

Justus-Liebig-Universität Gießen

Fachbereich 07: Mathematik, Informatik, Physik, Geographie

Institut für Geographie

Professur für Raumplanung und Stadtgeographie

Eine Analyse des Umgangs räumlicher Planung mit kritischen Infrastrukturen im Klimawandel in Hessen

Status quo der Berücksichtigung von KRITIS und Anwendung einer doppelten Schutzperspektive auf das
Fallbeispiel Rechenzentrum

An analysis of how spatial planning considers critical infrastructures in the context of climate change in Hesse

The current status quo of consideration of CI, and the application of a dual protection perspective on the
case study data center

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

vorgelegt von

M. Sc. Jan Moritz Gros

Gießen, Juli 2026

Betreuung

Prof. Dr. Christian Diller

Professur für Raumplanung und Stadtgeographie

am Institut für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen

Erstgutachten

Prof. Dr. Christian Diller

Justus-Liebig-Universität Gießen, Deutschland

Zweitgutachten

Dr. hab. Marta Borowska-Stefańska, prof. UŁ

Universität Łódź, Polen

Diese Dissertation ist im Rahmen des durch das hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) geförderten Forschungsprojekts „KritIKlima - Kritische Infrastruktur und Klimawandel“ (Antragsteller: Prof. Dr. Christian Diller) entstanden.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht, wie der Schutz kritischer Infrastrukturen (KRITIS) vor den Folgen des Klimawandels in der räumlichen Planung in Hessen berücksichtigt wird. Im Zentrum steht dabei die Analyse des raumplanerischen Mehrebenensystems, bestehend aus Landes- und Regionalplanung, ausgewählten raumbedeutsamen Fachplanungen sowie der kommunalen Bauleitplanung. Methodisch basiert die Arbeit auf einer Kombination aus qualitativen Experteninterviews und vertiefenden Fallstudien zu Bebauungsplanverfahren mit Rechenzentrumsbezug in Gießen (ex-ante) und Hanau (ex-post). Als konzeptioneller Rahmen der Fallstudien dient die doppelte Schutzperspektive, welche sowohl die Auswirkungen des Klimawandels auf KRITIS als auch deren Umweltauswirkungen systematisch integriert.

Die Ergebnisse zeigen, dass raumordnerischer KRITIS-Schutz bislang vor allem abstrakt und schwerpunktmäßig im Kontext des Hochwasserschutzes verankert ist. Die konkrete Umsetzung von Resilienzmaßnahmen wird überwiegend im Handlungsfeld nachgelagerter Planungsebenen sowie bei technischen Fachplanungen und Betreibern gesehen. Gleichzeitig bestehen für die raumordnerische Integration des Schutzes von KRITIS vor Klimawandelfolgen zentrale Hürden, insbesondere aufgrund fehlender rechtsbindender Definitionen von KRITIS sowie unzureichender Schwellenwerte zur Bestimmung klimabedingter Kritikalität außerhalb etablierter Gefahrenkulissen.

Die Analyse der Fallstudien verdeutlicht, dass Rechenzentren als zunehmend bedeutsame KRITIS spezifische planerische Herausforderungen mit sich bringen, insbesondere im Hinblick auf Flächeninanspruchnahme, Energiebedarf sowie Umweltauswirkungen wie Abwärme und CO₂-Emissionen. Die doppelte Schutzperspektive auf KRITIS bietet dabei die Möglichkeit, den Schutz kritischer Infrastrukturen vor den Folgen des Klimawandels mit dem Schutz der Umwelt vor den von ihnen ausgehenden Auswirkungen systematisch zu verknüpfen. Damit fungiert sie als Ansatz, der sowohl die Facetten Klimaanpassung und Klimaschutz integriert und konkret in Bezug auf Rechenzentren operationalisiert. Letzteres ermöglicht eine verfahrensbegleitende Sicherstellung, dass Planungen gegenüber Klimawandelfolgen angepasst und zugleich auf den Klimaschutz ausgerichtet werden. Insgesamt bietet die doppelte Schutzperspektive somit einen konzeptionellen Rahmen, um beide Zieldimensionen im Sinne eines vorsorgenden und integrierten KRITIS-Schutzes zusammenzuführen.

Abstract

This dissertation examines how the protection of critical infrastructures (CI) from the effects of climate change is addressed in spatial planning in Hesse. The focus is on analyzing the multi-level spatial planning system, which consists of state and regional planning, selected sectoral planning institutions, and municipal land-use planning. Methodologically, the thesis is based on a combination of qualitative expert interviews and in-depth case studies on land-use plan procedures related to data centers in Giessen (ex-ante) and Hanau (ex-post). The conceptual framework for the case studies is the dual protection perspective, which systematically integrates both the impacts of climate change on CI and their environmental impacts.

The results show that, to date, CI protection in regional planning has been primarily abstract and anchored mainly in the context of flood protection. The concrete implementation of resilience measures is predominantly seen as falling within the scope of downstream planning levels, as well as in technical specialist planning and among operators. At the same time, there are major hurdles to the integration of CI protection against the impacts of climate change into spatial planning, particularly due to the lack of legally binding definitions of CI and insufficient thresholds for determining climate-related criticality outside established hazard scenarios.

The analysis of the case studies illustrates that data centers, as increasingly significant CI, present specific planning challenges, particularly with regard to land use, energy demand, and environmental impacts such as waste heat and CO₂ emissions. The dual protection perspective on CI offers the opportunity to systematically link the protection of critical infrastructure from the consequences of climate change with the protection of the environment from the impacts they generate. It thus serves as an approach that integrates both climate adaptation and climate protection and operationalizes them specifically in relation to data centers. The latter enables a process-accompanying assurance that planning is adapted to the consequences of climate change while simultaneously being aligned with climate protection. Overall, the dual protection perspective thus offers a conceptual framework for bringing together both dimensions of the objectives in the spirit of a precautionary and integrated CI protection.

Danksagung

Meine Promotionszeit am Institut für Geographie der Justus-Liebig-Universität Gießen war geprägt von vielen Menschen die mich mit ihren Gedanken, Ideen und individuellen Begeisterungen für Raumplanung und eine klimaangepasste Zukunft unterstützt und bereichert haben. An dieser Stelle möchte ich diesen Menschen meinen Dank aussprechen.

