das Sicherungsniveau eines Kraftwerks wird durch bauliche, technische und administrative Maßnahmen aufrechterhalten. Auch durch den Ausfall einiger technischer Sicherungseinrichtungen ist der Schutz gegen SEWD ausreichend hoch. Da Sicherungseinrichtungen auch ohne einen Angriff ausfallen können, gibt es Ersatzmaßnahmen für solche Fälle, die auch bei einem EMP das Sicherungsniveau gewährleisten.

In Deutschland sind alle KKW abgeschaltet und befinden sich im Rückbau. Es gibt nur wenige operativ arbeitende kerntechnische Anlagen und einige Zwischenlager in Deutschland, die jedoch aufgrund ihrer baulichen Strukturen nur wenige Angriffsvektoren bieten.

Um die technischen Sicherungseinrichtungen gegen EMP zusätzlich zu schützen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. So gibt es Folien bzw. Gitterstrukturen, zum Schutz von Öffnungen gegen EMP sowie EMP-sichere Kameras. Die Verwendung von Glasfaserkabeln bietet eine sichere Datenverbindung, da diese resistent gegen elektromagnetische Strahlung sind. Eine regelmäßige Erdung bietet ebenfalls einen guten Schutz vor Überspannungen, die bei einem EMP entstehen können.

Im zweiten Teil dieses Eigenforschungsvorhabens wurden die Nutzungsmöglichkeiten von EMP im Bereich der Gefahrenabwehr betrachtet sowie weitere Abwehrmaßnahmen gegen UAS dargestellt. Um UAS mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung auszuschalten, werden sehr hohe EMP benötigt. Diese können allerdings auch andere elektrische Geräte beschädigen (Kollateralschaden) und finden sich daher eher im militärischen Bereich (z. B. EMP-Kanone THOR). Weitere Abwehrmaßnahmen zielen auf elektromagnetische Strahlung zur Störung des Signals. Dies kann sich schwer gestalten, da ggf. eine Drohne nur für die Dauer des Störsignals am Weiterfliegen gehindert wird. Elektrische Geräte können mit elektromagnetischer Strahlung gestört werden (\vec{E}_1), was zu einem sehr kurzfristigen Ausfall oder zumindest zur kurzfristigen Beeinträchtigung der Funktion führt. Das Gerät ist nach Wegfall der elektromagnetischen Strahlung weiterhin einsatzbereit. Um Geräte so zu stören, dass ein Neustart bzw. Eingriff erforderlich wird, muss die elektrische Feldstärke ungefähr um den Faktor zehn ($\vec{E}_2 = 10 * \vec{E}_1$) stärker sein. Zur dauerhaften Zerstörung von elektrischen Geräten wird nochmals eine um den Faktor zehn stärkere elektronische Feldstärke ($\vec{E}_3 = 10 * \vec{E}_2$ oder $\vec{E}_3 = 100 * \vec{E}_1$) benötigt. Daher stellen EMP aufgrund der Entfernung zum Ziel und der eher militärischen Nutzung von EMP-Kanonen nur eine bedingte Abwehrmöglichkeit gegen UAS da. Tragbare elektromagnetische Gewehre (Jammer) werden hauptsächlich gegen Mikrodrohnen oder Drohnen der Kategorie I, teilweise auch gegen Kategorie II verwendet. Größere Drohnen der Kategorien III und IV können wahrscheinlich genauso beeinträchtigt werden, sofern keine Gegenmaßnahmen gegen Störungen (z. B. Wechsel auf nicht gestörte und nicht genehmigte Frequenzen oder Einsatz von Beamforming zur Verstärkung des Steuersignals über das Störsignal hinaus) verbaut wurden. In diesem Bereich findet ein steter Wettlauf zwischen Maßnahmen und Gegenmaßnahmen statt.

