

Gefahr durch moderne Drohnen für französische Atomkraftwerke (insbesondere für die Spent Fuel Gebäude)

Dipl. Phys. Oda Becker

Prof. Dr. Jutta Weber

Erstellt im Auftrag von Greenpeace France

Januar 2026

Inhaltverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	8
2 Drohnen – Eine Gefahr für Atomanlagen?	9
2.1 Zivile Drohnen	11
2.2 Militärische Drohnen.....	12
2.2.1 <i>Entwicklung der militärischen Drohnen</i>	13
2.2.2 Drohnenschwärme und KI.....	15
2.2.3 Drohnen als „Gamechanger“ in der Ukraine	16
2.3 Rolle von Drohnen bei (zukünftigen) terroristischen Angriffen	20
2.4 Fazit	22
3 Möglichkeiten und Grenzen der Drohnenabwehr.....	22
3.1 Rechtliche Lage	23
3.2 Technische Drohnenabwehr	24
3.3 Politische und finanzielle Situation	28
3.4 Fazit und Herausforderungen	28
4 Verwundbarkeit der französischen Atomkraftwerke gegenüber Terrorangriffen.....	29
4.1 Störfallanfälligkeit und Nachrüstungen der Reaktoren	29
4.2 Anfälligkeit des Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente	31
4.2.1 Nachrüstungen für die Lagerbecken.....	32
4.2.2 Kühlung des Brennelementlagerbeckens.....	34
4.2.3 Struktur des Lagerbeckens	35
4.2.4 Fazit.....	36
5 Angriffsszenarien und radiologische Folgen.....	36
5.1 Angriff auf das Reaktorgebäude.....	37
5.2 Angriff auf das Gebäude mit Brennelementlagerbecken	38
5.3 Potenzielle Freisetzungen	39
5.4 Radiologische Folgen	40
6 Literatur	45

Zusammenfassung

Seit den Terroranschlägen vom 11. September 2001 in den USA ist das Potenzial terroristischer Anschläge stärker in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Lange konzentrierte sich daraufhin die öffentliche Diskussion über die Bedrohung von Atomkraftwerken vor allem auf Angriffe mit Verkehrsflugzeugen. Insbesondere die älteren französischen Atomkraftwerke sind durch eine große Bandbreite von möglichen Terroranschlägen bedroht, denn ihr Schutz gegen Einwirkungen von außen ist unzureichend. Außerdem weist ihre Auslegung zur Beherrschung von Störfällen, trotz erheblicher Nachrüstungen, Mängel auf.

Drohnen – Eine Gefahr für Atomanlagen?

Der Einsatz von Drohnen in militärischen Konflikten hat in den letzten Jahren rasant zugenommen und wird in den kommenden Jahren weiter steigen. In dieser Studie soll abgeschätzt werden, ob Drohnen aktuell oder zukünftig eine Bedrohung für französische Atomkraftwerke sind bzw. sein werden. Dabei liegt der Fokus auf einem Angriff auf das Gebäude für abgebrannte Brennelemente. Mit der Weiterentwicklung der Drohnentechnologie werden Drohnen zu noch leistungsfähigeren und vielseitigeren Waffen, die Ziele mit größerer Präzision angreifen können.

Ursprünglich für das Militär und die Luft- und Raumfahrtindustrie entwickelt, haben Drohnen ihren Weg in viele zivile Anwendungen gefunden. Drohnen können für die Zustellung, für die Notfallrettung, Landwirtschaft und für die Fotografie eingesetzt werden. Drohnen können schwere Nutzlasten transportieren und haben kommerziell entwickelte (oder improvisierte) Vorrichtungen zum Abwerfen von Gegenständen, die auch den Abwurf von Sprengmitteln ermöglichen. Kommerzielle Drohnen, die für den Einsatz von Sprengstoff oder Waffen konfiguriert oder modifiziert wurden, gelten zu Recht als Sicherheitsproblem.

Ob zur Überwachung aus 18.000 m Höhe oder für gezielte Kamikaze-Angriffe: Drohnen sind heute wichtig für die moderne Kriegsführung. Militärische Drohnen gibt es in verschiedenen Größen. Die Dimensionen reichen von wenigen Zentimetern bis hin zur Größe von Verkehrsjets. In der Vergangenheit wurden die Drohnen für Aufklärungszwecke verwendet. Heutzutage werden Drohnen immer mehr auch für Kampfhandlungen eingesetzt.

Die Ukraine entwickelte sich in den letzten Jahren zu einem Kriegslabor und Standort für Hightech-Waffen. Trotz der vielfach geäußerten Erwartung, dass sich die Drohnenkriegsführung rasch in Richtung fortgeschrittener, KI-gestützter Systeme entwickeln würde, verläuft dieser Übergang langsamer als zunächst angenommen.

Im Gegensatz dazu gewinnt die Nutzung von Low-Tech-Alternativen aktuell immer mehr an Bedeutung. Die sogenannten Kamikaze-Drohnen gelten im Ukraine-Krieg als „Gamechanger“. First-Person-View-(FPV)-Drohnen werden an der Front immer wichtiger, da sie gezielte Angriffe ermöglichen. Die Entwicklung der Leistungsfähigkeit der FPV-Drohnen ist ebenfalls bemerkenswert, so sind FPV-Drohnen, mit Splitter-/Hochexplosiv Sprengladungen ausgestattet oder an ihnen sind Waffen befestigt. Zudem gibt es größere „Mutterschiff“-Drohnen, die kleinere FPV-Drohnen tragen.

Die rasante Entwicklung der Drohnenkriegsführung in der Ukraine hat Hunderte neue Systeme hervorgebracht. Die Systeme unter 150 kg (Nato Klasse 1) sind in der Ukraine am weitesten verbreitet und haben den größten Einfluss. Millionen Drohnen werden in der Ukraine und anderen Staaten in Europa für den Kampfeinsatz produziert.

In Hinblick auf die hier untersuchte Fragestellung ist die „Operation Spider's Web“ bemerkenswert: Am 1. Juni 2025 griffen mindestens 117 ukrainische, in Russland gestartete FPV-Drohnen gleichzeitig vier russische Militärflugplätze an. Die Drohnenteile und der Sprengstoff wurden in Russland in einer Lagerhalle montiert und in Containern versteckt. Die Container wurden von (unwissenden) russischen Fahrern auf LKWs in die Nähe der Ziele gefahren.

Nicht nur die Rüstungsindustrie, sondern auch die rasche Verbreitung von zivilen Drohnen hat einen Markt geschaffen, der die technologische Verbesserung von Drohnen in absehbarer Zukunft weiter vorantreiben wird. Die massive Zunahme der Anzahl und der Fähigkeiten von Drohnen sowie der einfache Zugang und die leichte Bedienung von Drohnen zu niedrigen Kosten wird sie zu einer Waffe der Wahl für zukünftige Terroristen machen. Terroristische Gruppen und nicht staatliche Akteure (IS, Hisbollah, Huthi etc.) setzen schon lange Drohnen zur Durchführung und Koordinierung von Anschlägen ein. Die Fähigkeit einer kleinen Gruppe, mehrere Anschläge gleichzeitig durchzuführen, und zwar zu relativ geringen Kosten und aus großer Entfernung, wird dazu führen, dass Drohnen bei künftigen Terroranschlägen eingesetzt werden.

Möglichkeiten und Grenzen der Drohnenabwehr

Drohnen werden immer leistungsfähiger (Höhe, Präzision, Reichweite, Geschwindigkeit) und zugleich kostengünstig sowie leicht beschaffbar. Entsprechend nehmen auch Überflüge kritischer Infrastruktur zu. Gerade 2025 wurden in Europa verstärkt die Frage von Spionage- oder Sicherheitsrisiken diskutiert. Es gibt in Frankreich Nutzungsverbote für Drohnen in sensiblen Gebieten, die bei Missachtung mit Haftstrafen und Geldbußen einhergehen können. Terroristische Gruppen würden sich dadurch nicht stoppen lassen.

Die technische Drohnenabwehr gliedert sich in drei Bereiche: a) Erkennung/Identifikation (z.B. Radar, KI-basierte Flugbahn- und Nutzlastanalyse; b) Soft-Kill (z.B. Jammern) und c) Hard-Kill (z. B. Abfangsysteme mit Netzen, Kanonen (RapidFire), Hochleistungslaser). Im Hard-Kill-Bereich entstehen Risiken durch Trümmer auf Mensch und Umwelt.

Der Erfolg der Abwehr hängt von Größe, Gewicht, Geschwindigkeit und Bauart der Drohnen sowie der jeweiligen Verfügbarkeit der Abwehrtechnologie ab, die logistische Herausforderungen birgt. Eine wirklich sichere und allumfassende Methode zur Abwehr gibt es (noch) nicht. Die Abwehrmaßnahmen sind insgesamt nicht überzeugend, weil zum einen in dicht besiedelten Gebieten der Einsatz von Hard-Kill-Systemen oder sogar physischen Abfangsystemen aufgrund der potenziellen Kollateralschäden bzw. unvermeidbaren Sicherheitsrisiken problematisch ist. Zum anderen gibt es logistische Probleme: Da es keine universelle Methode zur Abwehr gibt, müssten alle möglichen Technologien am entsprechenden Ort vorrätig gehalten werden, was eher unrealistisch ist. Ein kurzfristiger und vor allem sehr schneller Transport der erforderlichen Drohnenabwehr ist meist nicht möglich.

Verwundbarkeit der französischen Atomkraftwerke gegenüber Terrorangriffen

Das neue französische Atomkraftwerk Flamanville 3, ein EPR, wurde am 21. Dezember 2024 nach 17 Jahren Bauzeit an das Stromnetz angeschlossen. Die anderen 56 französischen Atomkraftwerke lassen sich in drei Klassen einteilen, 900-MWe-Reaktoren (32 Reaktoren), 1300-MWe-Reaktoren (20), 1450-MWe-Reaktoren (4). Diese sind veraltet und entsprechen nicht mehr den aktuellen Sicherheitsanforderungen.

Die 900-MWe Reaktoren sind besonders verwundbar gegen externe Einwirkungen: Der Reaktorkern wird nur von einem relativ dünnwandigen Containment (Stärke: 90 cm) umgeben. Diese Auslegung entspricht nicht mehr dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik. Für Neubauprojekte wird eine Gebäudestärke von rund zwei Metern für erforderlich gehalten.

Die Reaktoren der 1300 MWe-Klasse und der 1450 MWe-Klasse sind zwar besser, aber dennoch nicht ausreichend gegen Einwirkungen von außen geschützt. Die Reaktoren sind mit einem doppelwandigen Containment ausgestattet, jedoch ebenfalls jeweils von geringer Wandstärke (90 cm).

Insbesondere die alten Atomkraftwerke mit den Reaktoren der 900-MWe Klasse weisen eine Reihe von Auslegungsdefiziten in der Störfallbeherrschung auf, die sowohl die Angriffsmöglichkeiten als auch den potenziellen „Erfolg“ eines Terrorangriffs erhöhen.

Die bestehenden grundlegenden Defizite bei den 900 MWe-Reaktoren werden durch die Nachrüstungen nicht beseitigt. Sie betreffen u.a. die geringe Redundanz bei den Sicherheitssystemen, den ungenügenden Schutz gegen externe übergreifende Einwirkungen sowie Defizite bei der Gewährleistung der Unabhängigkeit der Sicherheitsebenen des Gestaffelten Sicherheitskonzepts.

Der neue sogenannten Hardened Safety Core (HSC) soll eine wichtige Rolle bei der Vermeidung von Kernschmelzunfällen, aber auch bei der Minderung der Folgen von Kernschmelzunfällen spielen, er ist an vielen Standorten jedoch noch nicht vollständig implementiert. Darüber hinaus ist nicht sichergestellt, dass der HSC nach vollständiger Implementierung ausreichende Sicherheitsanforderungen erfüllen kann. Der HSC kann die bestehenden Defizite der Sicherheitssysteme nicht kompensieren.

Schwere Unfälle (SA) mit Kernschmelze wurden bei der Auslegung der 900-MWe-Reaktoren nicht berücksichtigt. Als Ergebnis periodischer Sicherheitsüberprüfungen (PSÜs) wurden jedoch Einrichtungen und Maßnahmen für das SA-Management implementiert. Die im Rahmen der 4. PSÜ geplanten Modifikationen für den Fall eines Kernschmelzunfalls können bei einem schweren Unfall ohne Beschädigung des Containments - falls die Nachrüstungen vollständig umgesetzt sind -, voraussichtlich radioaktive Freisetzungen reduzieren. Bei Zerstörungen im Containment durch einen Drohnenangriff ist allerdings nicht davon auszugehen, dass die Nachrüstungen radioaktive Freisetzungen wirkungsvoll verhindern können.

Anfälligkeit des Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente

In den französischen Atomkraftwerken¹ befindet sich das Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente (Spent Fuel Pool - SFP) nicht innerhalb des Containments, sondern in einem separaten Gebäude neben dem Reaktorgebäude. Dieses Gebäude hat ein dünnes Metалldach und relativ dünne Wände (0,3 m) im oberen Bereich. Die Wanddicke im Bereich des Beckens beträgt ca. 0,8 bis 1 m. Die Gebäude sind gut sichtbar und daher relativ leichte Ziele für einen Angriff aus der Luft.

Nach Umsetzung der umfangreichen Nachrüstungen für die Kühlung der gelagerten Brennelemente im Rahmen der 4. PSÜ kann das Risiko einer Brennelementfreilegung in vielen Unfallsituationen reduziert werden. Die Nachrüstungen zielen auf Nachspeisung von Kühlmittel bei Ausfall des Kühlsystems und bei einer unfallbedingten Entleerung durch eine Fehlfunktion der vorhandenen Kühlsysteme. Mit den vorgesehenen Maßnahmen ist es jedoch nicht möglich, das Kühlwasser im Falle eines Verlusts des Kühlwassers aufgrund einer Leckage in der Gebäudestruktur nach einem Drohnenangriff wieder aufzufüllen. Die gefährlichste Schwachstelle, die Verwundbarkeit der Lagerbecken aufgrund der dünnen Gebäudewände, wird nach bisheriger Planung noch Jahrzehnte für 56 französische Reaktoren bestehen bleiben.

Es ist hier nicht beabsichtigt, die „wirkungsvollste“ Vorgehensweise zu beschreiben, sondern auf die grundsätzliche Möglichkeit und die Gefahr eines Anschlags mit Drohnen auf französische Atomkraftwerke hinzuweisen. Dabei soll zudem keine Anleitung für einen wirkungsvollen Anschlag gegeben werden. Es kann hier auch nicht bewertet werden, ob es für eine terroristische Gruppe einfacher zu realisieren wäre, sich militärische Drohnen zu beschaffen, die bereits mit Explosionsstoffen oder anderen Gefechtsköpfen ausgerüstet sind oder Drohnen, die für die zivile Nutzung gedacht waren, für ein Angriffsszenario umzurüsten.

Realisierbar und wirkungsvoll erscheint ein Angriff mit mehreren Drohnen (Drohnen Schwarm), die mit Sprengstoff und/oder Granaten und/oder Brandbeschleuniger beladen sind oder mit verschiedenen Gefechtsköpfen, insbesondere mit thermobarischen Gefechtsköpfen, bestückt sind. Die Attentäter könnten nacheinander oder simultan mit mehreren Drohnen das Atomkraftwerk angreifen.

¹ Ausnahme: Reaktor Flamanville 3

Angriffsszenarien und radiologische Folgen

Für einen Drohnenangriff auf das Reaktorgebäude der 900 MWe-Reaktoren würde eine erhebliche Menge an Sprengstoff benötigt, um die Wand von 90 cm Stärke zu durchdringen. Wenn eine Detonation Schäden am äußeren Containment erzeugt hat, könnten zusätzlich thermobarische Gefechtsköpfe durch Drohnen verwendet werden. Die Wirkung (Trümmerflug, Hitze, Druckwelle und Erschütterung) kann sich im Inneren des Containments ausbreiten, schwere Zerstörungen bewirken und die Kühlung des Reaktors unterbrechen. Eine derartige Situation kann von den Sicherheitssystemen des Atomkraftwerks bzw. den Notfallmaßnahmen nicht beherrscht werden. Ein Kernschmelzunfall wäre dann nahezu unvermeidbar. Da das Containment ein Leck aufweisen würde, würde der gefährlichste Unfall resultieren: Eine Kernschmelze bei offenem Containment.

Die Eingreiftruppe FARN, die erst innerhalb von 24 Stunden einsatzbereit sein muss, müsste mit mobilen Geräten die Strom- und Wasserressourcen des Hardened Safety Core anschließen, um eine Kernschmelze zu verhindern oder zumindest die Freisetzungen zu mindern. Dies scheint nach einer komplexen Unfallsituation nach einem Drohnenangriff sehr schwierig bis unmöglich. Zudem sind die erforderlichen Systeme im Reaktor vermutlich zu beschädigt.

Da der obere Teil des Gebäudes für abgebrannte Brennelemente nur eine Wandstärke von 30 cm hat, kann dort einfacher eine großflächige Zerstörung der äußeren Wand durch einen Drohnenangriff erfolgen. Weitere Sprengsätze oder andere Waffen könnten dann im Gebäude selbst durch Drohnen zur Explosion gebracht werden. Falls Risse im Lagerbecken entstehen, würde das Wasser abfließen und die Brennelemente freilegen. Bei einem Teil der Brennelemente entzündeten sich die Brennstoffhüllen relativ schnell. Die Entzündung wird befördert, wenn Brennelemente beschädigt werden. Der Brand ist sehr heiß und kann nicht mit Wasser gelöscht werden. Sobald die Freisetzung begonnen hat, wären Maßnahmen sehr kompliziert und gefährlich.

Aufgrund der Komplexität der Situation nach einem Drohnenangriff muss bezweifelt werden, dass die Betriebsmannschaft oder die Eingreiftruppe (FARN) in der Lage ist, ein ausreichendes Wiederauffüllung des Beckens zu erreichen und ein Schmelzen des Brennstoffs zu verhindern. Es ist insgesamt nicht auszuschließen, dass selbst, wenn die Lagerbecken keinen Schaden genommen haben, keine ausreichende Notkühlung hergestellt werden kann.

Radiologische Folgen

Ein gezielter Angriff mit Drohnen verursacht mit hoher Wahrscheinlichkeit in den angegriffenen Reaktoren einen nicht mehr beherrschbaren Kühlmittelverlust und damit einen Kernschmelzunfall. Dabei handelt es sich um die gefährlichste und folgenschwerste Variante eines Kernschmelz-Unfalles – einer Kernschmelze mit offenem Containment. Die Vorwarnzeit für eine Freisetzung beträgt dann nur wenige Stunden. Sollte die Evakuierung misslingen, erhalten je nach Wetterlage Hunderttausende Menschen gesundheitsschädliche, teils lebensbedrohende Strahlendosen. In der Nähe der Anlage ist mit einer akuten Strahlenkrankheit, in größerer Entfernung mit erheblichen Langzeitfolgen (vor allem Krebs und genetische Schäden nachfolgender Generationen) zu rechnen. Die Freisetzungsmengen der flüchtigen Radionuklide (z. B. Cäsium-137) liegen im Bereich von 50 bis 90 % des Kerninventars.

Laut einer US-Studie könnten etwa 75 Prozent (10-90 Prozent) des Cäsium-137 bei einem Schmelzen bzw. Brand der Brennelemente freigesetzt werden. In allen Lagerbecken kann die gleiche Menge oder sogar mehr als das Doppelte an Brennelementen aufbewahrt werden, wie sich im Reaktorkern befindet. Die zu erwartenden Freisetzungen des relevanten Radionuklids Cäsium-137 infolge der hier diskutierten Terroranschläge ist daher insgesamt in der gleichen Größenordnung wie jene aus dem Reaktorkern.

Eine Darstellung der möglichen langfristigen Konsequenzen ist anhand der Ergebnisse des Projekts FlexRisk möglich. Für die französischen Reaktoren wird dabei jeweils eine Freisetzung von 30% des

Kerninventars an Cs-137 unterstellt. Die Freisetzungen der hier diskutierten Terrorangriffe könnten sogar noch höher sein. Sie sind aber in der gleichen Größenordnung und zur Abschätzungen und Illustrierung potenzieller Folgen gut geeignet.

Je nach Wetterlage, werden die radioaktiven Stoffen über einen großen Bereich verteilt oder lagern sich auf einem schmalen Streifen ab. Die möglichen Kontaminationen hängen stark von den meteorologischen Bedingungen ab. Durch eine Freisetzung aus dem AKW Tricastin besteht insbesondere für Gebiete im Osten Frankreichs, die gesamte Schweiz, weite Teile Italiens, sowie Gebiete in Süddeutschland, Österreich, Kroatien und Slowenien eine hohe Wahrscheinlichkeit kontaminiert zu werden. In Folge einer Freisetzung aus dem AKW Cattenom besteht für den Nordosten Frankreichs, für Luxemburg, für fast ganz Deutschland sowie für Gebiete in Tschechien und Polen eine hohe Wahrscheinlichkeit langfristig kontaminiert zu werden.

Für einen Drohnenangriff auf Tricastin besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Bevölkerung aus großen Gebieten in Frankreich, für Cattenom, nicht nur aus Gebieten in Frankreich, sondern auch aus den Nachbarländern Deutschland und Luxemburg langfristig umgesiedelt werden müssten.

1 Einleitung

Seit den Terroranschlägen vom 11. September 2001 in den USA ist das Potenzial terroristischer Anschläge auf neuralgische Punkte stärker in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Lange konzentrierte sich daraufhin die öffentliche Diskussion über die Bedrohung von Atomkraftwerken durch Terroranschläge vor allem auf Angriffe mit Verkehrsflugzeugen. Tatsächlich sind erheblich mehr Angriffsszenarien denkbar. Insbesondere die älteren französischen Atomkraftwerke (900 MWe Klasse) sowie die Lagergebäude für abgebrannte Brennelemente sind durch eine große Bandbreite von möglichen Terroranschlägen bedroht, denn ihr Schutz gegen Einwirkungen von außen ist unzureichend. Außerdem weist ihre Auslegung zur Beherrschung von Störfällen – gemessen am heutigen Stand von Wissenschaft und Technik – trotz erheblicher Nachrüstungen Mängel auf.

Der Einsatz von Drohnen in bewaffneten Konflikten nimmt immer weiter zu. In dieser Studie soll abgeschätzt werden, ob derartige Systeme aktuell oder zukünftig eine Bedrohung für französische Atomkraftwerke sind bzw. sein werden. Dabei liegt der Fokus auf einem Angriff auf das Gebäude für abgebrannte Brennelemente.

Die französischen Atomkraftwerke wurden entworfen und gebaut, bevor der Absturz eines Verkehrsflugzeugs oder Drohne als reale Bedrohung angesehen wurde. Beim 2024 in Betrieb genommene EPR Flamanville 3 bietet die Außenhülle (doppelte Betonwand), die sowohl das Reaktorgebäude als auch das Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente umgibt, einen deutlich höheren Schutz vor dem Absturz großer Verkehrs- oder Militärflugzeuge und auch vor Angriffen mit Drohnen.

Bereits im Herbst 2014 erregten eine Reihe von nicht identifizierten Drohnen (19) über französischen Atomkraftwerken die Aufmerksamkeit der Bevölkerung und Behörden. Am 19. Oktober 2014 wurden vier weit auseinanderliegende AKW überflogen, was auf eine gut koordinierte Aktion hinwies. Laut Medienberichten seien diese Drohnen teils zwei Meter breit gewesen und damit potenziell in der Lage, kleinere Sprengstoffmengen zu transportieren. Bis heute ist unklar, wer diese Drohnen gesteuert hat.

Die große Anzahl der Überflüge kam einer Machtdemonstration der dafür Verantwortlichen gleich. Frankreich könnte durch derartige Machtdemonstrationen in eine Zwangslage geraten, da es von seinen Atomkraftwerken abhängig ist. Frankreich bezieht heutzutage noch rund 70% seines Stroms aus Atomkraftwerken.