Zunächst gilt mein Dank Christian Diller, für die Möglichkeit an seiner Professur zu promovieren und mir den Freiraum und die Unterstützung zu geben, mich mit dem spannenden Themenfeld kritischer Infrastrukturen im Klimawandel beschäftigen zu können. Darüber hinaus möchte ich mich bei Marta Borowska-Stefańska bedanken, zum einen für die vielen Ideen die in unseren Treffen in Łódź und in Gießen entstanden sind und zum anderen dafür, mir die Chance zu geben an den gemeinsamen Publikationen zu arbeiten. Hier gilt mein Dank auch Szymon Wiśniewski, Edyta Masierek und Michał Kowalski für die Arbeit im gemeinsamen Projekt NIHO. Weiterer Dank gilt auch Stefan Hennemann und Lea Schneider für die Bereitschaft, Teil der Prüfungskommission zu sein.

Das Forschungsprojekt KritIKlima, aus welchem dieses Promotionsvorhaben entstanden ist, wäre ohne die Unterstützung des hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie nicht entstanden, hier gilt mein Dank insbesondere Anna-Christine Sander und Aljoscha Kreß für die vielen Impulse die ihr mir während unserer Treffen gegeben habt. Mein Dank gilt an dieser Stelle auch den zahlreichen ExpertInnen welche mir in Experteninterviews und Fallstudien ihr Wissen vermittelten.

Mein Dank gilt weitergehend meinen vielen KollegInnen der Professur für Raumplanung und Stadtgeographie: Julian Adler, Franziska Beck, Annette Briesemeister, Tina Fentroß, Sina Happel, Sarah Hermsen, Sarah Kriesch, Marie-Louise Litmeyer, Christin Müller, Sergej Nesterenko und Lysania Sorger. Auch meinen Dank an Tim Becker, Lennart Fischer, Julia Jeretzky, Lukas Kriesch, Charlotte Lobensteiner, Sebastian Losacker, Linda Lütkes, Francesca Mazzoni, Sina Sänger, Moritz Schütz und Lisa Zirbes möchte ich an dieser Stelle aussprechen. Danke euch für die vielen schönen Erlebnisse innerhalb und außerhalb der Schlossgasse. Bei Jörn Profe bedanke ich mich für die gemeinsame Arbeit in der Lehre, sowie bei Lisett Diehl, Michael Hollenhorst und Carsten Klaholz für die technische und administrative Hilfe. Ich danke auch meinen studentischen Hilfskräften Tina Fentroß und Larissa Winter, die mich mit ihrer motivierten Arbeitsweise unterstützt haben.

Ganz besonders danken möchte ich meinen lieben Eltern dafür, dass sie meinen Weg begleiten, mich immer bestärken und mich mit ihrer Begeisterung für Neues anstecken. Danke, dass ihr mir die Welt gezeigt und mir das Vertrauen und die Möglichkeit gegeben habt, sie zu sehen. Danke für alles, was ihr mir mitgegeben habt und das mich zu dem gemacht hat, der ich heute bin.

Ich danke all meinen tollen Freundinnen und Freunden, die immer für mich da sind, egal, wo ich mich befinde. Besonders danken möchte ich Bastian, Jan und Lisa, die immer ein offenes Ohr für mich haben und mein Leben so sehr bereichern. Clara, Lena, Peter, Rosa und Vika, danke, dass ihr meine Zeit hier in Gießen so erlebnisreich macht - von Unterhaltungen über Rechenzentren im Rahmen der Nudelkoch-Talks bis zu den schönen Abenden auf unserem Balkon.

Jan Moritz Gros

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract.....	II
Danksagung.....	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1. Einleitung.....	1
1.1. Forschungsziele und Beitrag.....	3
1.2. Aufbau und Struktur der Arbeit.....	6
2. Konzeptionelle Grundlagen.....	8
2.1. Facetten kritischer Infrastrukturen	8
2.1.1. Kritikalität.....	9
2.1.2. Ausfallkonsequenzen und Interdependenzen	11
2.1.3. Resilienz	17
2.1.4. KRITIS vor dem Hintergrund der Gesetzgebung.....	20
2.2. Raumplanung - Begriffliche Einordnung und Systematik insbesondere in Hessen	24
2.2.1. Von Raumplanung zur Bauleitplanung: Begriffliche Einordnung	24
2.2.2. Das Raumplanungssystem in Hessen	31
2.3. Raumbedeutsame Auswirkungen des Klimawandels.....	34
2.3.1. Temperatur	39
2.3.2. Niederschlag	45

2.4. Zwischenfazit.....	50
3. KRITIS im Klimawandel in Hessen: Status quo und Hürden in raumplanerischer Steuerung.....	52
3.1. Der KRITIS-Schutz in räumlicher Planung.....	54
3.2. Forschungsfragen.....	57
3.3. Untersuchungsdesign und Methodik.....	58
3.4. Empirische Untersuchung.....	62
3.4.1. KRITIS-Schutz in hessischer Raumplanung - Handlungsrahmen.....	62
3.4.2. Hürden im Rahmen der Umsetzung des KRITIS-Schutzes in hessischer Raumplanung	73
3.5. Diskussion.....	76
3.6. Zwischenfazit.....	82
4. Doppelte Schutzperspektive auf KRITIS am Beispiel von Rechenzentren.....	84
4.1. Rechenzentren als KRITIS: Typisierung, Einordnung und Rahmenbedingungen ...	87
4.2. Forschungsstand zur doppelten Schutzperspektive und Standortlogik	89
4.3. Forschungsfragen.....	101
4.4. Untersuchungsdesign und Methodik.....	103
4.5. Anwendung der doppelten Schutzperspektive auf das Fallbeispiel „Kattenfeld“ in Gießen	107
4.5.1. Planungs- und Vorhabenkontext	108
4.5.2. Schutzperspektive I: Auswirkungen des Klimawandels auf das Vorhaben	112
4.5.3. Schutzperspektive II: Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt	117
4.6. Anwendung der doppelten Schutzperspektive auf das Fallbeispiel „Großauheim-Kaserne“ in Hanau	118

4.6.1. Planungs- und Vorhabenkontext	118
4.6.2. Schutzperspektive I: Auswirkungen des Klimawandels auf das Vorhaben	122
4.6.3. Schutzperspektive II: Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt	125
4.7. Vergleich und Diskussion	131
4.8. Zwischenfazit	144
5. Fazit	148
5.1. Zentrale Ergebnisse und Handlungsempfehlungen	148
5.2. Limitationen	158
5.3. Forschungsbedarf- und Perspektiven	159
5.4. Überblick über weitere Forschungsarbeiten	161
Literaturverzeichnis	164
Rechtsquellenverzeichnis	181