Literaturverzeichnis

- /AIR 21/ <https://www.airforce-technology.com/projects/tactical-high-power-operational-responder-thor-drone-killer-usa/?cf-view>
- /ALL 20/ https://www.all-in.de/polizei/mann-61-filmt-personen-in-immenstaedter-gaerten-mit-drohne_arid-242301
- /ASI 22/ <https://asiatimes.com/2022/07/us-china-in-a-heated-microwave-weapon-race/>
- /BOR 09/ Dominik Bortis: 20MW Halbleiter-Leistungsmodulator-System, Dissertation, 2009, ETH Nr. 18180
- /COM 22/ <https://www.computerwoche.de/a/was-ist-beamforming.3552917>
- /EDP 19/ <https://www.edp24.co.uk/news/crime/20772822.illegal-drone-flight-norwich-city-centre-leads-police-action/>
- /EMF 14/ <https://www.emf.ethz.ch/de/emf-info/themen/biologie/hochfrequente-felder/wirkungen-von-hochfrequenzstrahlung>
- /EMF 16/ <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/effects/radio-frequency>
- /FNP 21/ <https://www.fnp.de/frankfurt/flughafen-frankfurt-drohne-sichtung-verspaetungen-starts-nachtfluege-bundespolizei-gesichtet-90212643.html>
- /GAM 09/ Gambetta, D., S. Hertog: Why are there so many Engineers among Islamic Radicals? European Journal of Sociology, 50(2):201–230, Aug 2009. doi: 10.1017/S0003975609990129
- /GIR 06/ Giri, D. V., F. Tesche: An Overview of High-Power Electromagnetic (HPEM) Radiating and Conducting Systems, 228681326, März 2006, Publikation 228681326
- /GOL 13/ <https://www.golem.de/news/forschung-messgeraet-erkennt-angriffe-mit-emp-waffen-1312-103091.html>

- /GRS 18/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Entwicklung einer Bewertungsgrundlage für die Zuverlässigkeit programmierbarer und rechnerbasierter Komponenten im Kernkraftwerk bezüglich Strahlungseinfluss, Technischer Bericht, GRS-537, Köln, Juli 2018
- /GRS 19/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Informationstool Hazards Library - Analysehilfsmittel zur Bereitstellung von Informationen und Daten zur systematischen Durchführung von PSA für übergreifende Einwirkungen, Technischer Bericht, GRS-A-3914, Köln, März 2019
- /IBE 21/ Ibeobi, S. und Pan, X, Study of electromagnetic pulse (EMP) effect on surveillance unmanned aerial vehicles (UAVs), Nanjing, China, 01. März 2021
- /INT 24/ <https://www.int.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/elektromagnetischeeffekteundbedrohungen/detektion-durch-high-power-electromagnetics-hpem.html>
- /KAP 10/ Kappenman, J.: Impact of Severe Solar Flares, Nuclear EMP and Intentional EMI on Electric Grids, Electric Infrastructure Security (EIS) Summit, London, England, 20. September 2010
- /LOC 04/ Lochner, L. und E. Moretti: The Effect of Education on Crime: Evidence from Prison Inmates, Arrests, and Self-Reports. American Economic Review, 94(1):155–189, March 2004. doi: 10.1257/000282804322970751
- /MER 12/ <https://www.merkur.de/lokales/muenchen/autoknacker-diebstahl-knopfdruck-2247566.html>
- /MPG 12/ https://www.mpg.mpg.de/4883408/12_05_11
- /MPS 13/ <https://www.mps.mpg.de/sonnenstuerme-sonnenaktivitaet-faq/4#:~:text=Da%20Stromleitungen%20zuweilen%20weite%20Strecken,allem%20in%20hohen%20Breiten%20auf.>
- /NER 10/ North American Electric Reliability Cooperation (NERC) High-Impact, Low-Frequency Event Risk to the North American Bulk Power System, Bericht, Juni 2010.

- /NTV 21/ <https://www.n-tv.de/politik/Berliner-LKA-untersucht-Havanna-Syndrom-article22855463.html>
- /QUA 19/ <https://www.quarks.de/gesundheit/macht-strahlung-krank-das-sagt-die-forschung>
- /RES 22/ <https://www.reservistenverband.de/magazin-die-reserve/so-geht-kriegsfuehrung-im-informationszeitalter/>
- /ROH 23/ https://www.rohde-schwarz.com/de/unternehmen/magazine/drohnenabwehr_251858.html
- /SAB 20/ Sabath, F., Modellierung von Szenarien vorsätzlicher elektromagnetischer Beeinflussung, Oktober 2020
- /SON 22/ <https://www.sony.de/electronics/support/articles/00266583>
- /SPA 11/ Spanier, F.: Der Einfluss des Sonnenwinds auf die Erde, Welt der Physik, 10.06.2011, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/erde/sonnenwind/>.
- /SPI 04/ <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/energiewaffen-im-irak-der-sheriff-mit-der-strahlenkanone-a-318897.html>
- /SPI 06/ <https://www.spiegel.de/politik/ausland/akw-stoerfall-in-schweden-der-mann-der-den-gau-verhinderte-a-430124.html>
- /SPI 21/ <https://www.spiegel.de/politik/deutschland/berliner-landeskriminalamt-ermittelt-wegen-havanna-syndrom-a-637fbc2-8229-447e-956b-350e34b4174c>
- /STE 19/ <https://www.stern.de/digital/technik/lout---airbus-zeigt-erstmal-eine-stealth-drohne-8989486.html>
- /STE 22/ <https://www.stern.de/digital/technik/ein-super-schwarm-aus-tausenden-von-mini-drohnen---das-plant-die-us-navy-32859330.html>
- /THE 21/ <https://www.theguardian.com/world/2021/sep/20/italian-prisoner-shoots-at-rivals-with-gun-smuggled-in-by-drone>