Gegenstand einer Kurzexpertise in 2014 war die Frage, welche Gefahr mit solchen Drohnenüberflügen verbunden wäre, wenn diese von einer terroristisch motivierten Gruppe durchgeführt würden. Es wurden drei Szenarien identifiziert, die mit Unterstützung der Drohnen durchgeführt werden könnten und eines Kernschmelzunfall auslösen könnten (Sprengstoffanschlag durch Innentäter, Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe (AT-14), Terrorangriffe aus der Luft mit einem Hubschrauber). Die Gefahr durch einen Angriff nur mit Drohnen wurde als verhältnismäßig gering bewertet. (GP 2014)

Während noch vor 10 Jahren davon auszugehen war, dass keine kleineren militärischen Drohnen, die „standardmäßig“ bewaffnet oder z. B. mit Explosionsmunition ausgestattet sind, existieren, ist die Situation heute eine komplett andere. Insofern können auch terroristische Gruppierungen derartige bewaffnete Drohnensysteme besitzen. Die sogenannten Kamikaze-Drohnen gelten im Ukraine-Krieg als „Gamechanger“. Zudem gibt es Hunderttausende zivile Drohnen. Viele dieser Drohnen könnten zu Kamikaze-Drohnen umgebaut werden, indem eine Ladung Sprengstoff integriert wird. Besitzer von Drohnen müssen zwar in Frankreich registriert werden, das verhindert allerdings den missbräuchlichen Einsatz von Drohnen nicht.

In den letzten Jahren wurden in Europa immer wieder Drohnen über Atomanlagen gesichtet: In Deutschland z. B. überflogen 2024 mehrfach Drohnen das stillgelegte Atomkraftwerk Brunsbüttel.

Dabei soll es sich um eine russische Militär-Drohne (Orlan-10) gehandelt haben, die eine Reichweite von 500 bis 600 km hat und eine Höchstgeschwindigkeit von mehr als 100 km/h erreichen soll.²

Am 10. November 2025 wurden fünf Drohnen über dem Atomkraftwerk Doel in Belgien gesichtet. Es ist nicht bekannt, wer dafür verantwortlich ist. Experten weisen darauf hin, dass Russland in den vergangenen Jahren in eine Art »hybride Kriegsführung« verwickelt gewesen sei. Russland hat jegliche Verbindung zu den Vorfällen bestritten.³

Anfang Dezember 2025 wurden fünf Drohnen über dem französischen Marinestützpunkt auf der bretonischen Landzunge Île Longue gesichtet. Dort sind die französischen Atom-U-Boote stationiert.⁴

Der Umfang und Komplexität des Einsatzes von Drohnen hat sich in den letzten Jahrzehnten rasant weiterentwickelt. Ursprünglich für Aufklärungs- und Überwachungszwecke entwickelt, sind Drohnen immer vielseitiger geworden und können Präzisionsschläge ausführen.⁵ Die im Vergleich zu herkömmlicher militärischer Hardware relativ niedrigen Kosten und die Zugänglichkeit der Drohnentechnologie ermöglichen es auch nichtstaatlichen Akteuren, auf dieses Mittel zuzugreifen. Die fortlaufende Innovation der Drohnentechnologie, einschließlich der Fortschritte in den Bereichen künstliche Intelligenz (KI) und Nutzlastkapazität, wird ihre Effektivität im Kampf weiter steigern.⁶ Damit steigt auch die Gefahr durch Terroranschläge mit Drohnen.

Ein Atomkraftwerk könnte einer terroristischen Gruppe nicht nur wegen der unmittelbaren Wirkung auf die Elektrizitätserzeugung, sondern auch wegen des Symbolcharakters und der weltweiten Aufmerksamkeit als Angriffsziel attraktiv erscheinen. Es handelt sich zudem um eine Technik mit zivil/militärischem Doppelcharakter. Das könnte vermutlich für Frankreich, einen Staat mit Atomwaffen, relevant sein.

In dieser Studie sollen die potenziellen Gefahren eines Drohnenangriffs auf ein französisches Atomkraftwerk mit modernen Drohnen untersucht werden. Dazu werden in Kapitel 2 zunächst ausführlich die Entwicklung der Drohnentechnologie, deren Verbreitung und ihre heutige Leistungsfähigkeit dargestellt. Diskutiert wird auch ihre Rolle für terroristische oder nicht staatliche Akteure. Kapitel 3 diskutiert die verschiedenen (begrenzten) Maßnahmen zur Abwehr von Drohnen. Kapitel 4 gibt eine Übersicht der französischen Atomkraftwerke und deren Verwundbarkeit, der Fokus liegt dabei auf den Gebäuden für die Lagerung der abgebrannten Brennelemente. Kapitel 5 stellt potenzielle Angriffsszenarien dar und skizziert die potenziellen Auswirkungen.

2 Drohnen – Eine Gefahr für Atomanlagen?

Bei einer Drohne (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) handelt es sich um ein Fluggerät, das keinen Menschen an Bord hat und daher entweder über weite Entfernungen ferngesteuert werden muss oder mit Hilfe von Software autonom fliegt. UAVs werden häufig in zwei Kategorien unterteilt - zivile und militärische. Während zivile UAVs z. B. für Aufnahmen genutzt werden, werden militärische Drohnen für Aufklärungsmissionen und Angriffsflüge auf feindliche Ziele eingesetzt. Drohnen können so groß

² <https://www.rundschau-online.de/politik/drohnen-ueber-akw-und-chemiepark-in-deutschland-gesichtet-1-849436>; <https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/Spionagedrohnen-ueber-Stade-Staatsanwaltschaft-ermittelt,drohnen408.html>

³ <https://www.spiegel.de/ausland/belgien-drohnen-ueber-atomkraftwerk-doel-gesichtet-a-7226ed79-4f21-4637-aa80-11e38507bb0e>

⁴ <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/frankreich-drohne-sichtung-u-boot-stuetzpunkt-100.html>

⁵ Der zunehmende Einsatz von Drohnen bei Militäreinsätzen wirft ethische und rechtliche Fragen auf.

⁶ The Global Impact of Ukraine's Drone Revolution on Military Forces; March 26, 2024; <https://www.karveinternational.com/insights/the-global-impact-of-ukraines-drone-revolution-on-military-forces>

wie ein Flugzeug oder so klein wie eine Hornisse sein. Das gesamte System, das die Funktion einer Drohne ermöglicht, wird als UAS (Unmanned Aerial System) bezeichnet.

Drohnen haben in den letzten Jahren in der militärischen Kriegsführung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen Flugzeugen, darunter:

- Geringere Kosten: Der Betrieb und die Wartung von Drohnen sind relativ günstig. Dies macht sie zu einer attraktiven Option für Länder mit begrenzten Militärbudgets.
- Geringeres Risiko für Pilot:innen: Drohnen können ferngesteuert werden, wodurch das Risiko, dass Pilot:innen im Kampf getötet oder verletzt werden, verringert wird.
- Höhere Flexibilität: Drohnen können schneller und einfacher eingesetzt werden als Flugzeuge. Dies macht sie zu einer vielseitigeren Waffe, die in einer größeren Bandbreite von Szenarien eingesetzt werden kann.

Aufgrund dieser Vorteile werden Drohnen bereits für eine Vielzahl militärischer Missionen eingesetzt, darunter:

- Überwachung und Aufklärung: Drohnen können eingesetzt werden, um Informationen über feindliche Stellungen und Bewegungen zur Planung und Durchführung militärischer Operationen zu sammeln.
- Angriffsmissionen: Drohnen können mit verschiedenen Gefechtsköpfen, Raketen, Bomben aber auch kleineren Sprengstoffpaketen bestückt und zum Angriff auf feindliche Ziele eingesetzt werden.

Der Einsatz von Drohnen in militärischen Konflikten hat in den letzten Jahren rasant zugenommen und wird in den kommenden Jahren weiter steigen. Mit der Weiterentwicklung der Drohnentechnologie werden Drohnen zu noch leistungsfähigeren und vielseitigeren Waffen werden. Besonders relevant für die hier gestellte Fragestellung ist der verstärkte Einsatz von Drohnen für gezielte Angriffe: Drohnen werden feindliche Ziele mit größerer Präzision angreifen können.⁷

Datenverbindungen machen es möglich, dass die Drohne während des Flugs mit dem Bodenpersonal kommunizieren kann. Heute arbeiten viele moderne Drohnen im 2,4- bis 5-GHz-Funkfrequenzband, was eine direkte Steuerung der Drohne aus größerer Entfernung ermöglicht. Die Qualität der computergestützten Pilotensoftware moderner Drohnen hat sich stark verbessert. Viele Plattformen verfügen über selbstkorrigierende Autopilot- und Sichtfunktionen, die eine Person oder ein Objekt verfolgen können. Diese Autopilot-Funktionalität umfasst die Fähigkeit, Flugrouten zu planen, die die Drohne unabhängig von der direkten Steuerung durch den Piloten ausführen kann.⁸

Während Gyroskope⁹ und vertikale Start- und Landefähigkeiten (VTOL) die Fernsteuerung von Drohnen erleichtern, ermöglichen GPS und LiDAR¹⁰-Technologie den Drohnen die Orientierung.

Mehrrotorige Drohnen (z. B. Quadrocopter) gehören in der Regel zu den kleinsten und leichtesten Drohnen auf dem Markt. Sie haben eine begrenzte Reichweite, Geschwindigkeit und Höhe, sind aber das perfekte Fluggerät für Luftbildfotografen. Diese Drohnen können in der Regel 20-30 Minuten in

⁷ The Impact of Drones on Future of Military Warfare 2024, <https://media.inti.asia/read/the-impact-of-drones-on-future-of-military-warfare>

⁸ Mit der zunehmenden Verbreitung von Drohnen im alltäglichen und militärischen Gebrauch werden sie auch zu einem größeren Ziel für Cyberangriffe. Hacker können falsche GPS-Koordinaten einspeisen, um die Kontrolle über eine Drohne zu übernehmen.

⁹ Gyroskope bestehen aus einem Rad, das sich um seine Achse in jede Richtung drehen kann und in Drohnen zur Messung der Drehrate verwendet wird. Sie sind für die Stabilität unerlässlich.

¹⁰ „Light Detection and Ranging“ ist eine Fernerkundungstechnologie, die Laserstrahlen nutzt, um in Echtzeit Entfernungen präzise zu messen und Bewegungen in einer Umgebung wahrzunehmen.

der Luft bleiben und eine leichte Nutzlast tragen. Viele dieser Drohnen sind VTOL-Drohnen (Vertical Take-off and Landing), da sie in vertikaler Position starten, fliegen, schweben und landen können.

Einrotorige Hubschrauber sehen genauso aus wie kleine Hubschrauber. Diese Drohnen werden in der Regel zum Transport von schwereren Objekten eingesetzt, z. B. von LiDAR-Systemen, die zur Landvermessung verwendet werden können.

Starrflügeldrohnen sehen fast aus wie normale Flugzeuge (ohne Fenster), wobei die Flügel anstelle der Rotoren für den Auftrieb sorgen. Diese Drohnen verbrauchen in der Regel Treibstoff anstelle von Strom und können so 16 Stunden und mehr in der Luft bleiben. Aufgrund ihrer Größe und ihrer Bauweise müssen sie wie Flugzeuge auf Landebahnen starten und landen. Sie werden vom Militär für Luftangriffe, von Wissenschaftler:innen für den Transport großer Mengen von Ausrüstung und von gemeinnützigen Organisationen für die Lieferung von Lebensmitteln in schwer zugängliche Gebiete eingesetzt.

Starrflügler-Hybrid-VTOL-Drohnen sind eine Mischung aus Starrflüglerdrohnen und rotorbasierten Drohnen, bei denen die Rotoren an den Flügeln befestigt sind. Aufgrund ihres hybriden Ansatzes bietet diese Technologie den Nutzern die Ausdauer eines Starrflüglers und die vertikalen Flugfähigkeiten eines rotorbasierten Designs.

Drohnen, darunter auch Systeme, die Verbraucher bereits von Herstellern wie DJI oder Parrot kaufen können, sind heute schneller, übertragen Bilder über größere Entfernungen und fliegen viel länger als noch vor wenigen Jahren. Das französische Unternehmen Delair, einer der weltweit führenden Hersteller von Drohnen, bietet seit 2011 weltweit leistungsstarke Starrflügel-UAVs für Grenzüberwachung, Aufklärung, Nachrichtendienst und Spezialeinheiten an.

2.1 Zivile Drohnen

Ursprünglich für das Militär und die Luft- und Raumfahrtindustrie entwickelt, haben Drohnen ihren Weg in viele zivile Anwendungen gefunden. Drohnen gibt es in einer Vielzahl von Größen und sie sind in der Lage, Nutzlasten von ebenso unterschiedlicher Größe zu transportieren. Drohnen können für die Zustellung, für die Notfallrettung, Landwirtschaft und für die Fotografie eingesetzt werden.

Zivile Drohnen, die einige Kilogramm Sprengstoff transportieren können, sind kommerziell erhältlich. Die Drohne *Matrice 400* z. B., einer Industriedrohne zur Inspektion von Brücken und Industrieanlagen kann eine Nutzlast von bis zu 6 kg transportieren und hat eine Flugzeit von bis zu 59 Minuten.¹¹

Zu den derzeitigen kommerziellen Verwendungszwecken von Drohnen gehören die Inspektion von Dächern mit Wärmebildkameras, die Vermessung großer Flächen, die Ausbringung von Chemikalien auf landwirtschaftlichen Feldern und die Auslieferung von Produkten.

Drohnen haben sich auch in der Landwirtschaft als vorteilhaft erwiesen. Die Durchführung von Feldbegehungen, das Aussäen von Saatgut auf Feldern, die Überwachung des Viehbestands und die Schätzung der Ernteerträge werden durch den Einsatz von Drohnen erleichtert.

Drohnen können schwere Nutzlasten transportieren und haben kommerziell entwickelte (oder sogar improvisierte) Vorrichtungen zum Abwerfen von Gegenständen, die den Einsatz von Mörsern und Granaten ermöglichen.

Bei Lieferdrohnen handelt es sich in der Regel um autonome UAVs, die Lebensmittel, Pakete oder Waren bis zur Haustür transportieren. Viele große Marken testen derzeit verschiedene Versionen von Lieferdrohnen. In einer Zukunftsvision¹² werden Drohnen, von denen einige nur wenige Kilogramm

¹¹ <https://u-rob.com/shop/matrice/matrice-400/>

¹² Wann und ob diese Zukunftsvision wirklich Realität wird, ist noch nicht abzusehen.

und andere mehrere Tonnen wiegen, ununterbrochen zwischen ländlichen Verteilzentren und innerstädtischen Lieferzentren hin- und herfliegen.¹³

Kommerzielle Drohnen, die für den Einsatz von Sprengstoff oder Waffen konfiguriert oder modifiziert wurden, gelten als Problem. Dies liegt an den geringen Kosten, der leichten Verfügbarkeit und der rasanten Entwicklung dieser Technologie, die es ermöglicht, nützliche unbemannte Systeme für kriminelle Zwecke anzupassen. Angesichts der massiven Verbesserung der Erschwinglichkeit und Zugänglichkeit sowie der Zunahme von Vorfällen ist diese Sorge berechtigt.¹⁴

2.2 Militärische Drohnen

Ob Überwachung aus 18.000 m Höhe oder gezielte Kamikaze-Angriffe: Drohnen sind heute wichtig für die moderne Kriegsführung. Länder wie die USA, China, Russland, Türkei und Israel investieren Milliarden in UAV-Programme. Inzwischen gehören auch kleinere Staaten zu den aktiven Drohnenmächten.

Militärische Drohnen gibt es in verschiedenen Größen. Die Dimensionen reichen von wenigen Zentimetern bis hin zur Größe von Verkehrsjets. In der Vergangenheit wurden die Drohnen für Aufklärungszwecke verwendet. Sensorpakete, bestehend aus optischen Sensoren, Infrarotkameras, Radar oder Sensoren zum Abhören des elektromagnetischen Signalspektrums erlauben die Aufnahme hochauflösender Luftbilder und die Übertragung von Livebildern durch Satelliten- oder Landfunkverbindungen, um das Geschehen am Boden in Echtzeit verfolgen zu können. Die militärische Aufklärung beschafft und sammelt Informationen über potenzielle oder tatsächliche Gegner und wertet diese aus. Operative und taktische Aufklärung sowie die Gefechtsfeldaufklärung bilden die Grundlage für eigene militärische Operationen. Mit Raketen oder Bomben bestückte Drohnen wurden erstmals vom US-Militär 2001 im Jemen eingesetzt. Weitere Einsatzgebiete für gezielte Tötungen waren u.a. Afghanistan, Pakistan, Syrien, Irak, Libyen oder Somalia. Heute werden sie auch von Russland, Ukraine, der Türkei oder nichtstaatlichen Akteuren verwendet. Heutzutage werden Drohnen immer mehr auch für Kampfhandlungen eingesetzt.

Der Krieg in der Ukraine zeigt es: Drohnentechnologie ist vom Gefechtsfeld nicht mehr wegzudenken. Die ferngesteuerten Systeme dienen verschiedenen Zwecken – von Aufklärung bis Verteidigung. Von der winzigen Black Hornet für die Aufklärung im Nahbereich bis hin zur mächtigen Heron TP mit einer Flughöhe von bis zu 12.500 m.

Kleinere und mittelgroße Drohnen werden vor allem nach ihrem Gewicht unterschieden. Bei bis zu fünf Kilogramm Gewicht werden sie als **Small Unmanned Aerial System** bezeichnet. Diese Drohnen werden in der Regel direkt von den Bodentruppen gestartet und gesteuert. Für die Echtzeitaufklärung im Nahbereich der Infanterie verfügt z. B. die deutsche Bundeswehr über die etwa 1,3 kg schwere Mikado und die rund 3,5 kg schwere Drohne Aladin¹⁵.

Deutlich größer und schwerer sind die Drohnen der Kategorie **Light Unmanned Aerial System**. Mit rund 40 kg Startgewicht und einer Flugzeit von bis zu sechs Stunden liefert die Drohne LUNA bei Tag und Nacht Video-Infrarotfilme und Standbilder in Echtzeit an ihre Bodenkontrollstation. Dabei kann LUNA bis zu 80 km weit fliegen. Das Fluggerät wird von einem leichten, geräuschlosen Seilfederkatapult gestartet, das für den Transport zusammenlegbar ist. Die Artillerietruppe benutzt für

¹³ <https://thebulletin.org/2019/10/the-dark-side-of-our-drone-future/>

¹⁴ <https://www.airuniversity.af.edu/JEMEAA/Display/Article/2329510/the-revolution-in-drone-warfare-the-lessons-from-the-idlib-de-escalation-zone/>

¹⁵ Mit dem ALADIN System werden detaillierte Überwachungs- und Aufklärungsinformationen in Echtzeit erhalten. Es ist ein tragbares System und benötigt keine Startbahn. Die Drohne hat eine Länge von 1,57 m und eine Flügelspannweite von 1,46 m. Das maximale Startgewicht beträgt 4 kg.

ihre Zielaufklärung vor allem das etwa 170 kg schwere KZO Kleinfluggerät für Zielortung. Das Kleinfluggerät für Zielortung fliegt in bis zu 3.500 m Höhe bis maximal 140 km weit.

Größere Drohnen werden in zwei Kategorien unterteilt: Die MALE (**Medium Altitude Long Endurance**) Drohnen mit mittlerer Flughöhe und langer Einsatzdauer fliegen etwa 10.000 m hoch und können länger als 24 Stunden in der Luft bleiben. Für den Einsatz in Afghanistan hat die deutsche Bundeswehr seit 2010 drei Aufklärungsdrohnen vom Typ Heron 1 von der israelischen Armee geleast. Diese werden demnächst durch das leistungsstärkere System German Heron TP abgelöst, welches auch bewaffnet werden kann, bis die Eurodrohne einsatzfähig ist. Die Eurodrohne ist das erste mittelgroße, langstreckentaugliche, unbemannte Luftfahrtsystem, das in Europa entwickelt wird. Die vier Startnationen – Deutschland, Frankreich, Spanien und Italien – haben zunächst 20 Systeme bestellt. Indien und Japan nehmen als Beobachter an dem Programm teil.¹⁶ Aktuell wurde die Designphase abgeschlossen¹⁷. Die Auslieferung ist voraussichtlich 2031.

Die Drohnen der HALE- (**High Altitude, Long Endurance**) Kategorie können mehr als 24 Stunden in der Luft bleiben, erreichen eine Flughöhe von etwa 20.000 m. Ihre Flügelspannweite ist mit der von großen Verkehrsflugzeugen vergleichbar. Die Streitkräfte der Vereinigten Staaten nutzen beispielsweise seit vielen Jahren die HALE Drohne Global Hawk und zur Seeüberwachung deren veränderte Version Triton. Die NATO hat zudem fünf Global Hawks für ihr Alliance Ground Surveillance Programm gekauft.

Die NATO teilt Drohnen nach Einsatzreichweite und Flughöhe in drei Klassen ein¹⁸:

- Klasse 1: Systeme unter 150 kg, die in der Ukraine am weitesten verbreitet sind und den größten Einfluss haben. Unterteilt in Micro (< 2 kg), Mini (< 15 kg) und Small (> 15 kg), operieren sie meist im Bereich von 5–50 km über Sichtverbindungen.
- Klasse 2: Drohnen mit 150–600 kg, hauptsächlich für taktische Einsätze konzipiert. Sie nutzen in der Regel Satellitenkommunikation (SATCOM) für Command and Control (C2), können jedoch auch Richtantennen verwenden, um Sichtverbindungen (LOS) über 200 km aufrechtzuerhalten.
- Klasse 3: Systeme mit einem Gewicht von über 600 kg (HALE/MALE). Sie operieren in Höhen von 10–20 km und dienen strategischen Zwecken. Beispiele: Global Hawk (HALE), Reaper und Bayraktar TB2 (MALE).

2.2.1 Entwicklung der militärischen Drohnen

Das britische und das US-amerikanische Militär begannen in den frühen 1940er Jahren mit sehr einfachen Formen von Drohnen, um die Achsenmächte auszuspionieren. Im Vietnamkrieg nutzten die USA Drohnen wie die Ryan 147A Fire Fly zur Aufklärung und elektronischen Nachrichtengewinnung. Israels Pioneer UAV von 1982 revolutionierte die Gefechtsfeldaufklärung und beeinflusste direkt den späteren US-Einsatz im Golfkrieg. Die 1994 eingeführte Predator-Drohne – das erste US-Mittelstreckensystem mit autonomen Funktionen – wurde in Bosnien, Somalia und Kosovo eingesetzt. Bereits 2001 waren über 5.000 Drohnen in Afghanistan aktiv. Spätere Modelle wie Raven, MQ-9 Reaper und Global Hawk erweiterten Aufklärungs- und Angriffsoptionen (CRIOLLO et al. 2024).

¹⁶ <https://esut.de/2025/09/meldungen/63398/eurodrone-europas-neuer-male-rpas-staerkt-verteidigungsautonomie/>

¹⁷ <https://www.hartpunkt.de/eurodrohne-schliesst-critical-design-review-erfolgreich-ab/>

¹⁸ <https://laender-analysen.de/ukraine-analysen/321/ukraineanalysen321.pdf>

UAVs gibt es seit dem Kalten Krieg, aber in den 1990er Jahren verfügten nur wenige Länder über UAV-Technologien der ersten Generation.¹⁹ Drohnen aus China, der Türkei und Israel schüren Konflikte wie den zwischen Armenien und Aserbaidschan.²⁰

Die Vereinigten Arabischen Emirate setzten die von China hergestellte Wing Loong-Drohnen (MALE) ein, um die libysche Nationalarmee innerhalb Libyens zu unterstützen. Auch türkische Drohnen griffen in 2019 die Truppen von Baschar al-Assad in der syrischen Provinz Idlib an.

Im Bergkarabachkrieg 2020 erlangte der Drohneneinsatz weitere Bedeutung, als Aserbaidschan durch türkische Bayraktar-Drohnen die Lufthoheit über Armenien errang (RUBIN 2020).

Als Drohnenangriffe in der Zeit nach den Terroranschlägen vom 11.9.2001 mit dem Predator durchgeführt wurden, wurden sie nur von Großmächten wie den Vereinigten Staaten eingesetzt. Das ändert sich jedoch, da sich die Drohnentechnologie auch in kleineren Ländern in Konfliktgebieten von Libyen bis zum Kaukasus verbreitet. Dass dies nicht schon früher geschehen ist, mag zum Teil daran liegen, dass die USA den Export ihrer teuren Predator- und Reaper-UCAVs auf enge Verbündete wie UK, Australien, etc. beschränkt haben. China, Israel und die Türkei haben jedoch ihre eigenen UCAVs entwickelt, die sie in großem Umfang exportiert haben (und im Falle von Israel und der Türkei auch intensiv einsetzen).