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Relative Bedeutsamkeit / Kritikalität einer Infrastruktur	10

Abb. 2:	KRITIS-Sektoren in Deutschland	11

Abb. 3:	KRITIS-Verbindungen zwischen den Sektoren (beispielhaft in Hessen)	12

Abb. 4:	Allgemeine Modellarchitektur des KRITIS Systems in Hessen	16

Abb. 5:	Ablauf des Bauleitplanverfahrens	28

Abb. 6	Multi-Level Governance-Struktur des deutschen Planungssystems (vereinfacht)	32

Abb. 7:	Planungsregionen in Hessen	33

Abb. 8:	Treibhausgas-Emissionpfade 2000-2100, IPCC Sachstandsbericht 5	36

Abb. 9:	Globale CO ₂ -Emissionen nach den SSP-Szenarien, IPCC Sachstandsbericht 6	37

Abb. 10:	Klimaprojektion der Lufttemperatur, Emissionsszenario RCP 8.5, Zeitfenster: 2030-2060	40

Abb. 11:	Klimaprojektion des Indikators Tropennächte, Emissionsszenario RCP 8.5, Zeitfenster: 2030-2060	41

Abb. 12:	Thermische Betroffenheit der Bevölkerung im Land Hessen	43

Abb. 13:	Vorgehen im Rahmen der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse	61

Abb. 14:	Systematik von KRITIS-Hinweisen in den hessischen Raumordnungsplan-Neuauflagen	71

Abb. 15:	Geplante und im Bau befindliche Rechenzentrumskapazität in Europa im 2. Halbjahr 2024, nach Märkten (in MW)	85

Abb. 16:	Bau- und Ausbaupläne von Rechenzentren nach Metropolregion- Standorten im Jahr 2024	86
Abb. 17:	Typisierung von Rechenzentren	88
Abb. 18:	Durchschnittliche jährliche Energieeffizienz (PUE) der Rechenzentren weltweit	94
Abb. 19:	Vorgehen im Rahmen der Fallstudie „Katzenfeld“ in Gießen	104
Abb. 20:	Vorgehen im Rahmen der Fallstudie „Großauheim-Kaserne“ in Hanau	106
Abb. 21:	Geltungsbereich des Bebauungsplans „Katzenfeld“	108
Abb. 22:	Vorentwurf zum Bebauungsplan „Katzenfeld“ (GI 05/23)	111
Abb. 23:	Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Gefahrenkarte HQ100	112
Abb. 24:	Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Gefahrenkarte HQextrem	113
Abb. 25:	Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Fließpfadkarte	114
Abb. 26:	Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Ausschnitt der Stadtklimaanalyse	115
Abb. 27:	Überblick über die Teilpläne des Bebauungsplans „Großauheim- Kaserne“, sowie umgebender FFH- und Naturschutzgebiete	119
Abb. 28:	Bebauungsplan „Großauheim-Kaserne“ (Teilplan A)	122
Abb. 29:	Hochwasser-Überflutungsflächen in der Gebietskulisse Großauheim- Kaserne	123

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	KRITIS-betreffende anthropogene und natürliche Gefahren	13
Tab. 2:	Übersicht über die zeitliche Abfolge wesentlicher Rechtsvorschriften im KRITIS-Kontext (EU und national)	23
Tab. 3:	Experteninterviews zu den Ebenen der Raumordnung, raumbedeutsamer Fachplanungen und weiterer Institutionen	59
Tab. 4:	KRITIS-Bezug im LEP Hessen (Planungsebene: Landesplanung Hessen)	63
Tab. 5:	KRITIS-Bezug im Regionalplan Nordosthessen (Planungsebene: Regionalplanung)	65
Tab. 6:	KRITIS-Bezug im Regionalplan Mittelhessen (Planungsebene: Regionalplanung)	67
Tab. 7:	KRITIS-Bezug im Regionalplan Südhessen (Planungsebene: Regionalplanung)	69
Tab. 8:	Mögliche Auswirkungen extremer Wetterereignisse und Klimagefahren auf die Infrastruktur von Rechenzentren	92
Tab. 9:	Zusammenstellung von Standortfaktoren für Rechenzentren durch den LK Groß-Gerau	101
Tab. 10:	Experteninterviews zur Rechenzentrenentwicklung	103
Tab. 11:	Vergleich der betrachteten Fallstudien	107
Tab. 12:	Vergleichender Überblick zur Anwendung der ersten Schutzperspektive	136
Tab. 13:	Vergleichender Überblick zur Anwendung der zweiten Schutzperspektive	140
Tab. 14:	Überblick über weitere Artikel die im Verlauf der Dissertation veröffentlicht wurden	161

Abkürzungsverzeichnis

B-Plan	Bebauungsplan
BauGB	Baugesetzbuch
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BMI	Bundesministerium des Inneren
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
BNetzA	Bundesnetzagentur
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
EPSKI	Europäisches Programm für den Schutz Kritischer Infrastrukturen
BRPH	Bundesraumordnungsplan für den Hochwasserschutz
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BSIG	Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik und über die Sicherheit in der Informationstechnik von Einrichtungen
BSI-KritisV	BSI-KRITIS-Verordnung
CER	Critical Entities Resilience

DWD	Deutscher Wetterdienst
EE	Erneuerbare Energien
EKI	Europäische kritische Infrastrukturen
EnEfG	Energieeffizienzgesetz
FNP	Flächennutzungsplan
GDA	German Datacenter Association
GFZ	Geschossflächenzahl
GG	Grundgesetz
GRZ	Grundflächenzahl
HBO	Hessische Bauordnung
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HMDI	Hessisches Ministerium für Digitalisierung und Innovation
HWG	Hessisches Wassergesetz
HMWEVL	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum
HQ	Hochwasser Quantum
HW	Hochwasser
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

IT	Informationstechnologie
KRITIS	Kritische Infrastrukturen
NIS	Network and Information Security
RegP	Regionalplan
RL	Richtlinie
ROG	Raumordnungsgesetz
SoS	System of Systems
stV	Städtebaulicher Vertrag
TöB	Träger öffentlicher Belange
UBA	Umweltbundesamt
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
VBH	Vorbehaltsgebiet
vHW-S	Vorbeugender Hochwasserschutz
VRG	Vorranggebiet
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WMO	World Meteorological Organization
XDI	Cross Dependency Initiative