- /UPI 18/ https://www.upi.com/Top_News/World-News/2018/10/25/Italy-police-Drone-tried-to-deliver-2-phones-drugs-to-prisoner/8171540485684/
- /USE 08/ United States EMP Commission: Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack, April 2008
- /WEL 21/ <https://www.welt.de/politik/ausland/article233237847/Havanna-Syndrom-Zwei-US-Diplomaten-in-Berlin-erkrankt.html>
- /WEL 22/ <https://www.welt.de/wirtschaft/plus239526591/ILA-Berlin-Diehl-Strahlenkanone-soll-westliche-Lenk Waffen-schuetzen.html>
- /WEL 23a/ <https://www.welt.de/vermishtes/article243918547/Bayern-Gross-flaechigen-Stromausfall-geplant-Razzia-gegen-mutmassliche-Reichsbuerger.html>
- /WEL 23b/ <https://www.welt.de/videos/video247230882/Krieg-in-der-Ukraine-Kiew-setzt-laut-Medienberichten-Stealth-Drohnen-aus-Pappe-ein.html>
- /WIK 10/ https://de.wikipedia.org/wiki/Operation_Crossroads
- /WIK 22/ https://de.wikibrief.org/wiki/Counter-electronics_High_Power_Micro-wave_Advanced_Missile_Project
- /WIK 24a/ https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_electromagnetic_pulse#Super-EMP
- /WIK 24b/ https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_MQ-25_Stingray
- /ZEI 17/ <https://www.zeit.de/mobilitaet/2017-08/anti-terror-kampf-strahlenpistolen-mikrowellen-forschung/seite-2>
- /ZEI 22/ <https://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2022-12/razzien-rechtsextreme-verschwoerung-putsch-birgit-malsack-winkemann-afd/komplettaussicht>

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Elektromagnetisches Spektrum, Quelle: Polina Kudelkina/Shutterstock.com	7
Abb. 1.2	Grenzwerte magnetischer Flussdichte und elektrischer Feldstärke bei einer Frequenz von 50 Hz für die Allgemeinbevölkerung	10
Abb. 1.3	Eindringtiefe in Abhängigkeit der Frequenz (nach /EMF 16/)	12
Abb. 1.4	Elektromagnetische Welle, Quelle: Kicky_princess/Shutterstock.com.....	13
Abb. 1.5	Aufbau eines Transformators, Quelle: Fouad A. Saad/Shutterstock.com.....	14
Abb. 1.6	Ausbau eines Magnetrons aus einer Mikrowelle, Quelle: Kalabi Yau/Shutterstock.com.....	15
Abb. 1.7	Prinzipieller Aufbau eines Magnetrons.....	16
Abb. 1.8	Bündelung von sichtbarem Licht.....	19
Abb. 2.1	Sonnenwind und der Schutz der Erde durch das Magnetfeld, Quelle: muratar/Shutterstock.com.....	23
Abb. 2.2	Einfluss von Sonnenstürmen auf das Erdmagnetfeld /SPA 11/.....	24
Abb. 2.3	Polarlichter, Quelle: muratar/Shutterstock.com	25
Abb. 2.4	Explosion einer Atombombe im Bikini-Atoll, Quelle: Everett Collection/Shutterstock.com	27
Abb. 2.5	HIJENKS-Flugkörper, Quelle: X (ehem. Twitter)	29
Abb. 2.6	Blackout in einer Stadt, Quelle: hphtns/Shutterstock.com	31
Abb. 2.7	Transformatorversagen bei Kernkraftwerken der USA innerhalb von 25 Monaten seit Beginn des Sonnensturms von März 1989 /KAP 10/.....	37
Abb. 2.8	Transformatorschaden während des Sonnensturms /USE 08/.....	38
Abb. 3.1	Blick auf das Kernkraftwerk ISAR I und II, Quelle: imageBROKER.com/Shutterstock.com.....	41
Abb. 3.2	Bevölkerung nach beruflichem Bildungsabschluss 2019 von Personen im Alter von 15 Jahren und mehr, Stand 25.11.2020, Quelle: Statistisches Bundesamt	43
Abb. 3.3	Verteilung Studium nach Fächern im Jahr 2021/2022, Stand 05.08.2022, Quelle: Statistisches Bundesamt.....	44