Die Türkei nutzt Kampfdrohnen im gesamten Nahen Osten. Die Erfahrungen aus der Operation Spring Shield - ein Angriff der türkischen Armee in Nordsyrien/Idlib gegen die Truppen von Assad - im Februar 2020 haben gezeigt, dass Kampf-UAVs äußerst effektiv auf dem taktischen Schlachtfeld sind. Der Preis ist ein wichtiger Faktor, der Drohnen für die zukünftige Kriegsführung attraktiv macht. Die türkischen Operationen in Idlib umfassten den taktischen und wesentlich kostengünstigeren **Bayraktar TB2** und den Mehrzweck-UAV **TAI Anka** (MALE). **Bayraktar TB2** (MALE) kann für Aufklärungs-, Überwachungs- und Aufklärungsmissionen sowie bewaffnete Angriffsmissionen eingesetzt werden.²¹

Der Staatskonzern Turkish Aerospace Industries (TAI) baut ebenfalls unbemannte Luftfahrzeuge. Das Grundmodell Anka-A wurde in den frühen 2000er Jahren für taktische Aufklärung und Fernerkundung eingesetzt. Die TAI ANKA 3 kann bis zu 1.200 kg Nutzlast mitführen. Im Gegensatz zu den Vorgängern aus der ANKA-Familie setzt TAI bei ANKA 3 auf Tarnkappentechnologie. Dazu gehört das Deltaflügel-Design, durch welches die Kampfdrohne für Radare weniger auffällig ist.²²

Auch nichtstaatliche Akteure erkannten das Potenzial der Drohnenkriegsführung. Der Islamische Staat setzte Drohnen in Syrien und im Irak ein, insbesondere während der Belagerung von Mossul 2016–2017.

Seit mehr als 20 Jahren wurden Drohnen mit Waffen ausgerüstet (z. B. *Predator*, *Reaper*) oder aber spezielle, bewaffnete Kampfdrohnen entwickelt und diese für gezielte Luft-Bodenangriffe eingesetzt. Dabei wurden Luft-Boden-Raketen (wie etwa die AGM-114 *Hellfire*) verwendet, die ursprünglich für Hubschrauber und Kampffjets entwickelt worden waren. Die Entwicklung ging in Richtung größerer Nutzlasten, höherer Geschwindigkeiten und besserer Stealth-Eigenschaften (d. h. sie sind für Radar nahezu unsichtbar). Derartige bewaffnete Drohnensysteme benötigen – in Abhängigkeit von der gewünschten Reichweite und dem Einsatzrahmen – zusätzliche Infrastruktur.

¹⁹ <https://www.airuniversity.af.edu/JEMEEA/Display/Article/2329510/the-revolution-in-drone-warfare-the-lessons-from-the-idlib-de-escalation-zone/>

²⁰ <https://www.nbcnews.com/think/opinion/cheap-drones-china-turkey-israel-are-fueling-conflicts-armenia-azerbaijan-ncna1243246>

²¹ <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2/>

²² <https://defence-network.com/tai-anka-3-stealth-kampfdrohne-der-tuerkei/>

Da Drohnen weniger Tragkraft haben als Kampfflugzeuge, verwenden sie kleine, aber präzise Raketen anstelle von groben, un gelenkten Bomben und Raketen. Aktuell kostengünstigere Drohnen wie z.B. Bayraktar TB2 bieten kleineren Ländern erschwingliche Möglichkeiten, Macht auszuüben.

Während noch vor 10 Jahren davon auszugehen war, dass keine kleineren militärischen Drohnen, die „standardmäßig“ bewaffnet oder z. B. mit Explosionsmunition ausgestattet sind, existieren, ist die Situation heute eine komplett andere. Insofern können auch terroristische Gruppierungen derartige bewaffnete Drohnensysteme besitzen.

Das US-Technologieunternehmen **Duke Robotics** hat eine Multikopter-Flugdrohne entwickelt, die in der Lage ist, während des Fluges auf Feinde zu zielen und zu feuern. Die **Drohne Tikad** ist mit einem Maschinengewehr und einem Granatwerfer bewaffnet. Auch ein Raketenwerfer oder ein Granatwerfer sollen sich in der Zukunft an der Tikad-Drohne befestigen lassen. Das Gewicht dieser größeren Waffen müsste gegenüber der Standardausführung aber reduziert werden. Derzeit kann die Tikad bis zu zehn Kilogramm Nutzlast transportieren.²³

In den 1980er-Jahren hatten das deutsche Heer und die USA ein Projekt gestartet, das Drohnen entwickeln sollte, die sich zum Angriff auf sowjetische Radaranlagen eignen. Der ehemalige deutsche Flugzeughersteller Dornier entwickelte dazu die 110 kg schwere Drohne Anti-Radar (DAR). Sie konnte feindliche Radaremissionen erkennen und sich autonom in ein Ziel stürzen. Damit ist sie ein Vorläufer der heutigen Kamikazedrohnen. Mit dem Ende des Kalten Krieges wurde das Projekt aber eingestellt. Aber die im Staatsbesitz befindliche israelische Firma IAI übernahm das Konzept und entwickelte daraus die bis heute erfolgreiche **Harpy-Drohne**, die wie ihr Nachfolgemodell **Harop** immer noch hergestellt und exportiert wird. Das Waffensystem ist eine Mischung aus Drohne und Marschflugkörper und gilt als erste im Einsatz befindliche Waffe der Gruppe der **Loitering Attack Munition**. Die etwa 2 Meter lange Drohne soll aktiv vorher bestimmte Ziele zerstören. Vor dem Angriff kann sie bis zu 6 Stunden über dem Ziel kreisen. Taucht ein vorher definiertes Ziel im Überwachungsbereich des Flugkörpers auf, kann die Drohne selbstständig den Angriff einleiten. Der 16-kg-Splittergefechtskopf explodiert beim Aufschlag.

Das Start-up-Unternehmen STARK hat im April 2025 den Bau einer neuen Kampfdrohne angekündigt. Die **Kamikaze-Drohne** ist in der Lage, mit ihrem Sprengkörper in der Luft „herumzulungern“ (Loitering Ammunition) bis sie ein geeignetes Ziel gefunden hat und sich dann im Flug darauf stürzt und es zerstört. Da sie also nur einmal zum Einsatz kommt, wird sie auch als „One Way Effector“ (OWE) bezeichnet und trägt den Namen „Virtus“ (V) – kurz **OWE-V**. Die neue Drohne ist KI-unterstützt, software-definiert, kostengünstig und schnell skalierbar. Bei der OWE-V handelt es sich um einen X-Flügler, mit einer Flügelspannweite von 1,8 m. Die Drohne ist ein Senkrechtstarter und benötigt daher keine speziellen Abschussvorrichtungen. Nach Angaben des Unternehmens kann die 30 kg schwere Drohne mit einer bis zu 5 kg schweren Nutzlast beladen werden. Die Flugzeit wird mit 60 Minuten angegeben. Die Einsatzreichweite beträgt 80 bis 100 km. Die Reisegeschwindigkeit liegt bei 120 km/h. Im Anflug auf das Ziel erhöht der OWE-V seine Geschwindigkeit auf bis zu 250 km/h.

2.2.2 Drohnenschwärme und KI

Eine der jüngsten Entwicklungen in der Drohnentechnologie ist die Fähigkeit, mehrere Drohnen gleichzeitig zu koordinieren. Diese sogenannten „**Schwärme**“ können die Verteidigungskapazitäten überwältigen. Die Fähigkeit von Schwärmen, sich selbst zu organisieren und zu koordinieren, wird

²³ <https://www.pcwelt.de/article/1166386/tikad-neue-killerdrohne-feuert-mit-sturmgewehr-auf-gegner.html>

sich mit zunehmender Rechenleistung weiter verbessern.²⁴ Ein neuerer Ansatz ist die Schwarmintelligenz, bei der mehrere Drohnen über KI zusammenarbeiten (BIJU et al. 2025).

Schon im Oktober 2017 kündigte z.B. das US-Verteidigungsministerium²⁵ einen der 'signifikantesten Tests autonomer Systeme' an - den Flug eines Schwarms von 103 Perdix-Drohnen, die in der Lage sein sollen Schwarmverhalten zu zeigen, Formation zu fliegen, gemeinsam ‚Entscheidungen‘ zu finden und Probleme zu lösen. Auch chinesische Forscher:innen testeten im gleichen Jahr den Einsatz von 119 Mikro-Drohnen.²⁶ Die Zielsetzung des Militärs ist die Entwicklung flexibler, anpassungsfähiger Drohnenschwärme, die selbstorganisiertes, synchronisiertes Verhalten aufweisen und komplexe Aufgaben ohne zentrale Steuerung lösen. Aktuell reduziert sich das – aufgrund der ungelösten Probleme – eher auf die Entwicklung von Software zum Einsatz von mehreren Drohnen gleichzeitig im Sinne des Überwältigen des Feindes – weniger mit Blick auf sogenannten emergente Fähigkeiten²⁷.

Im Februar 2025 erklärte der ukrainische Digitalminister, dass rund ein Dutzend Firmen im Land an Schwarmtechnologien arbeiten.²⁸ Bis Sommer 2025 sollen mehr als 100 Operationen mit Schwarmtechnologie durchgeführt worden sein. Übliche Schwärme bestehen dabei aus drei bis acht Drohnen, getestet wurde die Software bereits mit bis zu 25 Drohnen. Eine gängige Formation kombiniert eine Aufklärungsdrohne mit zwei Angriffsdrohnen²⁹.

Trotz der vielfach geäußerten Erwartung, dass sich die Drohnenkriegsführung rasch in Richtung fortgeschrittener, KI-gestützter Systeme entwickeln würde, zeigen die Entwicklungen sowohl in Russland als auch in der Ukraine, dass dieser Übergang langsamer verläuft als zunächst angenommen. KRYZHANIVSKA (2025) Die Ukraine entwickelte sich in den letzten Jahren zu einem Kriegslabor und Standort für Hightech-Waffen.³⁰ Bis Sommer 2025 wurde aber in keinem der beiden Länder eine Massenproduktion solcher hochentwickelten Systeme erreicht worden (STEPANENKO 2025).

2.2.3 Drohnen als „Gamechanger“ in der Ukraine

Drohnen sind zum entscheidenden Faktor im Ukrainekrieg geworden, die Verteidiger setzen sie ebenso in großer Stückzahl ein wie die russischen Angreifer. Sie beherrschen das Gefechtsfeld, spähen längst nicht mehr nur gegnerische Stellungen aus, sondern markieren Bodenziele für die Artillerie oder werfen selbst Sprengkörper ab.

Seit Beginn des russisch-ukrainischen Krieges prägen unbemannte Systeme zunehmend die militärischen Operationen an Land, in der Luft und zur See. Trotz der Erwartungen an rasante, KI-getriebene Innovationen bleibt die massenhafte Produktion derartig fortgeschrittener Systeme bisher begrenzt. Im Gegensatz dazu haben Low-Tech-FPV-Drohnen (First-Person-View) eine deutliche Wirkung auf dem Schlachtfeld entfaltet. Die Nutzung von Low-Tech-Alternativen gewinnt aktuell immer mehr an Bedeutung.

²⁴ Hier muss allerdings zwischen Schwärmen als „brute force“ und koordinierten Schwärmen unterschieden werden. Zweitere funktionieren bisher eher schlecht und bergen die Gefahr von „friendly fire“; vgl. Jutta Weber. Autonomous Drone Swarms and the Contested Imaginaries of Artificial Intelligence. *Digital War*, 5/2024, 146-149. <https://doi.org/10.1057/s42984-023-00076-7>

²⁵ <https://www.war.gov/News/Releases/Release/Article/1044811/departments-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration/>

²⁶ https://news.cgtn.com/news/3d4d6a4e3049444e/share_p.html

²⁷ Vgl. Weber, Jutta: Drohnenschwärme, Atomkraftwerke und atomare Zwischenlager. Die Aktion (2024), Nr. 4; <https://olaf.bbm.de/nummer-48-jutta-weber-drohnenschwaerme-atomkraftwerke-und-atomare-zwischenlager/>

²⁸ <https://ukranews.com/en/news/1066158-ukraine-to-create-drone-swarms-and-establish-explosives-production-by-end-of-year-digital>

²⁹ <https://www.wsj.com/world/ai-powered-drone-swarms-have-now-entered-the-battlefield-2cab0f05>

³⁰ vgl. u.a. Vera Bergengruen: How Tech Giants Turned Ukraine Into an AI War Lab. <https://time.com/6691662/ai-ukraine-war-palantir/>

Im aktuellen Russland-Ukraine-Krieg kommen erstmals Hunderttausende von eher kostengünstigen, FPV-Drohnen zum Einsatz. Dadurch änderte sich Kriegsführung grundlegend, denn Drohnen können heute u.a. teure High-Tech-Panzer und Hubschrauber zerstören. Zugleich werden Bewegungen im Kampffeld wesentlich schwieriger bzw. gefährlicher.³¹

Die sogenannten Kamikaze-Drohnen gelten im Ukraine-Krieg als „Gamechanger“. Im Juli 2024 gründete die Ukraine die Streitkräfte für unbemannte Systeme – die weltweit erste militärische Teilstreitkraft, die Luft-, Boden- sowie See- und Unterwasserdrohnen zur Erfüllung vielfältiger Aufgaben einsetzt.³² Diese strategische Initiative der Ukraine unterstreicht die entscheidende Rolle dieser unbemannten Systeme in modernen Kampfszenarien.

Während des bewaffneten Konflikts im Donbas 2014 begann die Ukraine, eine eigene Drohnenindustrie aufzubauen (JANKOWSKI 2023). Heute ist die ukrainische Drohnenproduktion stark dezentralisiert und umfasst mindestens 500 Produzenten, ergänzt durch zahlreiche kleine, nichtkommerzielle Hersteller, die kostengünstige Systeme in Heimarbeit montieren. Offiziellen Angaben zufolge produzierte die Ukraine im Jahr 2024 über zwei Millionen Drohnen³³ und plant, die Produktion auf vier Millionen zu steigern – mit einer potenziellen Kapazität von bis zu zehn Millionen Systemen im Jahr 2025.³⁴ Die Preise reichen von wenigen Hundert US-Dollar für FPV-Drohnen bis zu einer Viertelmillion US-Dollar für Langstrecken- oder Aufklärungssysteme.

Was zu Beginn des Ukraine-Krieges noch Science-Fiction war, ist heute Realität: der massenhafte Einsatz von Minidrohnen. Bei den FPV-Drohnen verfolgt der Pilot das Geschehen mit einer Videobrille, an die in Echtzeit Aufnahmen der Drohnenkamera übermittelt werden. FPV-Drohnen (Kamikaze-Drohnen) zeichnen sich gegenüber anderen Drohnen durch eine höhere Geschwindigkeit, extreme Wendigkeit und ihren niedrigen Preis aus. Die in der Ukraine eingesetzten tellergroßen Quadroptoren kosten nur rund 300 bis 400 Euro. Sie sind genügend leistungsfähig, um einen mehrere Kilogramm schweren Sprengsatz einige Kilometer weit zu transportieren und damit ein feindliches Ziel zu bekämpfen.

FPV-Drohnen werden an der Front immer wichtiger, da sie gezielte Angriffe ermöglichen. Anfang 2023 verkündete das Militär in der Ukraine, es wolle 1.000 Stück der FPV-Drohnen anschaffen. Ende 2023 erreichte die monatliche Produktion laut offiziellen Angaben bereits 50.000 Stück. Im Jahr 2024 beabsichtigte die Ukraine insgesamt 2 Millionen FPV-Drohnen herzustellen.³⁵

Die Entwicklung der Leistungsfähigkeit der FPV-Drohnen ist ebenfalls bemerkenswert, so werden z. B. seit Oktober 2023 FPV-Drohnen, die mit Splitter-/Hochexplosiv Sprengladungen ausgestattet sind, eingesetzt, seit Sommer 2024 größere Mutterschiff FPV-Drohnen, die andere kleinere FPV-Drohnen tragen und seit Herbst 2024 FPV-Drohnen, an denen Waffen (z. B. Granaten), die manuell oder automatisch abgeschossen werden können, befestigt sind.³⁶

Die Ukrainer:innen haben die Spendenorganisation *United24* ins Leben gerufen, die in Zusammenarbeit zwischen dem Präsidialamt und der Initiative „Armee der Drohnen“ organisiert wird.

³¹ vgl. Jutta Weber: Krise, Krieg und Künstliche Intelligenz. Über disruptive Plattformen, Technosolutionismus und abstrakte Gewalt. Manuskript; erscheint voraussichtlich Herbst 2026

³² Der russische Präsident Wladimir Putin kündigte im Juni 2025 die Schaffung einer eigenen Truppe für unbemannte Systeme an – etwa ein Jahr nach der ukrainischen.

³³ <https://united24media.com/latest-news/ukraine-becomes-worlds-leading-fpv-drone-producer-with-over-22-million-units-built-7527> .

³⁴ <https://english.nv.ua/nation/ukraine-s-drone-production-industry-capable-of-producing-up-to-10-million-drones-a-year-says-dm-50526939.html>

³⁵ Billig, klein, tödlich: Kamikaze-Drohnen machen den Soldaten in der Ukraine das Leben zur Hölle; Neue Züricher Zeitung, Andreas Rüesch 20.04.2024, <https://www.nzz.ch/international/ukraine-krieg-kamikaze-drohnen-machen-das-soldatenleben-zur-hoelle-ld.182>

³⁶ <https://laender-analysen.de/ukraine-analysen/321/ukraineanalysen321.pdf>

Gemeinsam sammeln sie Spenden aus der Wirtschaft und von Privatleuten, um mit dem Geld Drohnen für die ukrainische Armee zu finanzieren. Bei Drohnen, die *United24* übergab, soll es sich um die ukrainische **100 Phoenix 03 Heavy UCAV** handeln. Das ist eine FPV-Kamikaze-Drohne mit größerem Gefechtskopf, an dem laut *Forbes* offenbar mehrere Pfund schwerer Sprengstoff montiert werden kann.³⁷ Im Ukraine-Krieg kommen zahlreiche Kamikaze-Drohnen zum Einsatz, unter anderem die **Switchblade 300** ist zusammengeklappt so handlich, dass sie in jeden Rucksack passt. Sie wird mithilfe von Druckluft aus einem Rohr abgeschossen und verfügt über vier schwenkbare Flügel, die im Flug wie Springmesser herauskatapultiert werden. Der Gefechtskopf der *Switchblade 300* hat eine Sprengladung, die einer 40mm-Granate entspricht.

Russlands Krieg in der Ukraine hat eine außerordentliche Vielfalt unbemannter Systeme hervorgebracht. Allein im Mai 2025 setzten die ukrainischen Streitkräfte Berichten zufolge rund 400 verschiedene Typen gegen Russland ein.³⁸ Die Ukraine hat Berichten zufolge bis zum letzten Jahr in ihrem Krieg mit Russland über 1,2 Millionen Drohnen eingesetzt.³⁹

In der Ukraine werden Drohnen nach ihrer Bauweise (Quadrocopter, Starrflügler), Nutzlast und Propellergröße klassifiziert (BONDAR 2025). Nach Zweckbestimmung unterscheidet man sie üblicherweise in Aufklärungs-, Angriffs-, bewaffnete Plattformen (mit Raketen oder Bomben), »Loitering Munitions« (Kamikaze-Drohnen), Transport- sowie Mehrzwecksysteme, die mehrere dieser Funktionen kombinieren. Nach der Klassifikation des ukrainischen Verteidigungsministeriums werden Drohnen in folgende Kategorien unterteilt: Angriffs-FPV-Drohnen, Aufklärungs-Multikopter, Aufklärungs-Starrflügler, unbemannte Angriffsflugzeuge und Langstreckendrohnen.

Vidsyich ist eine Kampfdrohne, die in der Ukraine in Serie produziert wird. Die Drohne kann unter der Kontrolle eines Bedieners einen 2–3 kg schweren Sprengkopf über eine Entfernung von bis zu 40 km transportieren.⁴⁰ Eine ukrainische Drohne mit deutlich größerer Reichweite ist die **UJ-22 Airborne**, die von Ukrjet hergestellt wird und laut Hersteller eine Reichweite von bis zu 800 Kilometern hat. Diese Drohne ist ein multifunktionales unbemanntes Flugsystem, das bei elektronischen Gegenmaßnahmen eingesetzt werden kann. Sie kann Aufgaben im Bereich der Aufklärung, Suche und Rettung im Interesse von Armee, Polizei und Rettungsdiensten ausführen. Die Drohne kann verschiedene Arten von Nutzlast bis 20 kg transportieren.⁴¹

Seit 2018 kauft die Ukraine **TB2-Drohnen** der türkischen Firma Bayraktar Makina. Sie können sowohl im Kampf als auch zur Aufklärung eingesetzt werden. Der erste Kampfeinsatz einer türkischen Bayraktar-Drohne durch die Ukraine im Donbass sorgte weltweit für Aufsehen.⁴²

Die erste ukrainische Kamikaze-Drohne „**Yatagan**“ wurde 2015 getestet.⁴³ Die Produktion soll von 50 Drohnen pro Monat auf über 1.000 erhöht werden können. Dies ist Teil einer Regierungsinitiative namens „Army of Drones“, die die Einfuhrbeschränkungen und Steuern für Drohnentechnologie gelockert hat, um die Entwicklung einer lokalen Industrie anzukurbeln, die das Militär des Landes besser versorgen kann.

Russlands bekannteste gegen die Ukraine eingesetzte UAV ist die Kamikaze-Drohne **Shahed-136**, die von dem iranischen Unternehmen HESA entwickelt wurde. Aufgrund ihrer einfachen Konstruktion

³⁷ „Schwere Bomber-Drohnenflotte“: Ukraine zeigt imposantes Waffen-Arsenal, Stand: 28. Juli 2023, <https://www.merkur.de/politik/aerorozvidka-r-18-ukraine-offensive-kamikaze-drohnen-flotte-united-24-quadrocopter-92423156.html>

³⁸ <https://militaryni.com/en/news/aerorozvidka-co-founder-ukraine-used-400-types-of-drones-in-may/>

³⁹ <https://www.ausa.org/articles/does-anyone-know-what-attributable-drones-cost>

⁴⁰ <https://militaryni.com/en/news/serial-production-of-vidsich-uav-was-launched-in-ukraine/>

⁴¹ https://www.ukrspecexport.com/uploads/redactor/3%20USE_UMEX_Airborne_PRINT.pdf

⁴² <https://www.dw.com/de/diskussion-um-kampfdrohneneinsatz-in-der-ostukraine/a-59665012>

⁴³ <https://firstcontact.biz/en/>

und geringen Kosten wird sie in großen Mengen eingesetzt. Sie kommt gegen die Ukraine seit 2023 massive zum Einsatz. Die Drohne trägt eine Sprengladung von bis zu 60 kg, die beim Einschlag im Ziel detoniert. Die **Shahed-Drohnen** haben sich schnell zu einer heftigen Bedrohung für die Ukraine entwickelt. Russland hat die Shahed-136 zunächst direkt aus dem Iran importiert. Die russischen Nachbauten werden inzwischen in eigenen Fabriken gefertigt. In Russland tragen die nachgebauten Drohnen die Bezeichnung „Geran-2“. Die russische Rüstungsindustrie steigert die Produktion dieser Drohnenfamilie rapide – mit einem Ziel von über 6.000 Stück pro Monat.⁴⁴ Der Sprengkörper soll ukrainischen Medien zufolge inzwischen ein Gewicht von 90 kg haben; gleichzeitig wird der Einsatz von KI beobachtet, durch die das Abschussziel besser lokalisiert werden kann. Die Drohnen abzufangen, ist für die Ukraine eine große Herausforderung. In nächtlichen Schwärmen attackieren sie systematisch zivile Infrastruktur und Wohngebiete in der Ukraine. Am 8. Juli 2025 kamen z. B. mehr als 700 Drohnen in einer einzigen Nacht zum Einsatz.⁴⁵

Die Ukraine reagiert auf den Einsatz der Shahed Drohne mit dem Ausbau von FPV- und flugzeugähnlichen Drohnen – diese haben sich im Kampf gegen die Shahed offenbar bewährt. Und sie haben einen entscheidenden Vorteil: Sie sind kostengünstig. Die Ukraine setzt 500-Dollar-Drohne gegen die russischen Shahed-Drohne ein.⁴⁶

Das US-Verteidigungsministerium hat im Sommer 2025 eine neue Kampfdrohne namens Lucas („Low-Cost Unmanned Combat Attack System“) vorgestellt. Lucas ist eine kostengünstige Drohne. Sie wurde als Konkurrenz zur iranischen **Shahed 136** vom Unternehmen SpektreWorks entwickelt. Die **Lucas-Drohne** hat ein Startgewicht von bis zu 100 kg und fliegt bis zu 5.500 m hoch. Sie unterstützt wie die Shahed den schnellen Start von Lkw-Plattformen und soll analog zur iranischen Mini-Kampfdrohne in großen Stückzahlen zum Einsatz kommen. Auch die Lucas ist eine Einwegwaffe: Der Aufprall und die Explosion des mitgeführten Sprengkopfes zerstören auch das Luftfahrzeug.