1. Einleitung

Der Schutz kritischer Infrastrukturen (KRITIS) gewinnt angesichts multipler Ereignisse, welche verschiedenartige Vulnerabilitäten des staatlichen und gesellschaftlichen Systems aufzeigen, zunehmend an Bedeutung. Geopolitische Konflikte oder globale Pandemien verdeutlichen die Störanfälligkeit hochvernetzter Versorgungsstrukturen und machen ihre zentrale Rolle für das Funktionieren moderner Gesellschaften sichtbar. So führte beispielsweise der russische Angriffskrieg auf die Ukraine zu Engpässen in der Energieversorgung (Khan 2025), während die Corona-Pandemie der Jahre 2020 bis 2023 die Anfälligkeit globaler Lieferketten verdeutlichte (Xu et al. 2020). Dazu wirkt sich der anthropogene Klimawandel auf Ökosysteme, die Gesellschaft, sowie verschiedene Facetten der gebauten und nicht-gebauten Umwelt aus. Erkennbar wird dies u. a. an der Reduktion der Biodiversität, ansteigender Mortalität folgend auf Hitzewellen sowie auf Hochwasser, wie die Ereignisse im Juli 2021 in Westeuropa verdeutlichten. Das Ereignis führte neben Todesfällen, 190 dabei in Deutschland (Thicken et al. 2023: 1), und einer hohen Anzahl Verletzter, zu signifikanten Schäden an Gebäuden, bzw. deren Zerstörung, auch zur Disruption und Zerstörung von Energie-, Gas-, Kommunikations- und Wasserversorgungssystemen (ebd.). Schüttrumpf et al. (2026: 1) beschreiben es als „das schlimmste Überschwemmungs-Event in Belgien, den Niederlanden und Deutschland seit den beiden Sturmfluten im Februar 1953 mit 1836 Todesopfern in den Niederlanden und 18 in Belgien sowie im Februar 1962 mit 347 Todesopfern in Deutschland“. Globale Treibhausgasemissionen steigen derweil fortlaufend, wobei ungleiche historische und aktuelle Beiträge aus unnachhaltiger Energie- und Landnutzung, Lebensweisen sowie Konsum- und Produktionsmustern zwischen Regionen, zwischen und innerhalb von Ländern sowie zwischen Einzelpersonen resultieren (IPCC 2023: 4). Erkennbar sind die Folgen bereits in einem Anstieg an Extremwetterereignissen (vgl. Newman et al. 2023), wie z. B. Hitzewellen, Hochwasser und Starkregen.

Die angerissenen Krisen verdeutlichen hierbei auch die steigende Angewiesenheit auf vernetzte Infrastrukturen als Fundament unserer Gesellschaft und den Schutzbedarf jener KRITIS: „Wie bedeutsam Kritische Infrastrukturen sind, erkennt man erst, wenn es zu Störungen kommt. Denn sie bilden die Grundlage für das Funktionieren unserer Gesellschaft“ (BBK 2023a). So sind in einer immer komplexer werdenden Welt Infrastrukturen, wie z. B. Rechenzentren, als Rückgrat der Digitalisierung Fundament digitalen Handelns, Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehrswege von bedeutender Relevanz für den Transport von Gü-

tern, Energieträgern und alltäglicher gesellschaftlicher Mobilität sowie bspw. in Zeiten des demographischen Wandels auslastungsfähige Gesundheitseinrichtungen, bedeutende Einrichtungen der Daseinsvorsorge.

Klimawandelbedingte Ereignisse betreffen hierbei als Risiko nicht nur die physische Infrastruktur, sondern unterbrechen Versorgungsnetze und können weitere Folgeeffekte auslösen. Wenn so bspw. zentrale Komponenten der Energieinfrastruktur ausfallen, bedingt ein solcher Ausfall exemplarisch nicht nur diesen Infrastruktursektor, sondern auch weitere, mit der physischen Komponente verbundene Bereiche, wie z. B. den Gesundheitssektor in Form eines Krankenhauses. Weitergehend sind klimawandelbedingte Ereignisse nicht ausschließlich in kurzfristigem Ereigniseintritt messbar, wie bspw. bei Starkregen, sondern zeigen auch langsamere Entwicklungen auf, wie bspw. der Temperaturanstieg. Vor diesem Hintergrund verdeutlicht sich die Wichtigkeit, dem Schutz von KRITIS Rechnung zu tragen. Ereignisse wie die Hochwasser des Jahres 2021 heben hierbei einerseits die Relevanz von funktionierenden Infrastruktursystemen und andererseits die Folgen, welche ein Ausfall dieser interdependenten Systeme auf das Funktionieren der Gesellschaft hat, hervor. So beschreiben Schüttrumpf et al. (2026: 8) die Erforderlichkeit verbesserter Schutzstandards und integrierter Strategien zur Minderung des Hochwasserrisikos für KRITIS. Hierbei müssen gemäß der AutorInnen als zentrale Erkenntnis der Hochwasserereignisse des Jahres 2021 differenzierte Hochwasserschutzkonzepte entwickelt werden, welche verschiedene Wiederkehrperioden, Redundanzen von KRITIS und spezifische Schwachstellen sensibler Einrichtungen berücksichtigen. Gleichzeitig müssen wirksame Evakuierungsmöglichkeiten sichergestellt werden (Borowska-Stefańska et al. 2026).

In diesem Kontext wird eine Planung für diese Ereignisse im Sinne von Prävention und Widerstandsfähigkeit stetig relevanter. So sorgen Katastrophenschutzbehörden zunehmend dafür, für Krisenfälle zu üben und den Ereignisfall zu trainieren. Betreiber von Einrichtungen, die für das Funktionieren gesellschaftlicher Basisfunktionen relevant sind, entwickeln Notfallpläne, um ihren Betrieb in Krisensituationen aufrechterhalten zu können. Auch räumliche Planung in ihrer Funktion der langfristigen Steuerung von Raumnutzungen hat einen Einfluss darauf, wie nachhaltig Fläche(n) gerade in der Vorsorge für Klimawandelfolgen gestaltet werden. So verankert sich im Handlungsfeld der Raumplanung parallel dazu auch der Schutz von KRITIS, welchem als raumordnerischer Grundsatz Rechnung zu tragen ist. Zudem bietet der Climate-Proofing-Ansatz (Birkmann et al. 2009: 118) die Möglichkeit, die Auswirkungen von Klimawandelfolgen auf Planvorhaben sowie die Auswirkun-

gen von Planvorhaben auf die Umwelt zu betrachten. Parallel dazu eröffnet die doppelte Schutzperspektive (Diller et al. 2023) Ansatzmöglichkeiten, um sowohl den Schutz der KRITIS vor Klimawandelfolgen als auch den Schutz der Umwelt vor den Auswirkungen KRITIS-bezogener Planvorhaben zu analysieren.