Abb. 3.4	Verteilung des Bruttogeldvermögens pro Haushalt, Stand: 01.01.2018, Quelle: Statistisches Bundesamt.....	45
Abb. 3.5	Prinzipieller Aufbau einer EM-Störquelle.....	46
Abb. 3.6	Volumetrische Energiedichte und Entladezeit verschiedener Energiespeicher.....	47
Abb. 3.7	Schematische Darstellung verschiedener Antennentypen	66
Abb. 3.8	Schematischer Aufbau einer EMP-Störquelle	68
Abb. 3.9	Beispiel einer kleinen Dose als Behälter für eine EMP-Störquelle, Quelle: Monster_Design/Shutterstock.com	70
Abb. 3.10	Beispiel eines Aktenkoffers als Behälter für eine EMP-Störquelle, Quelle: CapturePB/Shutterstock.com.....	72
Abb. 3.11	Transportkoffer als Behälter für eine EMP-Störquelle, Quelle: Josep Curto/Shutterstock.com	74
Abb. 3.12	Beispiel eines Kombinationskraftwagen als Träger einer EMP- Störquelle, Quelle: LIAL/Shutterstock.com.....	76
Abb. 3.13	Bild eines handelsüblichen Kleintransporters als Träger einer EMP- Störquelle, Quelle: Andrei Kuzmik/Shutterstock.com	78
Abb. 3.14	Beispiel eines LKW mit Container als Träger einer EMP-Störquelle, Quelle: Siwakorn1933/Shutterstock.com	80
Abb. 3.15	Lokalisierung von Radiowellen durch das Militär, Quelle: Pictures of your Life/Shutterstock.com	82
Abb. 3.16	Wachdienst mit Bildschirmen zur Kameraüberwachung, Quelle: Gorodenkoff/Shutterstock.com.....	85
Abb. 3.17	Überspannungsableiter/Blitzableiter, Quelle: Alis Leonte/Shutterstock.com	87
Abb. 4.1	Drohne mit unten angehängter Last, Quelle: Flystock/Shutterstock.com	89
Abb. 4.2	Darstellung eines Antennenaufbaus zur Bekämpfung von Drohnen mit elektromagnetischen Wellen, Quelle: Audrius Merfeldas/Shutterstock.com	95
Abb. 4.3	Versuch eines Abschusses einer Drohne mit einem automatischen Gewehr, Quelle: Reshetnikov_art/Shutterstock.com	96

Abb. 4.4	Drohne eingefangen mit einem Netz, Quelle: Gorlov Alexander/Shutterstock.com	97
Abb. 4.5	Lichtershow bei Nacht dargestellt mit einem Drohnenschwarm, Quelle: unbekannter Autor/Shutterstock.com	99
Abb. 4.6	Drohnenschwarm, Quelle: SLSK Photography/Shutterstock.com	100

Abkürzungsverzeichnis

BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CHAMP	Counter-electronics High Power Microwave Advanced Missile
EMA	Einbruchmeldeanlage
EMI	Electromagnetic Interference
EMP	Elektromagnetischer Impuls
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
GIC	en: geomagnetically induced currents (deu: geomagnetisch induzierte Ströme)
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMA	Gefahrenmeldeanlage
GMD	en: geomagnetic disturbance (deu: geomagnetische Störung)
GPS	Global Positioning System
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GSM	Global System for Mobile Communications
HIJENKS	High-Powered Joint Electromagnetic Non-Kinetic Strike Weapon
HPEM	High-Power-Electro-Magnetics
HPM	High-Power-Microwaves
IEMI	Intentional Electromagnetic Interference
KKW	Kernkraftwerk
LEMP	light electromagnetic pulse
MILO	Magnetically Insulated Line Oscillator
NEMP	Nuklearer elektromagnetischer Impuls
RF	Radio frequency
SEMP	switching electromagnetic pulse
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
UAS	Unmanned Aircraft System

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VIRCATOR	Virtual Cathode Oscillator

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de