Die Ukraine entwickelt und baut zwar selbst Drohnen und hat laut Präsident Wolodimir Selenski bereits mehr als eine Millionen verschiedene Drohnen ausgeliefert. Das Land ist aber auch auf Lieferungen seiner Alliierten angewiesen. Die ukrainischen Streitkräfte erhalten auch Drohnen von ausländischen Partnern. So wird Litauen 1.000 Kampfdrohnen an die Ukraine liefern. Die Regierung des Baltenstaats hat bei lokalen Herstellern für acht Millionen Euro mehr als 7.000 Kampfdrohnen bestellt. Davon sind gut 2.300 für die eigene Armee und knapp 5.000 für die Streitkräfte der Ukraine bestimmt.⁴⁷

Deutschland finanziert 4000 Kamikaze-Drohnen für die Ukraine. Die deutsche KI-Firma Helsing aus München hat gemeinsam mit einem ukrainischen Hersteller eine Kamikazedrohne konstruiert, die ihren Weg und ihr Ziel autonom findet.⁴⁸ Helsing hat angekündigt, nach einem ersten Auftrag von mehr als 4.000 kleinen Kamikaze-Drohnen weitere 6.000 Einheiten seiner elektrisch angetriebenen **HX-2** an das ukrainische Militär zu liefern.⁴⁹

Songbird 150 ist laut des deutschen Herstellers (Germandrones), eine der besten VTOL-Drohnen weltweit. Sie hat rund drei Meter Spannweite, ist 14 kg schwer und kann eine maximale Nutzlast von

⁴⁴ https://en.defence-ua.com/industries/how_much_russia_pays_for_shahed_now_down_from_300000_per_drone_in_2022-15585.html

⁴⁵ <https://netzpolitik.org/2025/deltaflugler-nach-russland-baut-nun-auch-us-firma-iranische-drohnen-nach/>

⁴⁶ <https://www.19fortyfive.com/2025/07/the-500-drone-thats-taking-down-russias-shahed-kamikaze-uavs/>

⁴⁷ <https://www.handelsblatt.com/politik/international/ukraine-selenski-eine-million-drohnen-fuer-streitkraefte-gebaut/100079653.html>

⁴⁸ <https://www.nzz.ch/international/ukraine-erhaelt-deutsche-strike-drohnen-veraendert-ki-einsatz-das-kampfgeschehen-ld.1857942>

⁴⁹ <https://netzpolitik.org/2025/deltaflugler-nach-russland-baut-nun-auch-us-firma-iranische-drohnen-nach/>

4,4 kg zu laden. Sie hat mehr als eineinhalb Stunden Flugzeit und ist mit HD- und Thermalkameras und Laserpointer ausgestattet. Das Unternehmen erhielt einen Monat nach Beginn des Ukrainekriegs die ersten Aufträge aus Kiew. Die Produktionskapazität in den beiden Werken in Berlin und nahe Mönchengladbach soll bis Ende 2025 von 50 auf 100 Stück pro Monat steigen.⁵⁰

Das lettische Unternehmen Belss hat mit seinem Start-up Eraser mit der Produktion von Militärdrohnen begonnen.⁵¹ Die lettische Firma Belss präsentiert kleine Drohnen für 2000 Euro, die äußerst wendig und pfeilschnell sind und sich mit Granaten oder anderen Sprengkörpern bestücken lassen.⁵²

Es ist auch geplant, dass französische Unternehmen zukünftig gemeinsam mit der Ukraine Kamikaze-Drohnen für die Ukraine und für Frankreich herstellen.⁵³

Bemerkenswert ist auch die folgende geplante Aktion der Ukraine in Hinblick auf die hier untersuchte Fragestellung: Am 1. Juni 2025 griffen mindestens 117 ukrainische, in Russland gestartete FPV-Drohnen gleichzeitig vier russische Militärflugplätze an. Die Drohnen beschädigten bis zu 20 strategische Flugzeuge der Russen, wodurch die Langstreckenangriffsfähigkeiten Russlands einen schweren Schlag erlitten. Der Angriff mit dem Namen „Operation Spider's Web“ markierte eine neue Dimension in der ohnehin schon schnelllebigen Drohnenkriegsführung und löste Warnungen aus, dass Nachahmerangriffe tief in das US-amerikanische Staatsgebiet vordringen könnten.⁵⁴ Die Drohnenteile und der Sprengstoff wurden in die Stadt Tscheljabinsk gebracht, dort in einer Lagerhalle montiert und in den Containern versteckt. Die Container wurden mit einem automatisch öffnenden Dach mit doppeltem Boden ausgestattet, in dem die Drohnen untergebracht waren. Die Container wurden von beauftragten (unwissenden) russischen Fahrern auf den LKWs in die Nähe der Ziele gefahren.

2.3 Rolle von Drohnen bei (zukünftigen) terroristischen Angriffen

In einem Fachartikel wurde zur Rolle von Drohnen bei zukünftigen terroristischen Angriffen festgestellt, dass die zunehmende Nutzung von Drohnen zu einer rasanten Entwicklung ihrer Fähigkeiten geführt hat.⁵⁵ (PLEDGER 2021) Zu den Verbesserungen gehören eine größere Reichweite, Geschwindigkeit, Nutzlastkapazität und neue Steuerungs- und Koordinierungsmethoden. Wie bei den meisten Technologien mit ziviler und militärischer Nutzung haben sich Terroristen Drohnen zunutze gemacht, um Angriffe gegen eine Vielzahl von Zielen durchzuführen. Die Bekämpfung von Drohnenangriffen durch Terroristen ist bereits problematisch und wird mit der zunehmenden legalen Nutzung und den verbesserten Fähigkeiten von Drohnen noch schwieriger werden – obwohl auch Fortschritte bei der Drohnenabwehr gemacht werden. (siehe Kapitel 3) Die massive Zunahme der Anzahl und der Fähigkeiten von Drohnen sowie der einfache Zugang und die leichte Bedienung von Drohnen zu niedrigen Kosten wird sie zu einer Waffe der Wahl für zukünftige Terroristen machen.

Die meisten Terroranschläge der Vergangenheit wurden mit Waffen und Materialien verübt, die leicht erhältlich waren. Viele Gruppen führen ihre Anschläge in der Erwartung durch, dass sich ihre

⁵⁰ <https://www.germandrones.com/de/>

⁵¹ <https://labsoflatvia.com/en/news/belss-ventures-into-a-new-development-direction-military-drone-design-and-production>

⁵² <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/verteidigung-bundeswehr-laedt-zum-drohnen-speeddating-fuer-die-ukraine/100084245.html>

⁵³ <https://militaryni.com/en/news/drone-production-lines-in-exchange-for-combat-experience-french-automotive-industry-is-coming-to-ukraine/>

⁵⁴ <https://www.ausa.org/articles/threats-sky-bayonet-innovation-team-takes-drone-warfare-next-level>

⁵⁵ Auch früher wurde schon vor dem Einsatz von Drohnen durch Terrorgruppen gewarnt: z. B. Noel Sharkey, 21 J.L. Inf. & Sci. 140 (2011-2012); Automating Warfare: Lessons Learned from the Drones; Paul Scharre, 2018

Mitglieder während des Anschlags opfern, indem sie entweder gefasst oder getötet werden. Der Einsatz von Drohnen kann es einem Einzelnen oder einer kleinen Gruppe jedoch ermöglichen, mehrere Anschläge ohne Selbstopferung durchzuführen.

Zwischen 1994 und 2018 fanden mehr als 14 geplante oder versuchte Terroranschläge mit Hilfe von Drohnen aus der Luft statt. Einige davon waren:

- 2013 wurde ein geplanter Angriff von Al-Qaida in Pakistan mit mehreren Drohnen durch die örtlichen Strafverfolgungsbehörden gestoppt;
- 2014 begann der Islamische Staat (IS), kommerzielle und selbstgebaute Drohnen bei Militäroperationen in Irak und Syrien in großem Umfang einzusetzen;
- 2018 wurden zwei mit Sprengstoff beladene, GPS-gesteuerte Drohnen bei einem gescheiterten Attentatsversuch auf den venezolanischen Präsidenten Maduro eingesetzt;
- 2018 griff ein Schwarm von 13 selbstgebauten Drohnen zwei russische Militärstützpunkte in Syrien an.

2024 kam es zum ersten Mal zu Todesfällen unter amerikanischen Soldaten durch einen Drohnenangriff mit einer nichtstaatliche Gruppe⁵⁶ als eine mit Sprengstoff beladene Drohne auf einen Außenposten in Jordanien zündete. Tatsächlich sind Streitkräfte, die gegen nichtstaatliche Gruppen kämpfen, seit langem mit der Bedrohung durch Drohnenangriffe konfrontiert.⁵⁷

Der Einsatz von Drohnen ist unter nichtstaatlichen bzw. terroristischen Akteuren weltweit verbreitet. Die Drohnen lassen z. B. improvisierte Sprengsätze fallen, überwachen die Bewegungen von Gegnern oder beobachten Angriffsziele. In dem Kontext ist auch bemerkenswert, dass bewaffnete nichtstaatliche Akteure in neun afrikanischen Ländern (Burkina Faso, der Demokratischen Republik Kongo, Kenia, Libyen, Mali, Mosambik, Nigeria, Somalia und dem Sudan) militärische Drohnen für Aufklärungs-, Spreng- und Propagandaverbreitungen erworben und eingesetzt haben.

Ein Terroranschlag mit Drohnenschwärmen wurde bereits 2019 bei Angriffen auf Saudi-Arabien mit mindestens 18 Drohnen und sieben Marschflugkörper durchgeführt, um die nationale Verteidigung zu durchbrechen.⁵⁸ Der Einsatz von Drohnenschwärmen ist taktisch sinnvoll, da er die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Angriffs erhöht, indem er die Verteidigung überfordert und überlastet.

Nicht nur die Rüstungsindustrie, sondern auch die rasche Verbreitung von zivilen Drohnen hat einen Markt geschaffen, der die technologische Verbesserung von Drohnen in absehbarer Zukunft weiter vorantreiben wird. Insgesamt werden diese Verbesserungen z. B. die Reichweite und die Tragfähigkeit von Drohnen erhöhen, wodurch sie sowohl tödlicher als auch schwieriger zu bekämpfen sein werden.

Terroristische Gruppen (IS, Hisbollah, Huthi etc.) setzen schon lange Drohnen zur Durchführung und Koordinierung von Anschlägen ein. Die rasanten Verbesserungen in der Drohnentechnologie und ihre zunehmenden Fähigkeiten werden terroristischen Gruppen zahlreiche neue Möglichkeiten bieten.

Die Fähigkeit einer kleinen Gruppe, mehrere Anschläge gleichzeitig durchzuführen, und zwar zu relativ geringen Kosten und aus großer Entfernung, wird dazu führen, dass Drohnen bei künftigen Terroranschlägen als taktisches Mittel eingesetzt werden. (PLEDGER 2021)

⁵⁶ Der Angriff wird einer im Irak ansässigen Gruppe der Hisbollah zugeschrieben.

⁵⁷ <https://icct.nl/publication/tower-22-innovations-drone-attacks-non-state-actors>

⁵⁸ <https://www.nbcnews.com/think/opinion/trump-sending-troops-saudi-arabia-shows-short-range-air-defenses-ncna1057461>

Die Verteidigung eines Atomkraftwerks gegen Drohnen bleibt eine Herausforderung, da diese ferngesteuert werden oder auch autonom agieren können und immer schwieriger zu verfolgen sind.

2.4 Fazit

Nicht nur die Rüstungsindustrie, sondern auch die rasche Verbreitung von zivilen Drohnen hat einen Markt geschaffen, der die technologische Verbesserung von Drohnen in absehbarer Zukunft weiter vorantreiben wird. Während in der Vergangenheit vor allem einerseits die großen bewaffneten Drohnen (z. B. Predator) und andererseits kleine zivile Hobby-Drohnen existierten, sind heutzutage eine Riesenbandbreite von Drohnen verfügbar. Die Systeme unter 150 kg (Nato Klasse 1) sind in der Ukraine am weitesten verbreitet und haben den größten Einfluss. Millionen Drohnen werden in der Ukraine und anderen Staaten in Europa für den Kampfeinsatz produziert. Eine vergleichsweise einfache Lösung entfaltete die größte Wirkung auf dem Schlachtfeld: First-Person-View-(FPV)-Drohnen, auch Kamikaze-Drohnen genannt.

Die Entwicklung im Ukraine-Krieg mehr auf eine große Anzahl von verfügbaren Low-Tech Drohnen zu setzen als auf teure innovative High-Tech Drohnen, macht Drohnen insgesamt – auch für Terroristen und nicht-staatliche Akteure – verfügbarer.

Bemerkenswert ist die „Operation Spider's Web“ in Hinblick auf die hier untersuchte Fragestellung: Am 1. Juni 2025 griffen mindestens 117 ukrainische, in Russland gestartete FPV-Drohnen gleichzeitig vier russische Militärflugplätze an. Die Drohnenteile und der Sprengstoff wurden in Russland in einer Lagerhalle montiert und in den Containern versteckt. Die Container wurden von beauftragten (unwissenden) russischen Fahrern auf LKWs in die Nähe der Ziele gefahren.

Terroristische Gruppen und nicht staatliche Akteure (IS, Hisbollah, Huthi etc.) setzen schon lange Drohnen zur Durchführung und Koordinierung von Anschlägen ein. Die massive Zunahme der Anzahl und der Fähigkeiten von Drohnen sowie der einfache Zugang und die leichte Bedienung von Drohnen zu niedrigen Kosten macht sie immer attraktiver für zukünftige Terroristen. Die Fähigkeit einer kleinen Gruppe, mehrere Anschläge gleichzeitig durchzuführen, und zwar zu relativ geringen Kosten und aus großer Entfernung, wird dazu führen, dass Drohnen bei künftigen Terroranschlägen eingesetzt werden.

3 Möglichkeiten und Grenzen der Drohnenabwehr

Drohnen sind in den letzten Jahren immer leistungsfähiger geworden: Flughöhe, Navigationspräzision, Reichweite und Fluggeschwindigkeit hat sich zunehmend gesteigert. Zudem sind Drohnen nicht nur kostengünstig, sondern meistens relativ leicht zu beschaffen und zu bedienen.

Gleichzeitig nahm die Zahl der Drohnenüberflüge von kritischen Infrastruktur stetig zu. Angeblich gab es bis kurz vor Ende 2025 mehr als 2000 Drohnenvorfälle in Deutschland⁵⁹. Allerdings werden schon lange Überflüge über kritische Infrastruktur inklusive von Nuklearstandorten gemeldet. Im Jahr 2022 kam es z.B. in Schweden zu mehreren Drohnenüberflügen über das Atomkraftwerk Forsmark.⁶⁰ In Frankreich gibt es schon lange Überflüge über AKWs. Im Dezember 2025 wurden Drohnen über dem französischen Marinestützpunkt in Île Longue mit seinen vier Atom-U-Booten gesichtet. Diese U-Boote können mit Atomraketen bestückt werden, die eine Reichweite von 10.000 Kilometern haben⁶¹.

Der Schutz ziviler Einrichtungen untersteht in Frankreich den jeweiligen Ministerien. Kommt es zu einer direkten Bedrohung wird die Luftwaffe alarmiert. Électricité de France (EDF) hat nach ersten

⁵⁹<https://www.welt.de/politik/article69394360c3b4893a9e2b41b7/russland-2000-deutsche-drohnenvorfaelle-und-die-spuren-in-putins-reich.html>

⁶⁰<https://futurezone.at/digital-life/drohnen-ueber-atomkraftwerk-forsmark-polizei-ermittelt/401872931>

⁶¹<https://www.handelsblatt.com/politik/international/sicherheit-drohnen-ueberfliegen-franzoesischen-atom-u-boot-standort/100181390.html>

Vorfällen verbesserte Überwachungssysteme eingeführt. Die Sicherheitsteams des Unternehmens entwickelten Dokumentationsverfahren zur Verfolgung von Flugwegen und Eigenschaften der Drohnen. Diese Verfahren zeigten Muster der Drohnenaktivitäten und potenzielle Schwachstellen in den bestehenden Sicherheitsmaßnahmen. Die regelmäßige Bewertung der Reaktionsprotokolle führte zu einer verbesserten Koordination zwischen der Sicherheit der Anlagen und den örtlichen Strafverfolgungsbehörden⁶².

Auch in Deutschland wurden zuletzt immer wieder unbekannte Drohnen über kritischen Infrastrukturen in den Industriegebieten in Stade und Brunsbüttel gesichtet. Dort befinden sich auch Lager für radioaktive Abfällen und über das Zwischenlager von CASTOR -Behältern mit abgebrannten Brennelementen. (WEBER&KRAATZ 2025) Seit Anfang August 2025 häufen sich außerdem nächtliche Überflüge unbekannter Drohnen über diesem Standort⁶³. Während genauere Nachfragen nach Herkunft, Typus und möglichen Motiven der Drohnen auch auf Nachfrage bei der Flensburger Staatsanwaltschaft unklar bleiben, ist bekannt, dass bereits mehrere Abfangversuche gescheitert sind. Unter anderem die leichte Zugänglichkeit von Drohnen in Kombination mit der unzureichenden Flugabwehr – auch in Europa –, tragen zur Gefahr bei.

Die zunehmenden Drohnenüberflüge in Europa wurden 2025 breit in Politik und Medien thematisiert. Gerne wurde spekuliert, ob die Drohnenüberflüge Teil russischer Spionage sind. Trotz des Trennungsgebots von Polizei und Militär in Deutschland wurde am 17.12.2025 vom Innenministerium ein "Gemeinsames Drohnenabwehrzentrum" (GDAZ) in Berlin eröffnet, welches die Polizeien von Bund und Ländern, das Bundeskriminalamts, die Bundespolizei sowie die Bundeswehr bei der Drohnenabwehr koordinieren soll⁶⁴.

3.1 Rechtliche Lage

Seit 2020 gilt in Frankreich die EU-Drohnenverordnung. Kamera-Drohnenpilot:innen müssen registriert sein. Der EU-Drohnenführerschein wird länderübergreifend anerkannt. In Frankreich müssen nicht nur die Betreiber angemeldet sein, sondern auch die Fluggeräte selbst. In Frankreich müssen zusätzlich bei Drohnen ab 800 Gramm und mit Remote-ID-Funktion auch die Drohne selbst angemeldet werden.

Drohnenflüge sind in Frankreich wie in Deutschland grundsätzlich in sogenannten „geografischen Gebieten“ bzw. Flugsverbotszonen verboten oder eingeschränkt zulässig, außer der Betreiber oder eine zuständige Behörde erteilt eine Ausnahme.

Zu diesen geografischen Gebieten zählen in Frankreich das ganze Stadtgebiet von Paris, aber auch generell Wohngebiete; die Umgebung von Atomkraftwerken, militärischen Einrichtungen, Industrieanlagen, Krankenhäuser, historische Denkmäler, Naturschutzgebiete und Nationalparks, etc. Zudem gibt es ein Nachtflugverbot⁶⁵. Die verbotenen Gebiete sind auf einer Karte eingezeichnet.⁶⁶

Zum Vergleich: In Deutschland gilt das Verbot in der Nähe von Flugplätzen und Flughäfen, Industrieanlagen, Gefängnissen, Kraftwerke und Anlagen zur Energieverteilung, oberste bzw. obere Bundes- oder Landesbehörden, Botschaften und Konsulate sowie Liegenschaften der Polizei und anderer Sicherheitsbehörden. Es gibt Sonderregelungen für Bundesfernstraßen, -wasserstraßen und Bahnanlagen, Wohngrundstücke, Freibäder und Badestrände, Krankenhäuser und Unfallorte.

⁶²<https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/protecting-nuclear-infrastructure-from-drone-threats/>

⁶³<https://www.spiegel.de/panorama/drohnen-ueber-chemcoast-park-brunsbuettel-behoerden-gehen-von-spionageangriff-aus-a-45de7019-b74e-456c-807c-6a72b021363b>

⁶⁴<https://www.deutschlandfunk.de/gemeinsames-drohnenabwehrzentrum-von-bund-und-laendern-eroeffnet-110.html>

⁶⁵<https://www.france.fr/de/artikel/nutzung-von-quadrocoptern-drohnen-frankreich/>; <https://drohnen-camp.de/drohnen-gesetze-in-frankreich/#weitere-regeln-fuer-den-betrieb-von-drohnen-in-frankreich>

⁶⁶ <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/restrictions-uas-categorie-ouverte-et-aeromodelisme>

Die Strafen für die Nichteinhaltung der europäischen und französischen Drohnenregeln können mit Haftstrafen zwischen einem und sechs Monaten oder Geldstrafen in Höhe von 15.000 bis zu 75.000 Euro bestraft werden. Die Beschlagnahmung der Drohne ist möglich.

Laut des deutschen StGB § 315 ist ein gefährlicher Eingriff in den Luftverkehr eine Straftat. Diese kann mit einer Freiheitsstrafe bis zu zehn Jahren geahndet werden. Es können Bußgelder von bis zu 50.000 Euro bei luftverkehrsrechtlichen Ordnungswidrigkeiten verhängt werden (StGB 315). Am 18. Dezember 2025 debattierte der Deutsche Bundestag zum ersten Mal den Entwurf der Bundesregierung für ein zweites Gesetz zur *Änderung des Luftsicherheitsgesetzes* (21/3252)⁶⁷: „Durch die Novellierung des Luftsicherheitsgesetzes (21/3252) sollen die Abwehrfähigkeiten gegen die hybriden Angriffe durch unbemannte Luftfahrzeuge (Drohnen) gegen Einrichtungen der kritischen Infrastrukturen und Flughäfen gestärkt werden, ... Den Streitkräften solle erlaubt werden, zur Unterstützung der Länder und Landespolizeien „Drohnen notfalls auch abzuschießen, wenn nur so ein besonders schwerer Unglücksfall abgewendet werden kann“⁶⁸.

Aktuell hat auch die EU-Kommission eine „Counter-Drone Expert Group“ eingerichtet mit Vertreter:innen aus Innen- und Verteidigungsministerien, Strafverfolgungsbehörden und nationale Geheimdienste. Man möchte operative Erfahrungen bündeln und strategische Empfehlungen formulieren. Zudem prüft die Kommission die Harmonisierung der Regeln für den Einsatz von Abwehrtechnik, um eine einheitliches EU-Regelwerk vorlegen zu können.⁶⁹

3.2 Technische Drohnenabwehr

Es gibt unterschiedlichste Methoden und Ansätze für die Abwehr von unbemannten Flugsystemen, da keine einzelne Technologie alle Szenarien abdeckt. Die Methoden lassen sich grob unterteilen in:

a) Erkennungs- und Identifizierungsmethoden:

Für die boden- und luftgestützter Sensorik gibt es:

- Radarsysteme, die Drohnen präzise orten und deren Flugbahn verfolgen können. Moderne Radarsysteme können Drohnen auch unter schwierigen Wetterbedingungen oder in dicht besiedelten Gebieten erkennen.
- Optische Sensoren (EO/IR-Kameras): Kameras mit Infrarot- und Nachtsichtfunktionen ermöglichen die visuelle Identifizierung von Drohnen – teilweise auch bei schlechten Lichtverhältnissen. Hier kann es auch zu Problemen bei schwierigen Wetterbedingungen kommen.
- Akustische Sensoren – also hochempfindliche Mikrofone – können kilometerweit entfernte Drohnen an ihren Geräuschen erkennen bzw. identifizieren und deren Trajektorie verfolgen. Hier können Störgeräusche auftreten, die den Betrieb beeinträchtigen.

Mit Hilfe von KI gestützten Algorithmen kann Kurs und Höhe der Drohnen berechnet und ihre Koordinaten ermittelt werden.