In diesem Zusammenhang ist gerade das Bundesland Hessen ein interessanter geographischer Bezugsrahmen. Zum einen lassen sich in Hessen verschiedene Raumstrukturen betrachten: Während Nord-, Ost- und Mittelhessen überwiegend dem ländlichen Raum zuzuordnen sind (Diller et al. 2024), ist die Region Südhessen gerade in ihrem Zentrum von der Metropolregion *FrankfurtRheinMain* urban geprägt. Zum anderen finden sich verschiedene klimageographische Anhaltspunkte, das Land Hessen im Kontext dieser Dissertation nähergehend zu betrachten: Hessen liegt hier zunächst in der Klimazone des warm-gemäßigten Regenklimas der mittleren Breiten (DWD/HLNUG 2024: 15). Gleichzeitig werden, wie exemplarisch in den Sommern 2015 und 2018, neue Hitzerekorde aufgestellt (HLNUG 2019: 22). Außerdem ist ein Anstieg von Starkniederschlagsereignissen zu erwarten (ebd.). Des Weiteren ist gerade auch die Stadt Frankfurt am Main mit der sie umgebenden Metropolregion Knotenpunkt für diverse zentrale Infrastruktursysteme mit nationaler und teils globaler Bedeutung. Hier zu nennen sind beispielhaft der Frankfurter Flughafen sowie einer der weltweit größten Internetknotenpunkte, DE-CIX, mit der damit verbundenen Ansiedlung von Rechenzentren. Aufgrund der Agglomeration verschiedener infrastruktureller Knotenpunkte mit nationaler und teils auch globaler Bedeutung sowie der Betrachtungsmöglichkeit diverser Klimawandelfolgen, wird für diese Dissertation im Schwerpunkt das Bundesland Hessen als Untersuchungsraum gewählt. Hierfür werden im Folgenden die Forschungsziele, welche das Vorhaben anleiten, aufgeschlüsselt.

1.1. Forschungsziele und Beitrag

Übergeordnetes Ziel dieser Dissertation ist es zu untersuchen, wie der Schutz kritischer Infrastrukturen vor Klimawandelfolgen in der räumlichen Planung in Hessen berücksichtigt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, werden im Folgenden drei Forschungsziele aufgestellt, die das weitere Vorgehen leiten.

Riegel (2015) vollzieht hierbei in einer Dissertation eine quantitative Analyse des Umgangs räumlicher Planung mit KRITIS und untersucht dabei die Regionalplanungsebene. Er

entwickelte zudem einen Modellansatz dazu, regionale Schwerpunkte zu identifizieren, in welchen unterschiedliche Infrastrukturen räumlich akkumuliert dargestellt und diese Information mit einer Einschätzung zur Kritikalität verschnitten wurden, wodurch im Ergebnis Aussagen zu „besonders sensiblen Bereichen für die Infrastrukturversorgung in einer Region getroffen werden“ (Riegel 2015: 165). Schmitt (2020) entwickelte weiterhin einen Operationalisierungsansatz systemischen Kaskadenpotentials. Beide Arbeiten argumentieren dabei allerdings gefahrenunabhängig, woran Forschungsziel 1 der Dissertation ansetzt, welches vor diesem Hintergrund eine praxisorientierte Analyse der Ebenen der Landes- und Regionalplanung sowie ausgewählter raumbedeutsamer Fachplanungen in ihrem Umgang mit KRITIS im Klimawandel umfasst:

Forschungsziel 1: Ermittlung von Umfang und Formen der Berücksichtigung des KRITIS-Schutzes im Zusammenhang mit Klimawandelfolgen in der hessischen Landes- und Regionalplanung sowie in ausgewählten raumbedeutsamen Fachplanungen (Kapitel 3).

Der Beitrag, welcher durch die Verfolgung des ersten Forschungsziels erzielt wird, ist zum einen eine praxisorientierte gefahrenbezogene Analyse des Umgangs von Planungsträgern mit den Klimawandelfolgen Hochwasser, Starkregen und Hitze in Auswirkung auf KRITIS. Zum anderen wird durch ein qualitatives Untersuchungsdesign im zeitlichen Handlungsfenster der Neuaufstellung der hessischen Regionalpläne der Forschungsstand zur Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes erweitert.

Diesbezüglich zeigen sich bereits im Vorhinein der konkreten Betrachtung des KRITIS-Schutzes begleitende Schrankenstellungen, wie dem Fehlen einer bundes- und landesweiten KRITIS-Definition. Hierbei zeigt die Analyse bundesweiter Regionalpläne von Riegel (2015), dass sich hinsichtlich des Schutzes von KRITIS bislang „kein ausreichendes Problembewusstsein herausgebildet hat“ (Riegel 2015: 106). Eine Inhaltsanalyse der deutschen Raumordnungspläne von Schmitt (2020: 29) kommt zu dem Ergebnis, dass „KRITIS zum einen sehr selten überhaupt und wenn, dann in relativ jungen Raumordnungsplänen erwähnt werden und dass es sich im Falle deren Erwähnung zum anderen um unterschiedliche Kontexte handelt“.

Forschungsziel 2 setzt daher daran, die Hürden, welche sich einer Umsetzung des KRITIS-Schutzes durch räumliche Planung entgegenstellen, zu konkretisieren und zu untersuchen:

Forschungsziel 2: Identifizierung der Hürden, die der Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes entgegenstehen (Kapitel 3).

Der Beitrag, der durch die Untersuchung des zweiten Forschungsziels erfolgt, ist aus theoretischer Sicht aufbauend auf der Analyse des Handlungsrahmens räumlicher Planung durch das Forschungsziel 1 in diesem Themenkomplex, eine Integration der Hürden, welche sich in diesem Zusammenhang zeigen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ein zusätzlicher Fokus auf die kommunale Bauleitplanung gelegt. Fallbeispiele dieser Betrachtung sind mit Rechenzentren KRITIS, welche sich gerade in Hessen durch eine hohe räumliche Dynamik kennzeichnen und gleichzeitig sowohl aus Klimaanpassungs- als auch Schutzperspektive zeitlich relevante Untersuchungsobjekte darstellen. So argumentieren Diller et al. (2023: 1), dass sich KRITIS entsprechend aus doppelter Schutzperspektive betrachten lassen: Einerseits werden sie als schützenswert angesehen, insbesondere vor den Folgen des Klimawandels in Form von Extremereignissen und langsamen Veränderungen, welche dieses Schutzerfordernis verstärken. Zum anderen sind insbesondere expansive KRITIS Beispiele für Infrastrukturen, vor denen auch die Umwelt zu schützen ist (ebd.) - im Falle von Rechenzentren bspw. durch emittierte Abwärme.