Mit fortschrittlichen Flugbahnberechnungssysteme können Sicherheitsteams potentielle Flugwege und Zielbereiche innerhalb der Anlagenbegrenzungen der AKWs einschätzen. Echtzeit-Geschwindigkeitsmessungen helfen dabei, Drohnentypen zu klassifizieren und ihre Einsatzmöglichkeiten zu bestimmen. Die kontinuierliche Höhenverfolgung soll Annäherungsmuster und potenzielle Nutzlastkapazitäten aufzeigen. Die Analyse von Richtungsänderungen soll Aufschluss über die Absichten der Bediener:innen und ihrer Intentionen geben. Die Überwachung der Flugdauer

⁶⁷ <https://dserver.bundestag.de/btd/21/032/2103252.pdf>

⁶⁸ <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2025/kw51-de-luftsicherheitsgesetz-1129194>

⁶⁹ <https://www.statewatch.org/media/5172/eu-council-drones-internal-security-15128-25.pdf>

hilft dabei, Batterielimits und mögliche Rück(zugs)wege einzuschätzen⁷⁰. Zugleich wird versucht den möglichen Standort der Drohnenbediener:innen zu bestimmen.

Zudem gibt es den Ansatz langfristig Kartierungen der Flugbewegungen zu erstellen, um schneller ungewöhnliche Drohnenflüge bzw. unbekannte Flugobjekte identifizieren zu können. U.a. unterhält die Firma Dedrone eine Datenbank mit Drohnenverstößen.⁷¹

b) Abwehrmaßnahmen (Soft-Kill)

Die Drohne wird bekämpft, indem per Funk gesteuerten Drohnen entweder Frequenzen oder die (von den Satelliten gesendete) GPS-Signale mit sogenannten Jammern blockiert werden. Diese wirken mittels elektromagnetischer Wellen, d.h. sie senden auf der gleichen Frequenz und übertönen das eigentliche Signal. Dies kann die Drohnen zum Stand in der Luft, zur Landung oder auch zum Absturz bringen. Manche versuchen auch zum Ausgangspunkt zurückzufliegen. Diese elektromagnetischen Wellen können die Internet- und Handykommunikation massiv beeinträchtigen oder diese ganz zum Zusammenbruch bringen. Die Nutzung von Jammern ist in Deutschland nur staatlichen Organen für die unmittelbare Gefahrenabwehr erlaubt (HEIN 2024). Zudem deckt das Jamming nur bestimmte Frequenzbänder ab, so dass es unter Umständen auch umgangen werden kann (CHRISTEN et al. 2018). Jamming erfordert (teures) Fachpersonal.

Theoretisch lassen sich die Signale jedoch nicht nur blockieren, sondern auch durch eigene GPS-Signale überlagern. Mit sogenannten GPS-Spoofern werden falsche GPS-Signale vorgetäuscht. Zudem können Drohnen durch gefälschte Steuerbefehle (Command and Control C2 Hijacking) irregeführt werden. Theoretisch könnten Drohnen so auch übernommen und anschließend ferngesteuert werden.

Im Krieg in der Ukraine setzt man auch Drohnen ein, die gegen solche Angriffe nahezu immun waren, da die Signale über hauchdünne Glasfaserkabeln geschickt werden, die die Drohnen mit den Pilot:innen verbindet. Diese Glasfaserkabel sind an der Front bis zu 20 Kilometer lang. Die Verbindung bricht nur ab, wenn das Kabel reißt.⁷²

Eine weitere Möglichkeit ist, die Drohnen in der Luft abzudrängen, zu eskortieren oder zur Landung zu zwingen. Vom Boden oder aus der Luft könnten theoretisch Warnschüsse abgegeben werden. Drohnen abzuschießen ist technisch möglich.

c) Harte Abwehrmaßnahmen (Hard-Kill)

Es gibt die Möglichkeit der Abwehr durch Greifvögel, die sich aber nicht durchgesetzt hat, weil sie teuer, aufwändig und nicht sehr zuverlässig ist, sowie das Abfangen der Drohnen durch Abfangdrohnen mit Netzen. Kleinere bodengestützte Netzwerfer versuchen mit Hilfe von Multisensorik und zwei Netzen auch eher kleinere Drohnen einzufangen (vgl. z.B. die Drohne ‚Falke‘ der Hamburger Bundeswehr für kleine Drohnen bzw. Small UAVs). Diese Methode lässt sich nur in einem kleinen Radius nutzen und ist relativ ungenau. Dafür produziert sie kaum Trümmerteile, die Menschen und Objekte gefährden. Zudem bleibt bei dieser Methode die gefangene Drohnen eventuell noch intakt, so dass man sie z.B. auf Herkunft und Typus untersuchen zu können.

Es gibt Flugabwehrsysteme in Form von Kanonen. In Frankreich nutzt man zumindest in militärischen Kontext ein 40mm RapidFireSystem, das gemeinsam von KNDS France und Thales entwickelt wurde. Es basiert auf einer CT 40 Kanone, die mit Teleskopmunition (CT) mit Gehäuse arbeitet, welche eine größere Feuerkraft und effizientere Munitionsnutzung besitzt. Seit 2023 gibt es eine Marineversion von RapidFire. Die Landversion von 2025 wird zum Schutz von Militärstützpunkten, militärischen

⁷⁰<https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/protecting-nuclear-infrastructure-from-drone-threats/>

⁷¹<https://de.dedrone.com/>

⁷²<https://www.zeit.de/politik/deutschland/2025-10/drohnenabwehr-abschuss-jamming-bundeswehr-verteidigung>

Kommandoposten und Logistikzentren genutzt. Das System kann bis zu 200 Schuss pro Minute abfeuern und Drohnen in einer Entfernung von bis zu vier Kilometern treffen.

In Deutschland nutzt man u.a. die mobile Luftabwehr namens Skyranger von Rheinmetall, der Drohnenschwärme abwehren soll. Zum Schutz von Atomanlagen in der unmittelbaren Nähe wären solche Kanonen eher unbrauchbar, da der Abschuss von Drohnen mit einem hohen Anteil von Trümmerteilen einhergeht, die Schäden verursachen können – außer man kann die Drohnen in entsprechend sicherer Entfernung vom AKW abschießen.

Eine weitere Methode ist die Lasertechnologie, die Hochleistungslaser schalten mit gezielter Strahlführung und -formung Ziele aus. So hat das britische Militär kürzlich demonstriert, wie es mit seinem DragonFire-System eine militärische Drohne abschießt, die mit 650 Km/h fliegt (STIELER 2026).

Weiterhin wird Drohnenabwehr mit Elektromagnetische Wellen – High-Power Electromagnetics (HPEM) – praktiziert. Diese hochfrequente Mikrowellenwaffen für die Abwehr von Drohnenschwärmen können Störungen bis zum Totalausfall von elektronischen Teile der Drohne verursachen. Auch hier besteht die Gefahr, dass es zu einer großen Zahl von Trümmerteilen kommt, die Schäden verrichten können, was wiederum Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung haben kann.

Für alle diese Maßnahmen gilt, dass der Erfolg natürlich auch von der Größe, dem Gewicht, der Geschwindigkeit der Drohnen und ihrer Bauart bzw. technischen Ausgereiftheit der Software abhängen. Ein leichter Multicopter ist einfacher abzufangen als ein großer, schwerer Drohnenjet oder ein MALE-System, das bis zu 20 m Länge aufweisen kann.

In den folgenden Tabellen sind die Methoden mit ihren Vor- und Nachteilen noch einmal zusammenfassend dargestellt.

a) Erkennungs- und Identifizierungsmethoden

Methode	Funktionsweise	Vorteile	Nachteile
Radarsysteme		Präzise Ortung	
Optische Sensoren (EO/IR-Kameras)	Erkennung durch Elektrooptik mit Infrarotkameras	Erkennung	Eher anfällig bei schwierigen Wetterverhältnissen
	Alarm Auslösen Sonic AI: Erkennung von kilometerweit entfernten Drohnen mit zwei hochempfindlichen Mikrofonen	Zur Verfolgung und näheren Identifizierung	Störgeräusche die auftauchen könnten → false positives
KI gestützte Algorithmen	Errechnung von Kurs und Höhe der Drohnen und Ermittlung genauer Koordinaten	Mustererkennung, Erkennung von Drohnen und anderen Objekten	Fachpersonal

b) Abwehrmaßnahmen (Soft-Kill):

Methode	Funktionsweise	Vorteile	Nachteile
---------	----------------	----------	-----------

Jamming (REX-1 und REX-2)	Stören von Funksignalen	Störung Kommunikations-kanäle; Behinderung der Navigation → führt zum Stand, Landung oder Rückkehr der Drohne	Fachpersonal; teuer
GPS-Spoofing & Steuerungsübernahme	Hacking der Software einer Drohne über die Kommunikations- schnittstelle	Drohne von ihrer eigentlichen Route abbringen; Steuerung übernehmen	Fachpersonal; teuer

c) Harte Abwehrmaßnahmen (Hard-Kill)

Methode	Funktionsweise	Vorteile	Nachteile
Bodengestützte Netzwerfer	Mit Multi-Sensorik und zwei Netzwerfern, bei dem die Drohne mit einem Netz gestoppt wird	Abfangen der Drohne; kaum Trümmerteile; eventuell wären Drohnen noch intakt, um sie untersuchen zu können	Kleiner Radius; Ungenauigkeit;
Skyranger (Rheinmetall)	Flugabwehr-system; Kanonensysteme	Schutz vor Schwarmangriffe	Hoher Anteil von Trümmerteilen, die Schäden verursachen können
Laser	Lasertechnologie mit gezielter Strahlführung und - formung Ziele auszuschalten	Nahezu unbegrenzten Munitionsvorrat; Kostengünstig	Erkennung und Zielverfolgung; Strahl muss lange Zeit auf das Ziel gehalten werden
Elektromagnetische Wellen High-Power Electromagnetics (HPEM)	Hochfrequente Mikrowellenwaffen für die Abwehr von Drohnen-schwärmen	Fehlfunktionen bis hin zum Totalausfall oder zur Zerstörung elektronischer Bauteile der Drohne	Hoher Anteil von Trümmerteilen, die Schäden verursachen können; Eventuelle Auswirkung auf die unmittelbare Umgebung

3.3 Politische und finanzielle Situation

Angesichts der vielen aktuellen Störungen durch Drohnen an Flughäfen und anderer kritischer Infrastruktur wurden in Frankreich wie in Deutschland zusätzliche finanzielle Ressourcen für die Drohnenabwehr bereitgestellt.⁷³

In Frankreich liegt die Zuständigkeit für staatliche Drohnenerkennung und -abwehr primär bei dem Innenministerium (Sicherheit, Ordnung) und dem Verteidigungsministerium. Für kritische Infrastrukturen arbeiten Ministerien eng mit der Luftfahrtbehörde und den Streitkräften zusammen.⁷⁴ Im konkreten Fall des Drohnenschutzes an Atomkraftwerken ist EDF beteiligt und trägt mit den zuständigen Behörden zur Überwachung und Abwehr bei.

In Deutschland ist die Zuständigkeit für Drohnenerkennung und -abwehr über verschiedene Akteure und Organisationen verteilt. Zum einen sind die Bundesländer zuständig, die aber bisher wenig Mittel zur Bekämpfung haben. Die Bundespolizei war bisher nur für Flughäfen und Bahnhöfe zuständig. Diese sollen aber in Zukunft die Länder unterstützen. Am 02. Dezember 2025 wurde die Drohnenabweereinheit der Bundespolizei in Dienst gestellt, die entsprechendes Personal ausbildet und die Länder unterstützen soll. Konkrete Angaben, welche Abwehrmaßnahmen wie geplant sind, sind noch nicht bekannt.⁷⁵

Die Bundeswehr wiederum hat eigene Systeme zur Drohnenabwehr zur Sicherung ihrer eigenen Anlagen. Die Veränderung des Luftsicherheitsgesetzes zielt darauf, dass sie künftig auch im zivilen Bereich Drohnen abschießen darf. Am 17. Dezember 2025 wurde ein Drohnenabwehrzentrum in Berlin eröffnet.⁷⁶ Dort soll eine bundesweite Strategie für die Drohnenabwehr und die Erstellung eines nationalen Lagebildes erstellt werden. Vertreter der Sicherheitsbehörden, des Bundeskriminalamts, der Bundeswehr und der Nachrichtendienste sollen dort Informationen austauschen und Einsatzmaßnahmen koordinieren.⁷⁷

3.4 Fazit und Herausforderungen

Aktuell gibt es keine überzeugende Abwehrmethode. Die verschiedenen Ansätze sind kontextuell einzusetzen und nicht immer überzeugend. Zudem herrscht Mangel an speziellem Fachpersonal für die Bedienung und Wartung der komplexen Erkennungs- und Abwehrtechnologien.

Zudem gibt es ein sogenanntes ‚urbanes Dilemma‘: In dicht besiedelten Gebieten ist der Einsatz von Hard-Kill- oder sogar physischen Abfangsystemen aufgrund der potenziellen Kollateralschäden – also des Problems, dass Trümmerteile der abgeschossenen Drohnen auf Menschen oder Infrastruktur fallen könnten und eventuell sogar Brände auslösen könnten – meist verboten, da sie mit unvermeidbaren Sicherheitsrisiken verbunden sind.⁷⁸ Dies ist vermutlich für Atomkraftwerke durchaus relevant. Zudem gibt es eine eingeschränkte Verfügbarkeit von Systemen wie z.B. dem Skyranger⁷⁹, der nicht

⁷³<https://www.thedefensenews.com/news-details/France-Accelerates-Base-Protection-with-30mm-and-40mm-Anti-Drone-Defense-Systems/>; <https://www.tagesspiegel.de/politik/gefahr-aus-der-luft-30-millionen-euro-zusatzlich-fur-drohnenabwehr-noch-in-diesem-jahr-14841491.html>; 14.11.2025

⁷⁴<https://esut.de/2025/10/meldungen/64197/frankreich-forciert-drohnenabwehr/>; letzter Aufruf 22.12.2025

⁷⁵ Bundesministerium des Innern „Aufspüren – Abwehren – Abfangen: Bundesinnenminister Dobrindt stellt Drohnenabweereinheit der Bundespolizei in Dienst“; <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/DE/2025/12/drohnenabwehrzentrum.html>; 02.12.2025

⁷⁶ Dietrich Karl Mäurer: Drohnenabwehrzentrum in Berlin eröffnet. [ARD Berlin, tagesschau](https://www.tagesschau.de/inland/innenpolitik/drohnenabwehrzentrum-104.html); <https://www.tagesschau.de/inland/innenpolitik/drohnenabwehrzentrum-104.html>; 17.12.2025

⁷⁷ Für weitergehende Probleme von Drohnenangriffen und -abwehr – vor allem im militärischen Kontext vgl. auch (WEI et al. 2024).

⁷⁸ ZDF „Drohnenabwehr: Welche Systeme es gibt“ 26.09.2025; <https://www.zdfheute.de/politik/deutschland/drohnen-drohnenabwehr-deutschland-bundeswehr-polizei-feuerwehr-100.html>

⁷⁹ Rheinmetall: Mobile Flugabwehr Skyranger. <https://www.rheinmetall.com/de/produkte/flugabwehr/flugabwehrsysteme/mobile-flugabwehr-skyranger>

großflächig im Einsatz ist. Eine große logistische Herausforderung stellt aktuell dar, dass die Systeme zur richtigen Zeit am richtigen Ort sein müssen sowie die unklare rechtliche Situation.

Die Abwehrmaßnahmen sind insgesamt nicht überzeugend, weil zum einen in dicht besiedelten Gebieten der Einsatz von Hard-Kill-Systemen oder sogar physischen Abfangsystemen aufgrund der potenziellen Kollateralschäden bzw. unvermeidbaren Sicherheitsrisiken problematisch ist. Zum anderen gibt es logistische Probleme: Da es keine allumfassende Methode zur Abwehr gibt, müssten alle möglichen Technologien am entsprechenden Ort vorrätig gehalten werden, was eher unrealistisch ist. Ein kurzfristiger und vor allem sehr schneller Transport ist meist nicht möglich.

4 Verwundbarkeit der französischen Atomkraftwerke gegenüber Terrorangriffen

Das neue französische Atomkraftwerk Flamanville 3, ein EPR, ein Druckwasserreaktor (DWR) der 3. Generation, wurde am 21. Dezember 2024 nach 17 Jahren Bauzeit erstmals an das Stromnetz angeschlossen.

Die anderen 56 französischen Atomkraftwerke sind DWR der zweiten Generation und lassen sich in drei Klassen einteilen.

900-MWe-Reaktoren (32 Reaktoren): Der Bau erfolgte größtenteils zwischen Anfang der 1970er und Ende der 1980er Jahre. Unterteilt in Typ CP0 (Bugey 2-5), Typ CP1 (Blayais 1-4; Dampierre 1-4; Gravelines 1-6; Tricastin 1-4) und Typ CP2 (Chinon 1-4; Cruas 1-4; Saint Laurent 1&2). Die CP0-Blöcke wurden als erste in Betrieb genommen, gefolgt von den Serien CP1 und CP2. Während die Blöcke 1 und 2 von Fessenheim (CP0) endgültig stillgelegt wurden, plant EDF, die Betriebsdauer aller anderen Blöcke über vierzig Jahre hinaus zu verlängern. (ASN 2011, 2022)

1300-MWe-Reaktoren (20 Reaktoren): Die Bauzeit begann Ende der 1970er Jahre und dauerte bis Ende der 1990er Jahre. Sie sind unterteilt in Typ P4 (Belleville 1,2; Flamanville 1&2; Paluel 1-4; Saint Alban 1&2) und Typ P'4 (Cattenom1-4; Golfech 1&2; Nogent 1&2; Penly 1&2).

1450-MWe-Reaktoren (4 Reaktoren): Der Bau begann Mitte der 1980er Jahre und wurde im Jahr 2000 abgeschlossen. Sie werden als Typ N4 (Chooz1&2; Civaux 3&4) bezeichnet.

4.1 Störfallanfälligkeit und Nachrüstungen der Reaktoren

Die 900-MWe Reaktoren der Atomkraftwerke sind besonders verwundbar gegen externe Einwirkungen: Der Reaktorkern wird nur von einem relativ dünnwandigen Containment (Stärke: 90 cm) umgeben. Diese Auslegung entspricht nicht mehr dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik. Für Neubauprojekte wird eine Gebäudestärke von rund zwei Metern für erforderlich gehalten.

Das Containment umschließt den Primärkreislauf und den Reaktordruckbehälter, der den Brennstoff enthält. Es soll zum einen verhindern, dass die radioaktiven Stoffe (etwa bei einem Kühlmittelverlust) in die Atmosphäre gelangen und zum anderen einen Schutz vor Einwirkungen von außen gewährleisten.

Die Reaktoren der 1300 MWe-Klasse und der 1450 MWe-Klasse sind zwar besser, aber dennoch nicht ausreichend gegen Einwirkungen von außen geschützt. Die Reaktoren sind mit einem doppelwandigen Containment ausgestattet, jedoch ebenfalls von geringer Wandstärke (90 cm).

Insbesondere die alten Atomkraftwerke mit den Reaktoren der 900-MWe Klasse, aber auch der 1300-MWe Klasse, weisen eine Reihe von Auslegungsdefiziten auf, die sowohl die Angriffsmöglichkeiten

als auch den potenziellen „Erfolg“ eines Terrorangriffs erhöhen. Insbesondere da die älteren französischen Atomkraftwerke nicht nur verwundbar gegen externe Einwirkungen sind, sondern zudem Auslegungsmängel in der Störfallbeherrschung aufweisen.

Die Betriebsgenehmigung für französische Atomkraftwerke (AKW) ist zeitlich nicht begrenzt. Allerdings werden französische AKW alle zehn Jahre einer periodischen Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) unterzogen. Diese hat zwei Hauptfunktionen: eine Konformitätsprüfung, um zu überprüfen, ob die Anlagenkomponenten den erforderlichen Sicherheitsstandards entsprechen, und eine Sicherheitsneubewertung, bei der die Anlage mit dem aktuellen Sicherheitsstandard verglichen wird. Die vierte PSÜ spielt eine besondere Rolle, da sie den Genehmigungsprozess für den Langzeitbetrieb (LTO) eines AKWs über 40 Jahre hinaus kennzeichnet.

Die Alterung betrifft nicht nur die physischen Systeme, Strukturen und Komponenten (SSCs), sondern auch die Sicherheitsstandards, nach denen das Atomkraftwerk ausgelegt wurde. Diese werden oft durch modernere, strengere Standards ersetzt. Die Erfahrungen aus schweren Unfällen haben die Entwicklung dieser Standards konsequent vorangetrieben und die Anforderungen an die Auslegung von Atomkraftwerken erhöht. Folglich besteht ein Aspekt der vierten PSÜ darin, Abweichungen (Lücken) zwischen der aktuellen Auslegung des Atomkraftwerks und dem aktuellen Stand der Technik zu identifizieren. EDF und die ASNR haben vereinbart, die Sicherheitsniveaus der französischen Atomkraftwerke, an den Standards zu messen, die für den EPR Flamanville 3 gelten, der als aktueller Stand der Technik gilt.

Frankreich führt die 4. PSÜ in zwei Phasen durch, einer generischen und einer spezifischen Phase. Die generische Phase endete mit der Veröffentlichung der Stellungnahme der ASNR am 23. Februar 2021, die allgemeine Vorschriften enthielt, die zuvor Gegenstand einer öffentlichen Konsultation gewesen waren. (ASN 2021) Nach Abschluss der generischen Phase soll über einen Zeitraum von etwa zehn Jahren (von 2019 bis 2031) die reaktorspezifische Phase inklusive Inspektionen aller 32 900-MWe Reaktoren folgen.

Die bestehenden grundlegenden Defizite bei den 900 MWe-Reaktoren gegenüber Anforderungen an die Sicherheit werden im Rahmen der 4. PSÜ durch die Nachrüstungen als Voraussetzung für einen Betrieb über die ursprüngliche Laufzeit hinaus nicht beseitigt. Sie betreffen u.a. die geringe Redundanz bei den Sicherheitssystemen, den ungenügenden Schutz gegen externe übergreifende Einwirkungen sowie Defizite bei der Gewährleistung der Unabhängigkeit der Sicherheitsebenen des Gestaffelten Sicherheitskonzepts.

Abweichungen von aktuellen Sicherheitsanforderungen zur Störfallbeherrschung sind z. B., dass alle Systeme des sekundärseitigen Notspeisesystems auf einem einzigen Notspeisewasserbehälter basieren. Zudem sind die Sicherheitssysteme grundsätzlich nur zweifach redundant ($n + 1$). Für den EPR ist ein höherer Grad an Redundanz ($n + 2$) gefordert.

ASNR verweist auf die geplante Nachrüstung auf den sogenannten Hardened Safety Core (HSC). Der HSC, der eine wichtige Rolle bei der Vermeidung von Kernschmelzunfällen, aber auch bei der Minderung der Folgen von Kernschmelzunfällen spielen soll, ist an vielen Standorten noch nicht vollständig implementiert. Darüber hinaus ist nicht sichergestellt, dass der HSC nach vollständiger Implementierung ausreichende Sicherheitsanforderungen erfüllen kann. Der HSC kann die bestehenden Defizite der Sicherheitssysteme nicht kompensieren. (UMWELTBUNDESAMT 2019)

Schwere Unfälle (SA) mit Kernschmelze wurden bei der Auslegung der französischen 900-MWe-Reaktoren nicht berücksichtigt. Als Ergebnis früherer periodischer Sicherheitsüberprüfungen (PSÜs) wurden jedoch Einrichtungen und Maßnahmen für das SA-Management implementiert. Laut ASNR besteht das Ziel der 4. PSÜ für die 900-MWe-Reaktoren darin, das Sicherheitsniveau des Reaktors näher an das des EPR in Flamanville, einem Reaktor der dritten Generation, heranzuführen. In

Reaktoren der dritten Generation wurden bereits Einrichtungen zur Minderung der Auswirkungen von Kernschmelzunfällen in die Auslegung integriert; diese können nicht vollständig auf Reaktoren der zweiten Generation übertragen werden.

Die im Rahmen der 4. PSÜ geplanten Modifikationen für den Fall eines Kernschmelzunfalls bestehen im Wesentlichen auf einer Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter ohne Öffnung des gefilterten Druckentlastungssystems sowie auf einer Stabilisierung und Kühlung des Coriums auf dem Fundament. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand kann ein Versagen des Sicherheitsbehälters nach der Umsetzung der Modifikation zur Stabilisierung und Kühlung des geschmolzenen Kerns nicht ausgeschlossen werden. Zum einen sind noch nicht alle wichtigen Modifikationen umgesetzt, zum anderen lässt sich anhand der vorliegenden Informationen nicht beurteilen, ob die Modifikationen ausreichend sind.

Die geplanten Modifikationen zur Wärmeabfuhr ohne Einsatz des gefilterten Druckentlastungssystems im Falle eines Kernschmelzunfalls sind noch nicht vollständig umgesetzt. Darüber hinaus wurde die Verstärkung des gefilterten Druckentlastungssystems (U5-System) gegen schwere Erdbeben noch nicht durchgeführt. Das bedeutet, dass auch nach Abschluss aller Maßnahmen der Phase A der 4. PSÜ ein Kernschmelzunfall mit einer erheblichen Freisetzung radioaktiver Stoffe weiterhin möglich ist. Die meisten Maßnahmen sollen erst am Ende der Phase B, die bei einigen Reaktoren erst in den 2030er Jahren endet, umgesetzt werden.

Bei einem schweren Unfall ohne Beschädigung des Containments können - falls die Nachrüstungen vollständig umgesetzt sind -, voraussichtlich potenzielle radioaktive Freisetzungen reduziert werden. Als vollständig erwiesen, ist dies allerdings nicht anzusehen. (UMWELTBUNDESAMT 2025)

Bei Zerstörungen im Containment durch einen Drohnenangriff ist allerdings nicht davon auszugehen, dass die Nachrüstungen radioaktive Freisetzungen wirkungsvoll verhindern können.

4.2 Anfälligkeit des Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente

In den französischen Atomkraftwerken⁸⁰ befindet sich das Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente (Spent Fuel Pool - SFP) nicht innerhalb des Containments, sondern in einem separaten Gebäude neben dem Reaktorgebäude. Dieses Gebäude hat ein dünnes Metaldach und relativ dünne Wände (0,3 m) im oberen Bereich (ASN 2011). Die Wanddicke im Bereich des Beckens beträgt ca. 0,8 bis 1 m. Aufgrund der dünnen Wände ist die Wahrscheinlichkeit einer schweren Beschädigung des Gebäudes für abgebrannte Brennelemente durch externe Einwirkungen relativ hoch. Die Gebäude sind gut sichtbar und daher relativ leichte Ziele für einen Angriff aus der Luft.

In den Lagerbecken werden die endgültig aus dem Reaktor entladenen abgebrannten Brennelemente vorübergehend gelagert, bis ihre thermische Leistung so weit abgeklungen ist, dass sie in die Lagerbecken von Orano Cycle in La Hague überführt werden können.⁸¹ Die abgebrannten Brennelemente werden im Lagerbecken für mindestens 2 – 3 Jahre aufbewahrt.

In Frankreich, wie auch in den meisten anderen Ländern, verlangten die Atomaufsichtsbehörden früher nicht, dass die Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente, wie der Reaktorkern, in einer druckfesten Sicherheitshülle untergebracht werden müssen. Diese Sicherheitsphilosophie wurde jedoch durch die geänderte Einstellung gegenüber dem Risiko von Terrorakten nach den Anschlägen

⁸⁰ Ausnahme: Reaktor Flamanville 3

⁸¹ Masse der in Frankreich gelagerten abgebrannten Brennelemente beträgt an den EDF-Atomwerksstandorte 4.600 Tonnen Schwermetall (tHM). (REPUBLIQUE FRANCAISE 2024)

vom 11. September 2001 in Frage gestellt. Die Lagerbecken vieler US-Reaktoren befinden sich ebenfalls außerhalb der Containments.

Ein bereits im April 2005 veröffentlichter Bericht von der National Academy of Sciences (NAS) kam zu dem Schluss, dass erfolgreiche Terroranschläge auf Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente zwar schwierig, aber möglich sind. Terroristen könnten die Betonwände eines Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente durchbrechen und das Kühlwasser ablassen, und wenn ein Angriff zu einem Brand der Zirkoniumhüllen führt, könnte dies zur Freisetzung großer Mengen radioaktiver Stoffe führen (NSA 2006).

Die Gefahr einer größeren Beschädigung des Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente (nach einem Erdbeben) wurde auch während des Unfalls von Fukushima im Jahr 2011 deutlich.

Um die (radiologischen) Folgen eines potenziellen Angriffs zu ermitteln, ist es wichtig, zwei verschiedene Szenarien zu unterscheiden:

- a) **Verlust der Kühlung:** Das Becken bleibt intakt, aber die Kühlsysteme des Beckens fallen aus und das Wasser verdampft allmählich. In diesem Fall dauert es Tage oder Wochen (abhängig von der Menge und dem Alter der abgebrannten Brennelemente im Becken) bis die Brennelemente freigelegt würden und zu schmelzen beginnen. Während dieses Zeitraums könnte durch Maßnahmen eine ausreichende Kühlung der Brennelemente wiederhergestellt werden. Falls zum Zeitpunkt des Angriffs alle Brennelemente des Reaktorkerns in das Becken entladen worden sind, müssten jedoch innerhalb weniger Stunden Maßnahmen durchgeführt werden.
- b) **Verlust des Kühlmittels:** Ein externes Ereignis, das zu schweren Schäden am Gebäude führt, könnte einen Verlust des Kühlwassers zur Folge haben. Wenn das Wasser abfließt und eine ausreichende Wiederauffüllung nicht möglich ist, kommt es innerhalb weniger Stunden zu hohen radioaktiven Freisetzungen. Brennstoff, der erst kurz zuvor aus dem Reaktor entnommen wurde, würde relativ viel Wärme erzeugen und kann innerhalb weniger Stunden eine Temperatur von 900 °C erreichen. Bei dieser Temperatur entzünden sich die Brennstoffhüllen aus Zircaloy an der Luft. Innerhalb des Kühlbeckens könnte sich der Brand auf ältere Brennelemente ausbreiten, die sich sonst nicht so schnell erhitzen würden. Letztendlich könnte das gesamte Inventar des Lagerbeckens schmelzen. Das Feuer ist sehr heiß und kann nicht mit Wasser gelöscht werden. Schwere Schäden an den Lagerbecken würden zu einer erheblichen Freisetzung radioaktiver Stoffe führen. In dieser Situation müsste die Bevölkerung innerhalb kürzester Zeit evakuiert werden. Die gefährlichste Situation tritt während der Brennelementewechsel ein, wenn die Brennelemente aus dem Reaktorkern in das Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente entladen sind.

4.2.1 Nachrüstungen für die Lagerbecken

Der EU-Stresstest (2011/12) wies auf mehrere erhebliche Sicherheitsdefizite für die Brennelementelagerbecken der französischen Reaktoren hin. Die Schlussfolgerungen der Analysen haben die ASNR dazu veranlasst, mehrere Anordnungen zu erlassen (ASN 2016):

- Installation robuster Messgeräte im Lagerbecken (Temperatur und Wasserstand) und für die Atmosphäre im Lagergebäude (ECS-20);
- Neu konstruierte Siphon-Vakuumbrecher an der Förderleitung des Kühlsystems, um eine vollständige und schnelle Entleerung des Beckens durch Siphonwirkung zu verhindern. Darüber hinaus wurde eine Automatisierung der Isolierung der Kühlsystem-Ansaugleitung implementiert. (ECS-22)
- Untersuchungen möglicher Maßnahmen für den Fall eines vollständigen Ausfalls der Stromversorgung und einer unbeabsichtigten Entleerung des Lagerbeckens (ECS-23);

- EDF hat eine Studie über die zeitliche Entwicklung des Verhaltens des Brennstoffs und des Wassers im Lagerbecken bei Entleerung und Kühlungsverlust durchgeführt. Die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Risikominderung bestehen darin, den Wasserbestand in den Becken durch Wasserzugabe wiederherzustellen. (ECS-24)

Die folgende Darstellung stellt die Nachrüstungen beispielhaft für die 900 MWe Reaktoren dar. Bei der Auslegung der 900 MWe-Reaktoren wurden Unfälle mit Verlust der Kühlung oder des Wassers im SFP nicht untersucht. EDF hatte sich für die 4. periodische Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) das Ziel gesetzt, sicherzustellen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Brennelemente freigelegt werden, a) im Falle einer unbeabsichtigten Entleerung des Lagerbeckens und b) bei einem Kühlungsverlust äußerst gering bleibt. (EDF 2018) Eine schnelle Entleerung des SFP aufgrund von Schäden in der Beckenstruktur wird nicht berücksichtigt.

EDF hat im Zuge der generischen Phase der 4. PSÜ die Sicherheit der SFP geprüft und dabei einige Modifikationen in Ergänzung zu den Änderungen nach dem Stresstests identifiziert. ASNR kritisierte, dass die von EDF genannte Zielsetzung, dass es äußerst unwahrscheinlich sein muss, dass Brennelemente im Lagerbecken freigelegt werden, nicht vollständig der geforderten Zielsetzung entspricht. Die Nuklearaufsichtsbehörde verwies darauf, dass die Studien zur Sicherheitsüberprüfung der Becken im Hinblick auf die auf neue Reaktoren anwendbaren Sicherheitsziele durchgeführt werden müssen und der „praktische Ausschluss“ des Risikos einer Brennstoffschmelze im Lagerbecken geprüft werden muss. ASNR fordert umfangreiche Nachreichungen [PISC A-C], schränkt aber hinsichtlich der erforderlichen Nachrüstungen ein, dass diese „verhältnismäßig“ sein müssen. (UMWELTBUNDESAMT 2021)

Nach Auffassung der ASNR sollte zudem der angestrebte **sichere Zustand** einem Zustand entsprechen, in dem die Rückhaltung radioaktiver Stoffe dauerhaft gewährleistet ist. Der von EDF definierte sichere Zustand könne nicht als ein solcher Zustand angesehen werden. Im Fall des Siedens plante EDF zur Verringerung des Drucks ein Ventil im Brennelementgebäude zu öffnen. Dies bedeutet eine geringe, aber dauerhafte Emission radioaktiver Stoffe in die Umwelt. Daher hat EDF gemäß der Vorschrift [PISC-C] (ASN 2021) überprüft, ob im Falle einer äußeren Einwirkung, eines Zwischenfalls oder eines Unfalls ein sicherer Zustand ohne Sieden im Lagerbecken erreicht und aufrechterhalten werden kann.

In Anwendung der Vorschrift [PISC-B-II], hat EDF die Studien zu Situationen des Kühlverlusts oder der Entleerung des Reaktorgebäudebeckens durchgeführt, wenn dies mit dem Lagerbecken über die Transferleitung miteinander verbunden ist. Diese Untersuchungen kamen zu dem Schluss, dass die nach Phase B der 4. PSÜ umgesetzten Gegenmaßnahmen ausreichen, um den sicheren Zustand zu gewährleisten. (Anmerkung: Phase B wird für einige Reaktoren erst in den 2030er Jahren umgesetzt sein). Als Reaktion auf die Anordnung [PISC-B-I] werden die erforderlichen Änderungen (Verdopplung der automatischen Absperrung der Ansaugleitung des Lagerbeckens durch die PTR-Ventile (PNPE1344) und die Nachspeisung von Wasser des „Hardened Safety Core“ in das Lagerbecken (PNPP1714 und PNPE1258) durchgeführt. (UMWELTBUNDESAMT 2025)

Insgesamt sind die folgenden wesentlichen Nachrüstungen geplant:

- Installation zusätzlicher Komponenten zur Bekämpfung des Risikos einer unbeabsichtigten Entleerung des Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente: motorbetriebene Ventile auf der Saugseite und Rückschlagventile auf der Druckseite des Kühlsystems des Lagerbeckens; die automatische Abschaltung der Pumpen des SFP und die automatische Isolierung der Absaugleitung, sowie die Positionierung eines Rückschlagventils im SFP-Kühlkreislauf,
- die Einrichtung eines neuen Einspeisekreislaufs (SEG), der zum „Hardened Safety Core“ gehört und aus flexiblen Einrichtungen und Verbindungen besteht und durch die neue Wasserquelle versorgt wird (SEU-System); (siehe Anordnung [PISC-A])

- Installation eines zusätzlichen Kühlsystems („PTR-bis“), welches aus den bereits vorhandenen festen Kreisläufen und mobilen Systemen besteht und durch die Force d’Action Rapide Nucléaire (FARN) eingesetzt wird und die Wiederaufnahme der Kühlung im geschlossenen Kreislauf ermöglichen soll.
- Einbau eines Schutzes vor der Ausbreitung von Bränden von einer Kühlpumpe auf eine andere.

Darüber hinaus hat EDF nach Abschluss der Konformitätsprüfungen der Systeme im ergänzenden Bereich Szenarien für die Entleerung des Brennstoffbeckens auf der Reaktorseite eingeführt. Dafür erfolgt eine Verstärkung des Ventils des Transferrohrs (PNRL1895).

Laut EDF haben die Untersuchungen zu unbeabsichtigten Entleerungen des Brennelementbeckens gezeigt, dass die Brennelemente im Lagerbecken für alle im Rahmen der Sicherheitsnachweisführung ausgewählten Ereignisse aufgrund der zusätzlichen Maßnahmen nicht freigelegt werden.

Probabilistische Studien zeigen, dass das Risiko einer Freilegung der Brennelemente bei einer unbeabsichtigten (langsamen) Entleerung und einem Kühlungsverlust des Brennelementbeckens bezogen auf interne Ereignisse aufgrund des neuen „Hardened Safety Core“ und der Intervention durch die FARN äußerst gering ist (etwa 10^{-8} pro Jahr und Reaktor).

Für die Kühlsysteme der SFP ist keine physische Trennung ihrer beiden redundanten Sicherheitsstränge vorhanden, daher sind sie besonders anfällig für interne Einwirkungen (z. B. Brand). Um im Brandfall den Ausfall beider Kühlkreisläufe zu vermeiden, hat EDF die Installation einer Flammenschutzvorrichtung zur physischen Trennung der PTR Kühlkreisläufe (PNPP1949) vorgesehen, um das Risiko einer Ausbreitung des Brandes von einer PTR-Pumpe auf die andere, aber auch das Risiko einer Beschädigung der Versorgungskabel beider Kreisläufe auszuschließen.

Studien von EDF zeigten, dass eine Explosion in einigen kerntechnischen Nebengebäuden zum Ausfall der Kühlung des SFP durch das PTR-System und der Notkühlung durch das JPI-System führen könnte. Bei derartigen Explosionsszenarien wird die Notkühlung des Brennelementbeckens durch die Notkühlwasserquelle des Hardened Safety Core genutzt, um ein Freilegen der im Becken befindlichen Brennelemente zu vermeiden. (UMWELTBUNDESAMT 2025)

4.2.2 Kühlung des Brennelementlagerbeckens

Im Normalbetrieb wird die Kühlung des Wassers im Lagerbecken durch das Aufbereitungs- und Kühlsystem (PTR-System) gewährleistet. Das PTR-System besteht aus zwei redundanten Kreisläufen (Pumpe, Wärmetauscher), die die Temperatur des Beckens ständig unter 50 °C halten. Bei einem Unfall, der zum Ausfall des PTR-Systems führt, wird die Restwärme der im Becken befindlichen Brennelemente durch Verdampfen des Beckenwassers abgeführt. Die Brennelemente werden durch eine manuelle Zusatzkühlung des Beckens unter Wasser gehalten, die durch das Brandschutzsystem des Atomkraftwerks (JPI) gewährleistet wird.

Bei extremen natürlichen externen Einwirkungen, die einen vollständigen Ausfall der Kühlung verursachen, ermöglicht das neue PTR-bis-System die Kühlung mit Wasser- und Stromressourcen, die von den anderen Ressourcen des Blocks unabhängig sind. Dieses PTR-bis-System umfasst mobile Geräte, die vor Ort transportiert und von der FARN in Betrieb genommen werden. Diese Geräte sind über feste Rohrleitungen, die an der Vorderseite des Brennelementbeckens münden, mit dem Brennelementbecken verbunden. Die gesamten mobilen Geräte und die damit verbundene Logistik sind so konzipiert, dass sie eine schnelle Inbetriebnahme des Systems ermöglichen. Die FARN setzt das PTR-bis-System innerhalb einer Frist von 24 Stunden nach dessen Auslösung ein. Allerdings ist das PTR-bis System nicht vollständig von dem bestehenden Kühlsystem getrennt.

Das PTR-bis-System kann auch für die langfristige Kühlung (bis ca. 15 Tage) eingesetzt werden, wenn die Zugänglichkeit des Standorts aufgrund extremer Bedingungen als schwierig anzunehmen ist.

LE SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT PTRbis

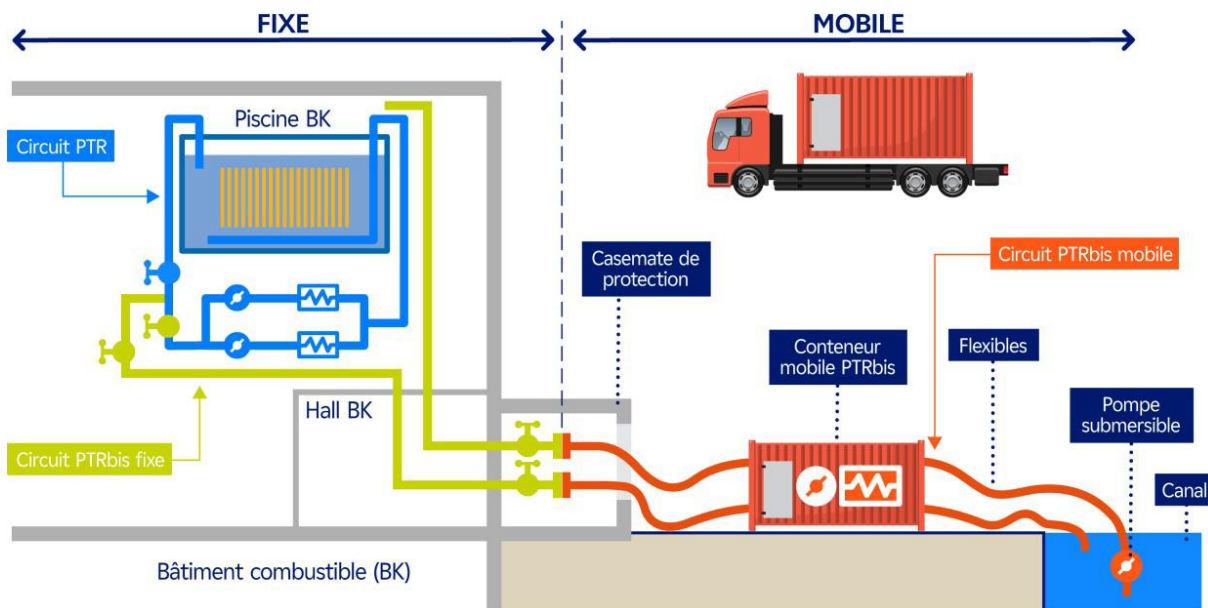


Abbildung 1: Kühlsysteme der Brennelement-Lagerbecken (EDF 2025a)

Der Einsatz des PTR-bis-Systems und der Wasserzufuhr von einer Wasserquelle des „Hardened Safety Core“ zum Brennelementbecken (PNPP1714) sowie deren Überwachung im Betrieb entsprechen der Vorschrift [PISC-A-I], die von der ASNR aufgrund der Schlussfolgerungen der generischen Phase der 4. PSÜ 900 erlassen wurde.

Auch die Lagerbecken der 1300-MWe-Reaktoren haben zwei redundante Kühlkreisläufe. Diese sind jedoch auf dieselbe Wasserversorgung angewiesen und nicht vollständig voneinander getrennt. Die Stromversorgung kann in Unfallsituationen durch Notstromdieselmotoren sichergestellt werden. Die Instrumentierung zur Überwachung des Zustands der Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente wurde verstärkt und ist Teil des „Hardened Safety Core“ (ASN 2020). Für den Fall eines Ausfalls der beiden Kühlstränge und des damit verbundenen Ausfalls der Kühlung der abgebrannten Brennelemente soll ebenfalls eine dritte Kühlkette von der FARN mit mobilen Geräten (PTR-bis-System) bereitgestellt werden. Für diesen Fall wurden die erforderlichen Rohrleitungen dauerhaft an der Fassade des Brennelementgebäudes installiert. Allerdings ist auch dieses System nicht vollständig von den bestehenden Kühlanlagen getrennt (UMWELTBUNDESAMT 2024).

4.2.3 Struktur des Lagerbeckens

Zahlreiche Fragen während der Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen der 4. PSÜ der 900 MWe Reaktoren betrafen die Kühlung der im Becken gelagerten Brennelemente. Immer wieder wurde die Sorge geäußert, dass das Becken vor externen Einwirkungen geschützt werden müsse. EDF bestätigt, dass keine zusätzlichen Maßnahmen für das Becken wie eine „Bunkerisierung“ getroffen werden. Denn laut EDF ist in allen Störfall- und Unfallsituationen die Kühlung der Brennelemente dank der Robustheit der das Becken umgebenden Struktur und der Maßnahmen zur Gewährleistung einer permanenten Kühlung gewährleistet. Durch Nutzung der verschiedenen Wasserreserven des Standorts kann die Wasserversorgung durch die Betriebsmannschaft mit mobilen Pumpen oder mit Mitteln der Force d'Action Rapide du Nucléaire (FARN) sichergestellt werden. (EDF 2025)

Bereits als Reaktion auf den Unfall von Fukushima empfahl die ENSREG (2012) die Verbesserung der Robustheit der Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente (SFP). Dazu gehören unter anderem Maßnahmen zur Verbesserung der strukturellen Integrität der SFP. Eine Verstärkung der Struktur der Lagerbeckengebäude ist jedoch von EDF bisher nicht vorgesehen und von der ASNR nicht gefordert.

4.2.4 Fazit

Nach Umsetzung der umfangreichen Nachrüstungen für die Kühlung der gelagerten Brennelemente kann das Risiko einer Brennelementfreilegung in vielen Unfallsituationen reduziert werden. Die Nachrüstungen zielen auf Nachspeisung von Kühlmittel bei Ausfall des Kühlsystems und bei einer unfallbedingten Entleerung durch eine Fehlfunktion der vorhandenen Kühlsysteme. Mit den vorgesehenen Maßnahmen ist es jedoch nicht möglich, das Kühlwasser im Falle eines Verlusts des Kühlwassers aufgrund einer Leckage in der Gebäudestruktur wieder aufzufüllen.

Die gefährlichste Schwachstelle, die Anfälligkeit der Lagerbecken aufgrund ihrer dünnen Wände, wird nach bisheriger Planung noch Jahrzehnte bestehen bleiben. Im Programm zur Lebensdauerverlängerung sind keine Verbesserungen vorgesehen. Ein externes Ereignis, das zu einem Leck im Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente führt, würde zum Verlust des Kühlwassers führen. Da keine ausreichenden Maßnahmen zum Nachfüllen des Beckenwassers vorhanden sind, käme es zu einem unvermeidbaren schweren Unfall mit erheblicher Freisetzung radioaktiver Stoffe. Somit werden die 56 französischen Reaktoren nicht die Sicherheitsstandards des EPR erreichen. Für den EPR bietet die äußere Hülle (doppelte Betonwand), die sowohl das Reaktorgebäude als auch den SFP umschließt, Schutz gegen extreme Einwirkungen aus der Luft.

5 Angriffsszenarien und radiologische Folgen

Es ist hier nicht beabsichtigt, die „wirkungsvollste“ Vorgehensweise zu beschreiben, sondern auf die grundsätzliche Möglichkeit und die Gefahr eines Anschlags mit Drohnen auf französische Atomkraftwerke hinzuweisen. Dabei soll zudem keine Anleitung für einen wirkungsvollen Anschlag gegeben werden.

Es kann hier auch nicht bewertet werden, ob es für eine terroristische Gruppe einfacher zu realisieren wäre, sich militärische Drohnen zu beschaffen, die bereits mit Explosionsstoffen oder anderen Gefechtsköpfen ausgerüstet sind oder Drohnen, die für die zivile Nutzung gedacht waren, für ein Angriffsszenario umzurüsten. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Trennung zwischen Drohnen für die militärische und die zivile Anwendung fließend ist, so setzten zum Beispiel die israelischen Kampftruppen (IDF) mit Sprengstoff beladene zivile Drohnen für Kampfhandlungen im Libanon und im Gazastreifen ein.⁸² Es muss insgesamt davon ausgegangen werden, dass es potenziellen Attentätern möglich wäre, an (militärische) Drohnen zu gelangen. Drohnen sind relativ leicht zu beschaffen, ggf. umzurüsten und können sehr flexibel eingesetzt werden.