Zur Betrachtung der Ebene kommunaler Bauleitplanung werden somit zwei Fallbeispiele zu Planvorhaben der KRITIS Rechenzentrum durchgeführt und durch den Perspektivansatz der doppelten Schutzperspektive analysiert. Forschungsziel 3 umfasst entsprechend dessen Anwendung und Implementation:

Forschungsziel 3: Anwendung der doppelten Schutzperspektive zum Schutz von KRITIS und deren methodische Implementation in Fallbeispiele zu Rechenzentren-Planvorhaben auf Ebene der kommunalen Bauleitplanung (Kapitel 4).

Beitrag der Arbeit durch die Verfolgung dieses Forschungsziels ist hierbei einerseits die Anwendung eines konkreten Analyserahmens zum Schutz von KRITIS, andererseits ein Forschungsbeitrag zur bauleitplanerischen Berücksichtigung von KRITIS und insbesondere von Rechenzentren.

Ergänzend ist hervorzuheben, dass die Arbeit nicht ausschließlich auf die Erreichung wissenschaftlicher Forschungsziele gerichtet ist, sondern zugleich praktische Zielsetzungen verfolgt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen nicht nur zur Schließung bestehender Forschungslücken beitragen, sondern auch eine Grundlage für die planerische und fachprakti-

sche Auseinandersetzung mit dem Schutz von KRITIS im Kontext des Klimawandels bieten. Damit verbindet das Vorhaben wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn mit einem anwendungsbezogenen Mehrwert.

Die Forschungsziele werden in den Kapiteln drei und vier auch hinsichtlich der die Untersuchung anleitenden Forschungsfragen operationalisiert. Im Folgenden wird zunächst der Aufbau und die Struktur der Dissertation dargelegt.

1.2. Aufbau und Struktur der Arbeit

Nach der in **Kapitel 1** vollzogenen Einleitung in die Arbeit, sowie der Darstellung der Forschungsziele- und Beitrag in Kapitel 1.1, ist die vorliegende Dissertation in vier aufeinander aufbauende Bereiche gegliedert:

Zunächst werden in **Kapitel 2** die konzeptionellen Grundlagen der Arbeit dargelegt. Es erfolgt hierbei eine Einordnung der Facetten von KRITIS (Kap. 2.1), welche sich in die Facetten Kritikalität (Kap. 2.1.1), Ausfallkonsequenzen und Interdependenzen (Kap. 2.1.2) und Resilienz (Kap. 2.1.3) aufteilt. Weitergehend wird ein Einblick zur Gesetzgebung im Kontext von KRITIS gegeben (Kap. 2.1.4). Zur (begrifflichen) Einordnung von Raumplanung und Darstellung der Systematik in Hessen erfolgt darauf folgend eine Beschreibung der für diese Dissertation relevanten Charakteristika der Raumplanung inklusive der zugehörigen Ebenen wie der kommunalen Bauleitplanung (Kap. 2.2). Die begriffliche Einordnung erfolgt hierbei in Kap. 2.2.1, die Darstellung des Raumplanungssystems in Hessen in Kap. 2.2.2. In Aufbau darauf erfolgt eine Erläuterung der raumbedeutsamen Folgen des Klimawandels (Kap. 2.3), wobei auch im Konkreten auf Folgen und Auswirkungen des Klimawandels im Land Hessen eingegangen wird - hier insbesondere auf Temperatur (Kap. 2.3.1) und Niederschlag (Kap. 2.3.2). In diesem Unterkapitel erfolgt auch eine Bezugnahme auf raumplanerische Steuerung in Bezug auf die dargelegten Klimawandelfolgen im Land Hessen.

Die Dissertation besteht weiterführend aus zwei zentralen Hauptkapiteln:

Kapitel 3 umfasst eine Analyse des Status quo und Hürden in raumplanerischer Steuerung von KRITIS vor dem Hintergrund des Klimawandels und adressiert das Erste und das Zweite Forschungsziel. Zunächst wird hierbei ein Einblick in den KRITIS-Schutz in räum-

licher Planung (Kap. 3.1) gegeben, woran die diesen Abschnitt anleitenden und das Forschungsziel konkretisierenden Forschungsfragen eingeordnet werden (Kap. 3.2). Darauf folgend wird das Untersuchungsdesign und die angewendete Methodik vorgestellt (Kap. 3.3). Anschließend erfolgt die empirische Untersuchung (Kap. 3.4), aufgeteilt in den Handlungsrahmen (Kap. 3.4.1) und Hürden (Kap. 3.4.2). Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse (Kap. 3.5) und einem Zwischenfazit (Kap. 3.6). Raumplanerisch untersucht Kapitel 3 hierbei die Ebenen der Landes- und Regionalplanungen in Hessen, sowie ausgewählte raumbedeutsame Fachplanungen.

Im zweiten Hauptkapitel erfolgt in **Kapitel 4** die Untersuchung des KRITIS-Fallbeispiels „Rechenzentrum“ anhand der doppelten Schutzperspektive auf Ebene der kommunalen Bauleitplanung. Hierzu werden Rechenzentren zunächst als KRITIS eingeordnet (Kap. 4.1), der Forschungsstand zur doppelten Schutzperspektive und Rechenzentren - begleitende Standortlogik dargelegt (Kap. 4.2), woraufhin die das Kapitel anleitenden und Forschungsziel 3 konkretisierenden Forschungsfragen (Kap. 4.3) dargelegt, sowie das Untersuchungsdesign und die angewendete Methodik beschrieben werden (Kap. 4.4). Die Anwendung der doppelten Schutzperspektive erfolgt dabei entlang zweier Fallbeispiele zu Planungsverfahren, wobei das erste in Kapitel 4.5 und das zweite in Kapitel 4.6 betrachtet wird. Beide Unterkapitel ordnen zunächst Planungs- und Vorhabenkontext ein, woraufhin ebenfalls beide Fallbeispiele durch die doppelte Schutzperspektive analysiert werden. Das Kapitel schließt mit einem Vergleich beider Fallbeispiele und einer Diskussion (Kap. 4.7), sowie ebenfalls mit einem Zwischenfazit (Kap. 4.8).