Eine direkte Gefahr für die Sicherheit eines Atomkraftwerks ist von einer einzelnen kleinen Drohne – sofern sie mit einer geringen Menge Sprengstoff an einer beliebigen Stelle des Atomkraftwerks zum Absturz gebracht wird – nicht zu erwarten. Anders wäre es bei einer großen Drohne. Da diese aber schwerer zu beschaffen wäre, und zudem Infrastruktur benötigt wird, wird es hier eher als unwahrscheinlich bewertet. Das Mittel der Wahl erscheint eher der Absturz mehrerer Drohnen.

„Wirkungsvolle“ Drohnenangriffe sind vielfältig, am einfachsten realisierbar erscheint ein Angriff mit mehreren Drohnen (Drohnenschwarm), die mit Sprengstoff und/oder Granaten und Brandbeschleuniger beladen sind oder mit verschiedenen Gefechtsköpfen, insbesondere mit thermobarischen Gefechtsköpfen, bestückt sind.

⁸² <https://defence-network.com/dji-co-handelsdrohnen-als-einweg-waffen/>

Die Attentäter könnten nacheinander oder simultan mit mehreren Drohnen das Atomkraftwerk angreifen. Kleinere Drohnen können direkt oder von einem LKW aus gestartet und dadurch mehr oder weniger überall eingesetzt werden.

Bei einem Terror-Angriff mit Drohnen ist damit zu rechnen, dass er innerhalb weniger Minuten „erfolgreich“ abgeschlossen ist. Es muss bezweifelt werden, dass das Sicherungspersonal eines Atomkraftwerks oder staatliche Sicherheitskräfte in der Lage sind, einen Anschlag zu verhindern. Die Drohnenabwehrsysteme sind ebenfalls bisher nicht in der Lage einen gezielten Angriff sicher abzuwehren. Zusätzlich können die Drohnen detailliertes Bildmaterial des Geländes, aber auch der Ressourcen und Strategien der Sicherungskräfte liefern.

5.1 Angriff auf das Reaktorgebäude

Obwohl das Reaktorgebäude durch eine Betonwand geschützt ist, ist diese nicht dafür ausgelegt, modernen Drohnen standzuhalten. Ein Schutz vor Sprengstoffen soll dadurch erzielt werden, dass Sprengstoffe nicht in der Nähe des AKWs aufbewahrt werden dürfen. Allerdings würde eine erhebliche Menge an Sprengstoff benötigt, um die Wand von 90 cm Stärke zu durchdringen. Eine Detonation mit einer größeren Menge an Sprengstoff kann Schäden am äußeren Containment erzeugen. Schwere Betontrümmer, Druckwelle und Erschütterung können bei der Explosion schwere Zerstörungen im Inneren des Containments bewirken und die Kühlung des Reaktors unterbrechen. Diese könnte ein Atomkraftwerk in eine gefährliche Situation bringen. Eine derartige Situation kann von den Sicherheitssystemen des Atomkraftwerks bzw. den Notfallmaßnahmen vermutlich nicht beherrscht werden. Die in Kapitel 3 dargestellten Schwachstellen in der Störfallbeherrschung macht eine Verhinderung der einer Kernschmelze sehr unwahrscheinlich. Ein Kernschmelzunfall mit erheblichen radioaktiven Freisetzungen wird mit einer hohen Wahrscheinlichkeit resultieren.

Hohlladungsgeschosse könnten problemlos die Stahlbetonwand des äußeren Containments durchdringen, da die Wandstärke nur 90 Zentimeter beträgt. Da diese Schäden aber lokal relativ begrenzt blieben, sollte dieses Ereignis von den Sicherheitssystemen des Atomkraftwerks beherrscht werden können. Hohlladungsgeschosse von panzerbrechenden Waffensystemen haben eine Durchschlagsleistung von rund einen Meter bei Panzerstahl oder etwa drei Meter bei Stahlbeton.⁸³

Anders bei einem thermobarischen Gefechtskopf: Die Wirkung thermobarischer Waffen oder Aero-solbomben (FAE = Fuel-Air Explosive) beruht auf der Zündung einer in der Luft verteilten brennbaren Substanz. Ein thermobarischer Gefechtskopf besteht aus einem Behälter, der eine brennbare Substanz enthält. Eine erste Sprengladung verteilt den Brennstoff fein in der Luft, ein Brennstoff-Luft-Gemisch, ein Aerosol, entsteht. Wenige Zehntelsekunden später zündet die zweite Sprengladung die Aerosolwolke. Die Verpuffung erfolgt fast zeitgleich in einer Kugel mit einem Durchmesser von 10 bis 40 Metern. Die Hauptwirkung wird durch die bei der Verpuffung entstehende Druckwelle erzeugt. Der Überdruck der Detonation kann 30 bar erreichen. Zudem haben Aerosolbomben eine extreme Hitzewirkung. Die Temperatur kann 2.500 bis 3.000 Grad Celsius betragen. Weiterer Schaden wird durch die Vakuumwirkung erzeugt: Die Explosion entzieht der Luft Sauerstoff, dadurch entsteht ein starker Unterdruck, der bewegliche Gegenstände anzieht und so zu weiteren Zerstörungen führt.

Insofern wäre der Schaden im Reaktor groß, wenn nach Sprengung einer Öffnung thermobarische Gefechtsköpfe genutzt würden. Die Zerstörungskraft der thermobarischen Gefechtsköpfe würde sich weit in den Sicherheitsbehälter hinein entfalten können. Die Druckwelle würde viele sicherheitsrelevante Komponenten zerstören. Aufgrund der Hitzewirkung verlören Sensoren und Steuerleitungen ihre Funktion. Thermobarische Explosionen wirken großflächig, sodass mehrere

⁸³ Ein Hohlladungsgefechtskopf besteht aus einem hohlen und mit Sprengstoff ummantelten Metallkegel. Beim Aufprall auf das Ziel wird der Sprengstoff gezündet. Der sich bildende Metallstrahl (Hohlladungsstachel) trifft mit sehr hoher Geschwindigkeit (mehrere Tausend Meter pro Sekunde) auf das Ziel.

Redundanzen beeinträchtigt würden. Aufgrund der starken Zerstörung kann eine ausreichende Kühlung nicht wiederhergestellt werden. Die erforderliche Kühlung des Reaktorkerns würde mit großer Wahrscheinlichkeit komplett ausfallen und ließe sich zudem nicht kurzfristig wieder herstellen. Ein Kernschmelzunfall wäre dann nahezu unvermeidbar. Da der Sicherheitsbehälter (Containment) ein Leck aufweisen würde, würde der gefährlichste Unfall resultieren: Eine Kernschmelze bei offenem Containment.

Drohnen, die mit kleinen Sprengstoffen oder brennbaren Ladungen ausgestattet sind, könnten zudem weitere wichtige Geräte auf dem Anlagengelände wie Kühlsysteme, Transformatoren, etc. zerstören. Sollte es gleichzeitig an mehreren Stellen auf dem Anlagengelände brennen, könnte die Betriebsmannschaft überfordert sein und möglicherweise radioaktive Freisetzungen nicht vollständig verhindern können.

Nach einem Drohnenangriff müsste die Eingreiftruppe FARN, die erst innerhalb von 24 Stunden einsatzbereit sein muss, mit mobilen Geräten die Strom- und Wasserressourcen des HSC anschließen, um eine Kernschmelze zu verhindern oder zumindest die Freisetzungen zu mindern. Dies scheint nach einer komplexen Unfallsituationen sehr schwierig bis unmöglich. Auch könnten die entsprechenden Systeme und Anschlüsse am Reaktor beschädigt sein.

5.2 Angriff auf das Gebäude mit Brennelementlagerbecken

Ein terroristischer Angriff, der zu schweren Schäden am Gebäude führt, kann ein Ausfließen des Kühlmittels (Wasser) verursachen. Es stellt sich somit die Frage, ob Drohnen in der Lage wären, im Gebäude derartige Schäden zu verursachen, dass ein Leck in den Lagerbecken entsteht, dass nicht überspeist werden könnte. Da der obere Teil nur eine Wandstärke von 30 cm hat, kann dort eine großflächige Zerstörung der äußeren Wand erfolgen. Weitere Sprengsätze oder andere Waffen könnten dann im Gebäude selbst durch Drohnen zur Explosion gebracht werden.

Durch die Explosion kann Wasser aus den Becken herausgeschleudert werden. Falls Risse im Gebäude entstehen, würde das Wasser abfließen. Brennstoff, der erst kurz zuvor aus dem Reaktor entnommen wurde, würde relativ schnell (innerhalb weniger Stunden) eine Temperatur von 900 °C erreichen. Bei dieser Temperatur entzünden sich die Brennstoffhüllen aus Zircaloy an der Luft. Die Entzündung von Zircaloy an Luft wird befördert, wenn bei einem Terrorangriff auch die Brennelemente im Becken beschädigt werden, etwa durch Explosionen im Gebäude, durch herunterfallende Trümmer oder Splitter. Kleine Zircaloy-Späne können sich bereits bei Temperaturen um 200° C entzünden. Der Brand ist sehr heiß und kann nicht mit Wasser gelöscht werden.

Bei einem Kühlmittelverlust im Lagerbecken sind Interventionen praktisch nahezu unmöglich. Sobald das Wasser aus dem Becken ausgeflossen ist, fällt nicht nur die Kühl-, sondern auch die Abschirmwirkung des Wassers weg. Der Strahlenpegel in der Umgebung des Beckens, aber auch in anderen Bereichen des Gebäudes, steigt drastisch an. Am Rande des Beckens werden Dosisleistungen von ca. 100 Sievert pro Stunde (Sv/h) erreicht. (ALVAREZ et al. 2003) In der Nähe des Beckens kann bereits eine Verweildauer von Minuten tödlich sein.

Aufgrund der Komplexität der Situation nach einem Drohnenangriff wäre die Betriebsmannschaft vorübergehend nicht in der Lage, Maßnahmen zu ergreifen. Es muss bezweifelt werden, dass die Betriebsmannschaft in der Lage ist, ein ausreichendes Wiederauffüllung des Beckens zu erreichen und ein Schmelzen des Brennstoffs zu verhindern. Drohnen könnten zudem auch die Betriebsmannschaft und das Sicherungspersonal angreifen. Die Eingreiftruppe (FARN) zur Unterstützung der Betriebsmannschaft muss erst 24 Stunden nach Unfallbeginn einsatzbereit sein. Sobald die Freisetzung von abgebrannten Brennelementen begonnen hat, wären Maßnahmen sehr kompliziert und gefährlich. Insbesondere wenn die Brennelemente bereits brennen, wird eine Intervention unmöglich. Da das

Gebäude der Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente direkt an das Reaktorgebäude angrenzt, könnte auch der Reaktor von demselben Angriff betroffen sein.

Es ist insgesamt nicht auszuschließen, dass selbst, wenn nur die Kühlung beschädigt und die Lagerbecken selbst keinen Schaden genommen haben, eine ausreichende Notkühlung hergestellt werden kann, auch wenn die mobilen Mittel vorhanden sind. Das PTR-bis System, das bei extremen Einwirkungen, allerdings bei natürlichen extremen Einwirkungen, aber auch bei Brand und Explosionen eine ausreichende Kühlung gewährleisten soll, kann möglicherweise nicht angeschlossen werden. Denn es besteht aus mobilen Geräten, die außen an das Lagergebäude angeschlossen werden sollen, diese Anschlüsse könnten ebenfalls beschädigt sein. Zudem benutzt das PTR-bis System bestehende Komponenten im Gebäude, die durch den Angriff möglicherweise ebenfalls beschädigt wurden.

5.3 Potenzielle Freisetzen

Ein gezielter Angriff mit Drohnen verursacht mit hoher Wahrscheinlichkeit in den angegriffenen Reaktoren einen nicht mehr beherrschbaren Kühlmittelverlust und damit einen Kernschmelzunfall. Dabei handelt es sich um die gefährlichste und folgenschwerste Variante eines Kernschmelz-Unfalles – einer Kernschmelze mit offenem Containment. Die radioaktiven Freisetzungen erfolgen somit besonders früh (innerhalb weniger Stunden), da keine auch nur zeitweilige Rückhaltung durch die Sicherheitshülle gegeben ist.⁸⁴ Die Vorwarnzeit für eine Freisetzung beträgt dann nur wenige Stunden. Sollte die Evakuierung misslingen, erhalten je nach Wetterlage Hunderttausende Menschen gesundheitsschädliche, teils lebensbedrohende Strahlendosen. In der Nähe der Anlage ist mit einer akuten Strahlenkrankheit, in größerer Entfernung mit erheblichen Langzeitfolgen (vor allem Krebs und genetische Schäden nachfolgender Generationen) zu rechnen. Die Freisetzungsmengen der flüchtigen Radionuklide (z. B. Cäsium-137) liegen im Bereich von 50 bis 90 % des Kerninventars.

Freisetzung aus dem Lagerbecken

Die Lagerbecken der 900-MWe-Reaktoren (Typ CPY) haben eine Lagerkapazität für 382 abgebrannten Brennelementen (BE) bzw. für 311 oder 315 BE (Typ CP0). Unter Berücksichtigung der Kapazität, die für eine Kernentladung freigehalten werden muss (157 BE), können dort im Normalbetrieb maximal 225 BE bzw. 158/154 BE gelagert sein.

Die Lagerbecken der 1300 MW-Reaktoren sind für maximal 459 BE (Typ P4), bzw. sogar für insgesamt 630 BE (Typ P'4) ausgelegt. Ein Teil der Positionen (193) muss für eine Kernentladung freigehalten werden. Insofern ist im Normalbetrieb eine maximale Beladung von 266 bzw. 437 BE vorgesehen. Die Lagerbecken der 1450 MW-Reaktoren haben eine Kapazität von 612 BE, abzüglich 205 Positionen für die Entladung des Reaktorkerns, bleibt eine Lagerkapazität für 407 BE im Normalbetrieb.

Während der Lagerzeit der abgebrannten Brennelemente werden die kurzlebigeren Radionuklide abgebaut, insbesondere das hochflüchtige Jod-131. Der Bestand des relevanten Radionuklids Cäsium-137 bleibt jedoch hoch. Laut einer US-Studie könnten etwa 75 Prozent (10-90 Prozent) des Cäsium-137 bei einem Schmelzen bzw. Brand der Brennelemente freigesetzt werden. (HIPPEL 2016)

In allen Lagerbecken kann die gleiche Menge oder sogar mehr als das Doppelte an Brennelementen aufbewahrt werden, wie sich im Reaktorkern befindet. Die zu erwartenden Freisetzungen des relevanten Radionuklids Cäsium-137 infolge der hier diskutierten Terroranschläge ist daher insgesamt in der gleichen Größenordnung wie jene aus dem Reaktorkern. Sie können diese sogar um ein

⁸⁴ Außerdem sind sie besonders hoch. Bei einer längeren Verzögerungszeit schlägt sich nämlich ein Teil der Radionuklide, die aus dem geschmolzenen Brennstoff freigesetzt wurden, an kälteren Flächen im Gebäude nieder. Dieser, die Freisetzung nach außen reduzierende Faktor fällt bei offenem Containment weg.

Vielfaches übersteigen. Die Vorwarnzeit für eine radioaktive Freisetzung nach den hier betrachteten Drohnenangriffen bei Freisetzungen aus dem Lagerbecken beträgt ebenfalls nur wenige Stunden.

5.4 Radiologische Folgen

Eine Darstellung der möglichen langfristigen Konsequenzen ist anhand der Ergebnisse des Projekts FlexRisk möglich. In diesem Projekt wurde das Risiko durch schwere Unfälle in Atomkraftwerken in Europa untersucht.⁸⁵ Auf der Grundlage von Quelltermen wurde ein Ausbreitungsmodell verwendet, um die Kontaminationen von Cäsium-137 (Cs-137) und Iod-131 (I-131) und die Strahlendosen für etwa 2.800 verschiedene Wettersituationen zu berechnen. Im Rahmen dieses Projekts wurden auch für 88 reale Wetterszenarien eines repräsentativen Jahres (1995) die radiologischen Folgen ermittelt. Die Ergebnisse wurden in Karten visualisiert.

Für die französischen Reaktoren wird dabei jeweils eine Freisetzung von 30% des Kerninventars an Cs-137 unterstellt. Für Cattenom-1 verwendete flexRISK für die Berechnungen eine Freisetzung von 132,2 PBq Cs-137, und für Tricastin-1 von 107,87 PBq Cs-137. Solche Quellterme sind vergleichbar mit der Freisetzung aus Tschernobyl.⁸⁶ Die Freisetzungen der hier diskutierten Terrorangriffe könnten sogar noch höher sein.⁸⁷ Sie sind aber in der gleichen Größenordnung und zur Abschätzungen und Illustrierung potenziellen Folgen gut geeignet.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Ergebnisse präsentiert und kurz erläutert. Dazu werden die ermittelten Cs-137 Kontaminationen dargestellt, da sie einen Hinweis auf die langfristigen Kontaminationen geben.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die flexRISK Ergebnisse für die angenommene Freisetzung in Folge eines schweren Unfalls für Tricastin-1 und Cattenom-1, aber an sechs verschiedenen Tagen und somit in sechs verschiedenen Wettersituationen.

Zum Vergleich: die Kontaminationen mit Cs-137 nach dem Unfall in Tschernobyl lagen in Frankreich bei maximal 20 kBq/m² (olivgrüner Bereich, 2E+04 Bq/m²), in Deutschland bei maximal 100 kBq/m² (dunkelgelber Bereich, 1E+05 Bq/m²).

Nach Tschernobyl wurden in der ehemaligen Sowjetunion Gebiete mit einer Cs-137 Kontaminationen von 37 kBq /m² oder mehr als „kontaminiert“ definiert und einer kontinuierlichen Überwachung unterzogen⁸⁸; Menschen in Gebieten mit einer Cs-137 Kontamination über 185 kBq/m² hatten das Recht auf Umsiedelung, und Gebiete mit einer Cs-137 Kontamination über 1.480 kBq /m² wurden abgesiedelt. In den Abbildungen 2 und 3 entspricht eine Cs-137 Kontamination von 185 kBq/m² dem orangen und von 1.480 kBq/m² dem lila Bereich.

AKW Cattenom

Unter Wetterbedingungen, die denen am 11. März 1995 entsprechen werden große Gebiete Frankreichs stark betroffen (Cs-137 Kontaminationen von rund 10.000 kBq/m²). Unter Wetterbedingungen, die denen am 21. August 1995 oder 25. Juni 1995 entsprechen, wären Gebiete in Frankreich und Nordspanien stark kontaminiert (Cs-137 Kontaminationen von mehr als 1000 kBq/m²). Bei Wettersituation, die denen am 3. Mai 1995 entsprächen, würden auch Schweiz, Österreich und Deutschland kontaminiert. In anderen Wettersituationen wäre Frankreich kaum betroffen, aber andere

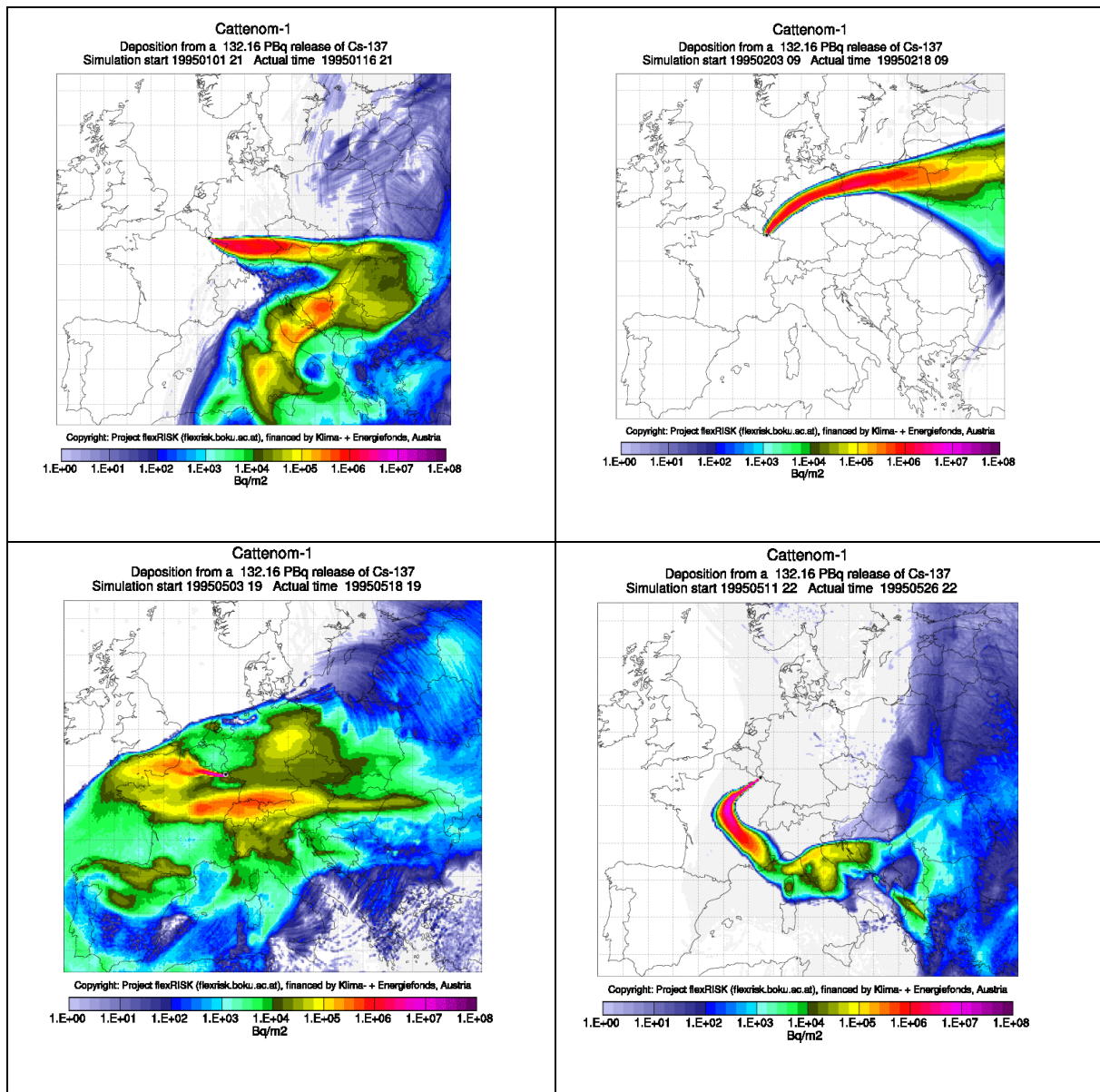
⁸⁵ <http://flexrisk.boku.ac.at/en/index.html>

⁸⁶ Freisetzung beim Unfall von Tschernobyl laut verschiedener Literaturquellen ca. 78-112 PBq Cs-137.

⁸⁷ Die Freisetzung kann aus den Lagerbecken, je nach Reaktor und Belegung, bis viermal und aus den Reaktoren zwei- bis dreimal so hoch sein.

⁸⁸ Laut IAEA gelten Gebiete mit Cs-137 Bodenkontaminationen von mehr als 40 kBq/m² als kontaminiert, da die Bevölkerung in diesen Gebieten eine effektive Dosis von mehr als 1 mSv im ersten Jahr zu erwarten hat.