Die Dissertation wird in **Kapitel 5** durch ein Fazit abgeschlossen. In diesem werden die Hauptergebnisse zusammengefasst und Handlungsempfehlungen aufgestellt (Kap. 5.1), die Limitationen der Arbeit skizziert (Kap. 5.2), Forschungsbedarf- und Perspektiven dargestellt (Kap. 5.3) sowie ein Überblick über weitere Arbeiten, die im Rahmen der Dissertation entstanden sind, gegeben (Kap. 5.4).

2. Konzeptionelle Grundlagen

Zur Herstellung eines Verständnisses der zentralen Themenfelder der Dissertation werden im Folgenden die Facetten kritischer Infrastrukturen konzeptionell eingeordnet, eine begriffliche Einordnung der Raumplanung und ihrer Systematik vorgenommen, sowie raumbedeutende Folgen des Klimawandels mit einer darin integrierten Konkretisierung auf das Land Hessen beschrieben.

2.1. Facetten kritischer Infrastrukturen

Infrastrukturen sind eine „für die Versorgung eines großen Prozentsatzes der betrachteten Bevölkerung genutzte Struktur, die aus physischen und nicht - physischen Bestandteilen besteht“ (Fekete 2024: 352). Der Begriff „Infrastruktur“ bezeichnet hierbei „Einrichtungen und Anlagen, die nicht nur individuelle, sondern auch kollektive Nutzeneffekte aufweisen, und die Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung, das soziale Zusammenleben sowie die ökologisch - nachhaltige Entwicklung eines Raums haben“ (Schmidt et al. 2018: 976). Sie können weitergehend als Struktur verstanden werden, welche „geordnet wahrnehmbar ist und anderen Systemen als Unterbau dient. [...] [S]ie werden von der Bevölkerung meist als nahezu selbstverständlich wahrgenommen“ (Fekete 2024: 352).

Im bundesdeutschen Kontext sind kritische Infrastrukturen derweil gesetzlich nicht einheitlich definiert (Deutscher Bundestag 2023: 4). Zum näheren Verständnis kann allerdings die Definition des BBK's herangezogen werden, welche KRITIS als „[...] Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden“ (BBK 2023a: o.A.) einordnet.

Zwei zentrale Facetten lassen sich hierbei aus dieser Definition erkennen: Zum einen der Aspekt der Wichtigkeit bestimmter Organisationen oder Einrichtungen, zum anderen der Aspekt der Konsequenzen, welche ein Ausfall solcher Elemente hätte. Dieses Unterkapitel verfolgt das Ziel, diese und weitere Facetten von KRITIS in den Forschungsstand einzuordnen und entsprechend die konzeptionellen Grundlagen zum Themenkomplex „Kritische

Infrastrukturen“ dazulegen. Begonnen wird mit einer Betrachtung der ersten Facette, der aus der Definition abgeleiteten „wichtigen Bedeutung“ von KRITIS, bzw. ihre Kritikalität.

2.1.1. Kritikalität

Kritikalität wird im Rahmen der nationalen Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen („KRITIS-Strategie“) als „relatives Maß für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat“ (BMI 2009: 5) definiert. Der Kritikalitätscharakter wird hierbei durch das BMI im Rahmen der KRITIS-Strategie zweiteilig beschrieben: Zum einen *systemisch*, wenn eine Infrastruktur „aufgrund ihrer strukturellen, funktionellen und technischen Positionierung im Gesamtsystem der Infrastrukturbereiche von besonders hoher interdependenter Relevanz ist“ (ebd.), zum anderen *symbolisch*, „wenn aufgrund ihrer kulturellen oder identitätsstiftenden Bedeutung ihre Zerstörung eine Gesellschaft emotional erschüttern und psychologisch nachhaltig aus dem Gleichgewicht bringen kann“ (ebd.), kann aber auch beide Charakteristika aufweisen.

Kritikalität als relatives Maß zu verstehen, bedeutet in diesem Fall, dass die Identifizierung als ein „kontextabhängiges Unterfangen [gilt]“ (Krings 2020: 579), ein Infrastrukturelement somit nicht per se, sondern innerhalb eines abgesteckten Analyserahmens, als kritisch gilt (ebd.). Durch die relative Bedeutsamkeit sind KRITIS somit zum einen Schutzobjekt, zum anderen durch die potentiellen Ausfallkonsequenzen auch mögliche Gefahrenquelle, was Kritikalität zu einem vielschichtigen Konzept werden lässt (Krings 2020: 577, vgl. Abb. 1). Beide Seiten ergeben sich dabei aus der jeweiligen Position der KRITIS in einem größeren Versorgungszusammenhang (ebd.).