Länder wie Deutschland und Kroatien (1. Januar 1995) oder Deutschland und Polen (3. Februar 2025).
(siehe Abbildung 2)



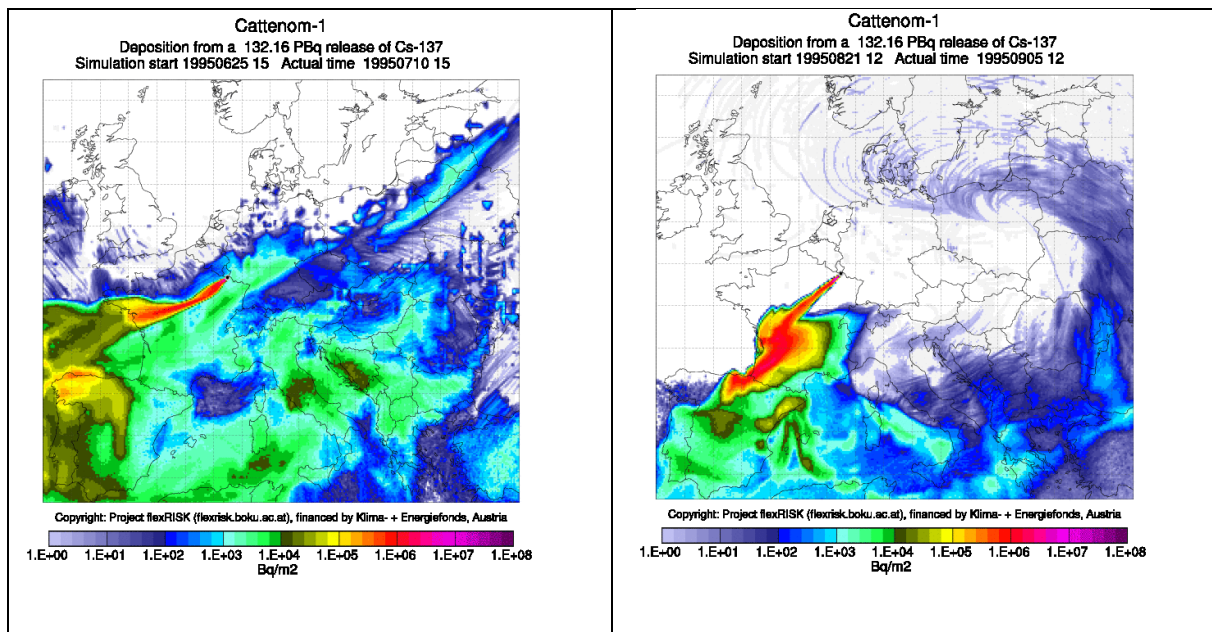
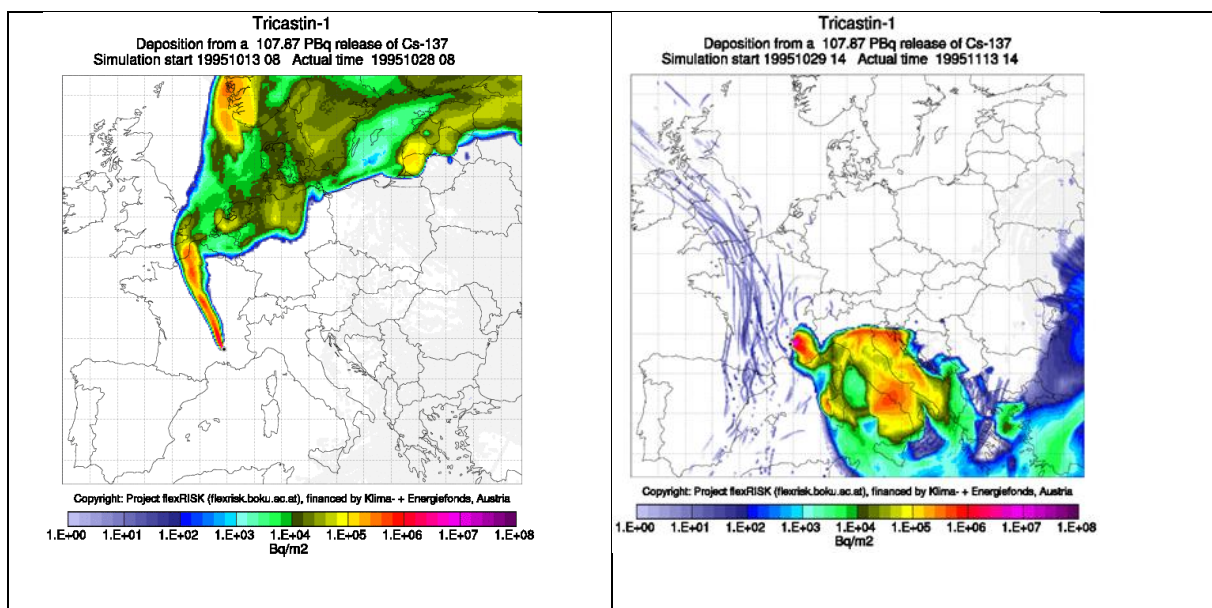


Abbildung 2: Kontamination durch einen schweren Unfall in Cattenom-1 in Bq Cs-137 pro m².

AKW Tricastin

Unter Wetterbedingungen, die denen am 16. Mai 1995 oder am 14. November 1995 entsprechen, wäre nach einer radioaktiven Freisetzung ein schmaler Streifen in Frankreich stark kontaminiert (Cs-137 Kontaminationen von rund 10.000 kBq/m²). Für Freisetzen bei anderen Wettersituationen wären neben Frankreich auch Italien (29. Januar 1995) oder Luxemburg und Deutschland (24. Mai 1995) kontaminiert. Unter Wetterbedingungen, die denen am 14. September 1995 entsprechen, können neben Frankreich auch Italien, Österreich, Slowenien, Kroatien und sogar Rumänien stark betroffen sein und unter Wetterbedingungen, die denen am 13. Januar 1995 entsprechen, könnten sogar Gebiete bis Norwegen stark betroffen sein (siehe Abbildung 3).



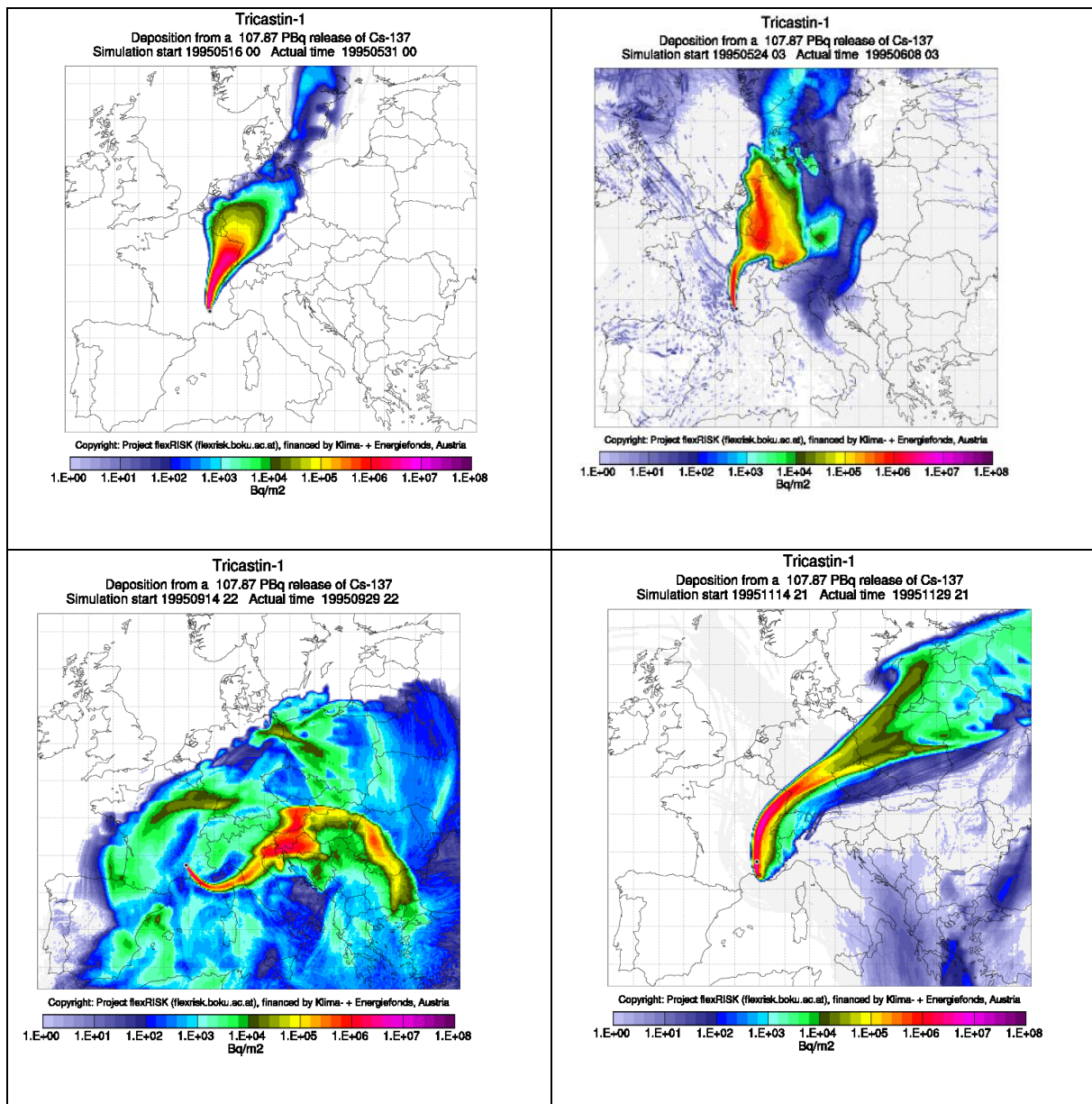


Abbildung 3: Kontamination durch einen schweren Unfall in Tricastin-1 in Bq Cs-137 pro m².

Wahrscheinlichkeiten für Kontaminationen

Je nach Wetterlage, werden die radioaktiven Stoffe über einen großen Bereich verteilt oder lagern sich auf einem schmalen Streifen ab. Die möglichen Kontaminationen hängen stark von den meteorologischen Bedingungen ab. Aufgrund der Wetterlage können weite Teile von Europa betroffen sein, wie an der Lage und Größe der orangen bzw. roten und lila Gebiete zu erkennen ist.

Wenn alle einzelnen Wettersituationen übereinandergelegt werden, wird die wetterbedingte Wahrscheinlichkeit erhalten, welche Gebiete Europas bei einem schweren Unfall kontaminiert werden könnten. (siehe Abbildung 4) Die Skala reicht von 1E-04 (Wahrscheinlichkeit von 0,01%) bis zu 1E+00 (Wahrscheinlichkeit von 100%) – letztere betrifft die Gebiete in unmittelbarer Nähe der AKWs.

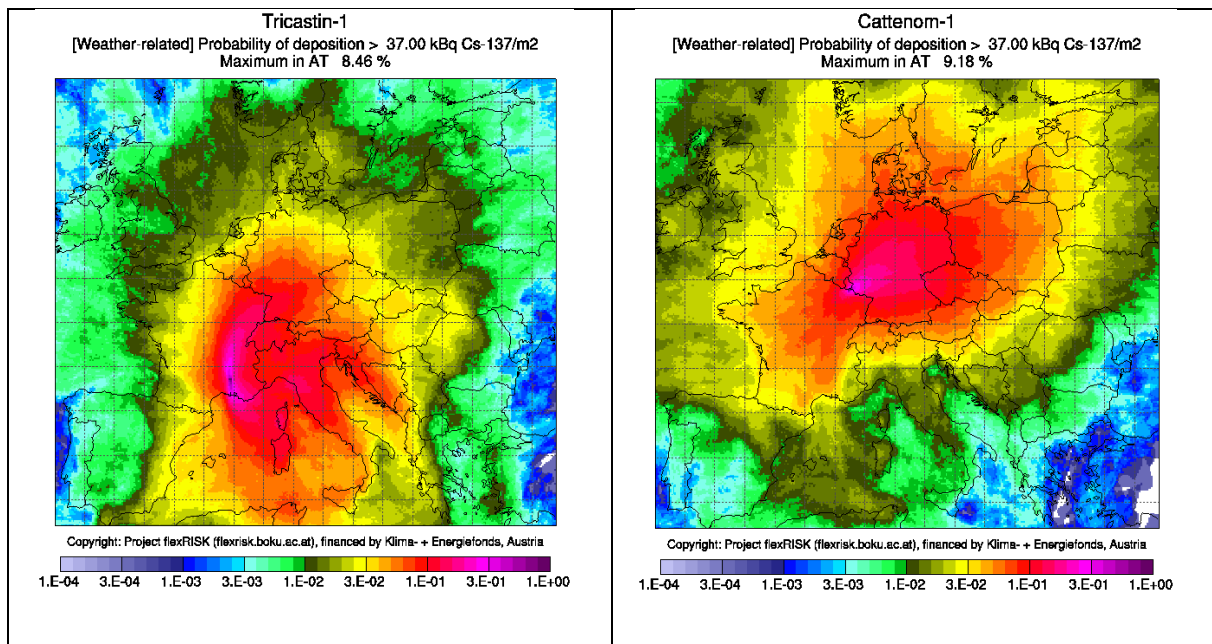


Abbildung 4: Wetterbedingte Wahrscheinlichkeit, durch einen schweren Unfall (Drohnenangriff) in Tricastin-1 und Cattenom-1 mit mehr als 37 kBq/m² Cs-137 kontaminiert zu werden.

Durch eine Freisetzung aus dem AKW Tricastin besteht insbesondere für die östliche Hälfte Frankreichs, für die gesamte Schweiz, weite Teile Italiens sowie Gebiete in Süddeutschland, Österreich, Kroatien und Slowenien eine hohe Wahrscheinlichkeit kontaminiert zu werden. In Folge einer Freisetzung aus dem AKW Cattenom besteht für den Nordosten Frankreichs, für Luxemburg, für fast ganz Deutschland sowie für Gebiete in Österreich, Tschechien und Polen eine hohe Wahrscheinlichkeit langfristig kontaminiert zu werden.

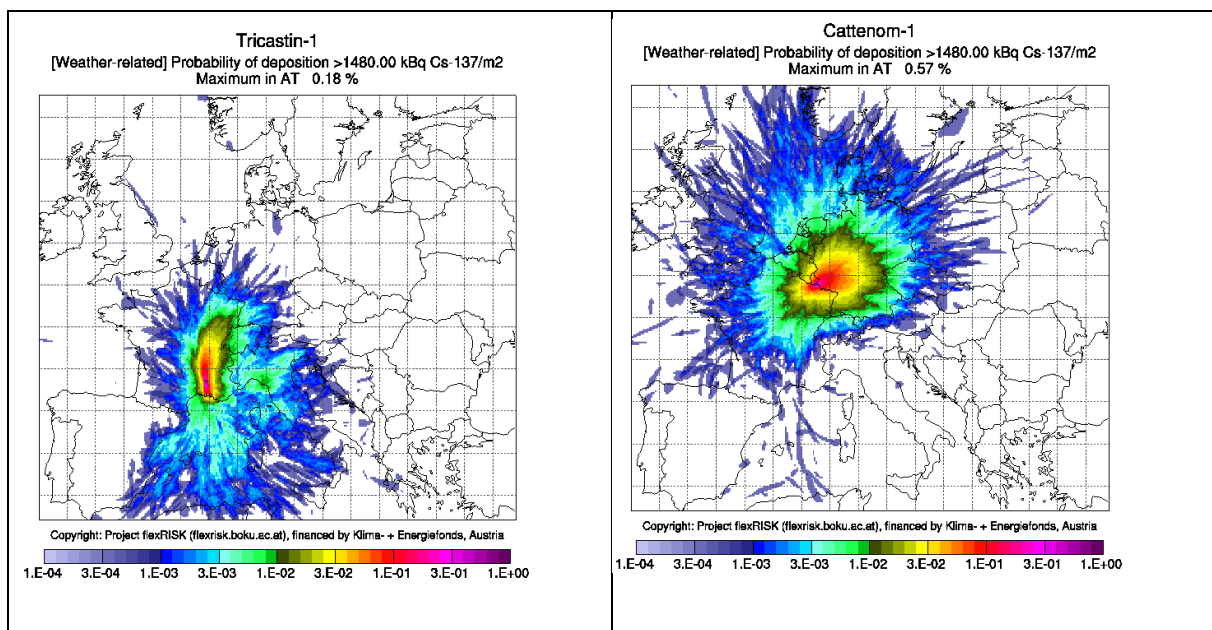


Abbildung 5: Wetterbedingte Wahrscheinlichkeit, durch einen schweren Unfall (Drohnenangriff) in Tricastin-1 oder Cattenom-1 mit mehr als 1.480 kBq/m² Cs-137 kontaminiert zu werden

In Abbildung 5 (Wahrscheinlichkeit für Cs-137 Kontamination mit 1.480 kBq/m²) ist zu erkennen, welche Gebiete eine hohe Wahrscheinlichkeit haben, nach einem derartigen Terrorangriff langfristig umgesiedelt werden zu müssen; dies sind für einen Drohnenangriff auf Tricastin große Gebiete in Frankreich, auf Cattenom, nicht nur Gebiete in Frankreich, sondern auch in den Nachbarländern Deutschland und Luxemburg.

6 Literatur

- ALVAREZ et al. (2003): Reducing the Hazards from Stored Power-Reactor Fuel in the United States, ALVAREZ, R., BEYEA, J., JANBERG, K., KANG, J., LYMAN, E., MACFARLANE, A., THOMPSON, G., VON HIPPEL, F.N. Science & Global Security, Vol. 11, No. 1 (2003).
- ASN (2011): Complementary Safety Assessment of the French Nuclear Power Plants (European Stress Tests). Report by the French Nuclear Safety Authority; December 2011.
- ASN (2016): Seventh National Report for the 2017 Review Meeting. Convention on Nuclear Safety. Report by the French Nuclear Safety Authority; 2016.
- ASN (2021): Décision n° 2021-DC-0706 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 23 février 2021 fixant à la société Électricité de France (EDF) les prescriptions applicables aux réacteurs des centrales nucléaires du Blayais (INB n° 86 et n° 110), du Bugey (INB n° 78 et n° 89), de Chinon (INB n° 107 et n° 132) [etc.] au vu des conclusions de la phase générique de leur quatrième réexamen périodique. Montrouge, le 23 février 2021.
- ASN (2022): National Report of France for the combined 8th and 9th Review meeting in 2023 Convention on Nuclear Safety (CNS); August 2022
- BIJU et al. (2025). Drone Technology Using Machine Learning and Artificial Intelligence. TechRxiv. Biju, A.M., Sulfath, P. M, Sheena, K M. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.174438711.17012283/v1>.
- BONDAR, K. (2025). Ukraine's Future Vision and Current Capabilities for Waging AI-Enabled Autonomous Warfare. Center for Strategic and Integration Studies. <https://www.csis.org/analysis/ukraines-future-vision-and-current-capabilities-waging-ai-enabled-autonomous-warfare> .
- CHRISTEN et al. (2018): Christen, M.; Michel Guillaume, Maximilian Jablonowski, Peter Lenhart und Kurt Moll Zivile Drohnen – Herausforderungen und Perspektiven vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2018, 99)
- CRIOLLO et al. (2024). Classification, military applications, and opportunities of unmanned aerial vehicles. Criollo, L., Mena-Arciniega, C. and Xing, S. Aviation, 28(2), pp.115–127. <https://doi.org/10.3846/aviation.2024.21672>.
- EDF (2018): 4th Periodic Safety Review of the 900 MWe Reactor Fleet, Summarised version of the Fulfilment Report.
- EDF (2025): Enquête publique sur le rapport du 4ème réexamen périodique, du réacteur n° 1 de Chinon B; Pièce 4 – Bilan des actions de concertation mises en œuvre pour la partie générique du 4e réexamen périodique des réacteurs de 900MWe. 2025
- EDF (2025a) – Enquête publique sur le rapport du 4ème réexamen périodique, du réacteur n° 1 de Chinon B, Pièce 1 - Note de présentation; EDF 2025.
- ENSREG (2012): Compilation of recommendations and suggestions. Peer review of stress tests performed on European nuclear power plants; 2012.
- GP (2014): Gefahr aus der Luft – Drohnenüberflüge bedrohen französische Atomanlagen; Risikoanalyse am Beispiel der AKW Fessenheim, Cattenom und Gravelines; Kurzstudie; Oda Becker erstellt im Auftrag von Greenpeace Deutschland e.V.; November 2014
- HEIN, Rudolf (2024): Das Auge des Himmels. Ethische Beobachtungen zur Wahrnehmung von Drohnen. In: Andreas Del Re / Norbert Kämper / Andreas Schoch / Philipp Scheele (Hrsg.): Unbemannte Luftfahrtsysteme. Zivile Drohnen im Spannungsfeld von Wirtschaft, Recht, Sicherheit und gesellschaftlicher Akzeptanz. Springer, 17-48
- HIPPEL (2016): Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools; Frank N. von Hippel and Michael Schoeppner; SCIENCE & GLOBAL SECURITY 2016, Vol 24, No.3, 141-173; <http://dx.doi.org/10.1080/08929882.2016.1235382>
- JANKOWSKI, T. (2023). The Proliferation of Militarized Civilian Drones in Ukraine: a Lesson from the War for Western Military Staffs. Network for Strategic Analysis (NSA). <https://ras-nsa.ca/the-proliferation-of-militarized-civilian-drones-in-ukraine-a-lesson-from-the-war-for-western-military-staffs/>.

- KRYZHANIVSKA (2025): Drohnenkrieg in der Ukraine: Das Zusammenspiel von High- und Low-Tech; Olena Kryzhanivska; Ukraine-Analysen Nr. 321, 17.11.2025 DOI: 10.31205/UA.321.01
- NSA (2006): National Research Council of the Nation Academies (NSA): Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage, Public Report, 2006;
<https://www.nap.edu/catalog/11263/safety-and-security-of-commercial-spent-nuclear-fuel-storage-public>
- PLEDGER (2021): The Role of Drones in Future Terrorist Attacks, Published by the Association of the United States Army; Thomas G. Pledger; Land Warfare Paper Nr. 137, February 2021
https://www.ausa.org/sites/default/files/publications/LWP-137-The-Role-of-Drones-in-Future-Terrorist-Attacks_0.pdf PLEDGER 2021
- REPUBLIQUE FRANCAISE (2024): NATIONAL REPORT OF FRANCE FOR THE 8TH REVIEW MEETING; Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management; August 2024
- RUBIN (2020): The Second Nagorno-Karabakh War: A Milestone in Military Affairs. Mideast Security and Policy Studies. Rubin, U.; <https://besacenter.org/wp-content/uploads/2020/12/184web-no-ital.pdf>.
- STEPANENKO, K. (2025). The Battlefield AI Revolution Is Not Here Yet: The Status of Current Russian and Ukrainian AI Drone Efforts. Institute for the Study of War.
<https://understandingwar.org/backgrounder/battlefield-ai-revolution-not-here-yet-status-current-russian-and-ukrainian-ai-drone> .
- STIELER (2026): Aus der Luft geholt. Von Jammern bis Laserkanonen. Was gegen Sabotage, Spionage und Angriffe durch Drohnen hilft. Stieler, W.; MIT Technology Review 1/2026
- UMWELTBUNDESAMT (2019): Becker, O.; Giersch, M.; Meister, F.; Mertins, M.; Weimann, G.: Review of the 900 MWe reactor fleet (VD4-900). Expert Statement on the Generic Phase. By Order of the Federal Ministry for Sustainability and Tourism Directorate I/6 General Coordination of Nuclear Affairs BMNT. REP-0686, Wien
- UMWELTBUNDESAMT (2021): Frankreich: Beschluss der ASN zur Feststellung der Anforderungen an die 900 MW Reaktoren; *Kurzgutachten*; Oda Becker, Kurt Decker, Manfred Mertins, Gabriele Mraz; REPORT; REP-0764; WIEN 2021.
- UMWELTBUNDESAMT (2024): Becker, O.; Decker, K.; Frieß, F.; Marignac, Y.; Mertins, M.; Mraz, G.; Müllner, N.: Lifetime extension of the French 1300 MWe reactor fleet - generic requirements for the periodic safety review 4. Expert statement – synthesis report. Erstellt im Auftrag des BMK, Abt. VI/9 Allgemeine Koordination von Nuklearangelegenheiten, REP-0915, Wien.
- UMWELTBUNDESAMT (2025): NPP CHINON B REACTOR 1 LTO, ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT; Expert Statement; Oda Becker, Kurt Decker, Nikolaus Muellner, Bojan Tomic, Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Climate and Environmental Protection, Regions and Water Management; Directorate General VI – Environment and Climate; Directorate VI/8 General Coordination of Nuclear Affairs; REPORT REP-1012; VIENNA 2025.
- WEBER&KRAATZ (2024): Drohnenschwärme: Die unterschätzte Gefahr für Atommülllager. Forschende sehen dringenden Handlungsbedarf. Weber, J.; Kraatz, L.; ND 8.12.2024;
<https://www.nd-aktuell.de/artikel/1187312.schutz-von-atomanlagen-drohnenschwaerme-die-unterschaetzte-gefahr-fuer-atommuelllager.html>
- WEI et al. (2024): A Survey on Security of Unmanned Aerial Vehicle Systems: Attacks and Countermeasures. Wei, Xiaomin / Jianfeng Ma / Cong Sun; IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, VOL. 11, NO. 21, 1 NOVEMBER 2024.