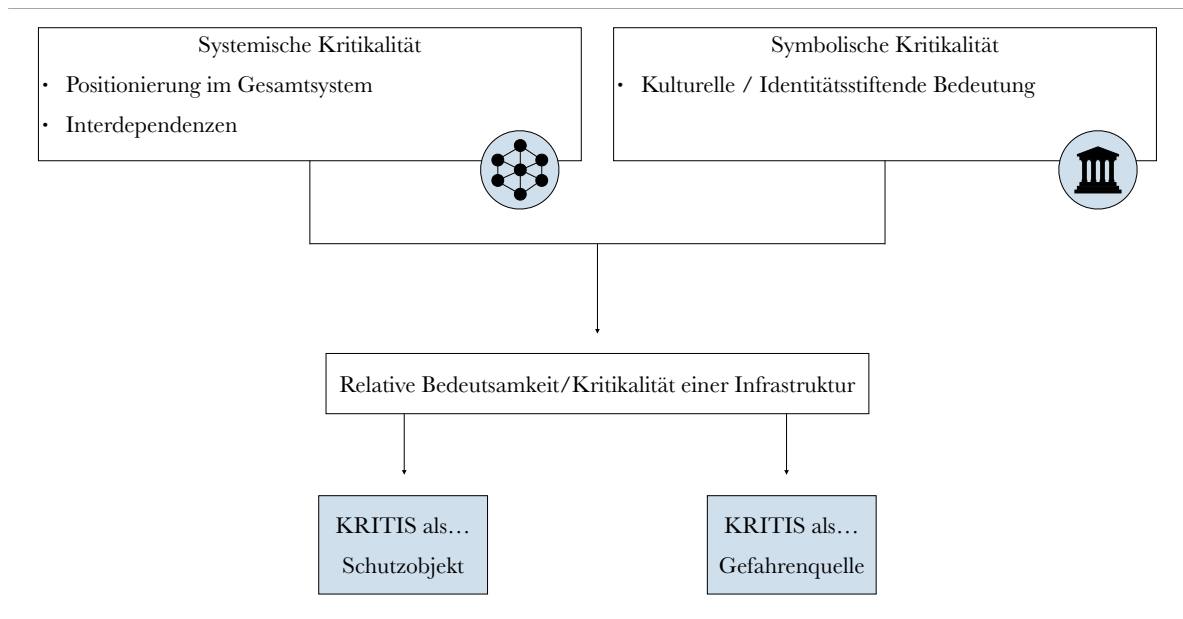


Abbildung 1: Relative Bedeutsamkeit / Kritikalität einer Infrastruktur

Quelle: Eigene Darstellung

Dem Kritikalitätsbegriff wohnt somit eine inhärente Kontextabhängigkeit inne (Schumacher 2025: 45). Dies zeigt sich beispielhaft daran, dass wenn mehrere Elemente jeweils nur eine geringe Teilleistung erbringen, der Ausfall eines Elements zu einem anteiligen Leistungsrückgang führen könnte, welcher unter Umständen auch durch eine temporäre Mehrbelastung der verbleibenden Elemente kompensiert werden kann. Stützt sich die Gesamtleistung hingegen im Extremfall ausschließlich auf ein einziges leistungsstarkes Element, hätte dessen Ausfall zugleich den vollständigen Ausfall der Gesamtleistung zur Folge - die Kritikalität dieses Infrastrukturelements wäre daher als besonders hoch zu bewerten (vgl. Krings 2020: 589).

Infrastrukturelemente lassen sich im Konkreten verschiedenen KRITIS-Sektoren zuordnen. Hierbei sind es bundesweit neun KRITIS-Sektoren, mit Hinzuziehen des Sektors „Siedlungsabfallentsorgung“ können zehn Sektoren als KRITIS eingeordnet werden (vgl. Abb. 2). Differenziert werden können hierbei drei Gruppierungen: Soziokulturelle Infrastrukturen (Medien und Kultur), sozioökonomische Infrastrukturen (Staat und Verwaltung, Gesundheit, Ernährung, Finanz- und Versicherungswesen), sowie Basisinfrastrukturen (Energie, Informations- und Telekommunikation, Transport und Verkehr, Wasser und Siedlungsabfallentsorgung) (vgl. Lauwe et al. 2008: 113).

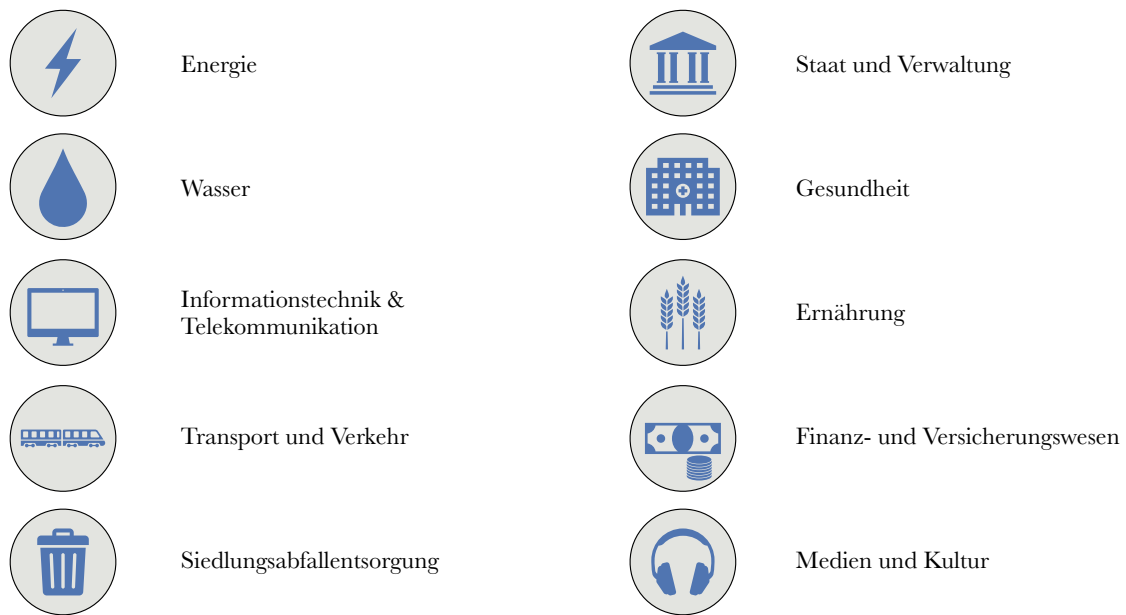


Abbildung 2: KRITIS-Sektoren in Deutschland

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf BBK 2023a

Bundesländer haben hierbei allerdings die Möglichkeit, von dieser Sektoreinteilung abzuweichen. Hessen vollzieht dies bspw. im Falle des Sektors Sozialwesen, welcher zusätzlich als KRITIS-Sektor definiert wird und zu welchem mitunter Bildungs- und Betreuungseinrichtungen zählen. Allerdings ist diese Aufschlüsselung (Land Hessen 2020) kontextunabhängig und ohne Raumbezug zu verstehen, wodurch keine bindende Definition von KRITIS-Sektoren auf Landesebene identifiziert werden kann.

Während mit dem Aspekt der Bedeutsamkeit bzw. Kritikalität hier die erste oben genannte Facette in Kürze beleuchtet wurde, soll in den folgenden Abschnitten die zweite Facette der BBK-Definition, der Aspekt der Konsequenzen, welche ein Ausfall von Systemelementen hätte, näher betrachtet werden.

2.1.2. Ausfallkonsequenzen und Interdependenzen

Die in Abb. 2 dargestellte und beschriebene Unterteilung in Sektoren und Branchen impliziert zunächst nicht, „dass es sich um separate Systeme handelt“ (Krings 2020: 577). In ihrer Essentialität für die Aufrechterhaltung vitaler Funktionen für eine Gesellschaft können

sie in diesem Zusammenhang als Punkte, Systeme oder Teile eines Systems beschrieben werden (Curt et al. 2018: 2454, vgl. Abb. 3).

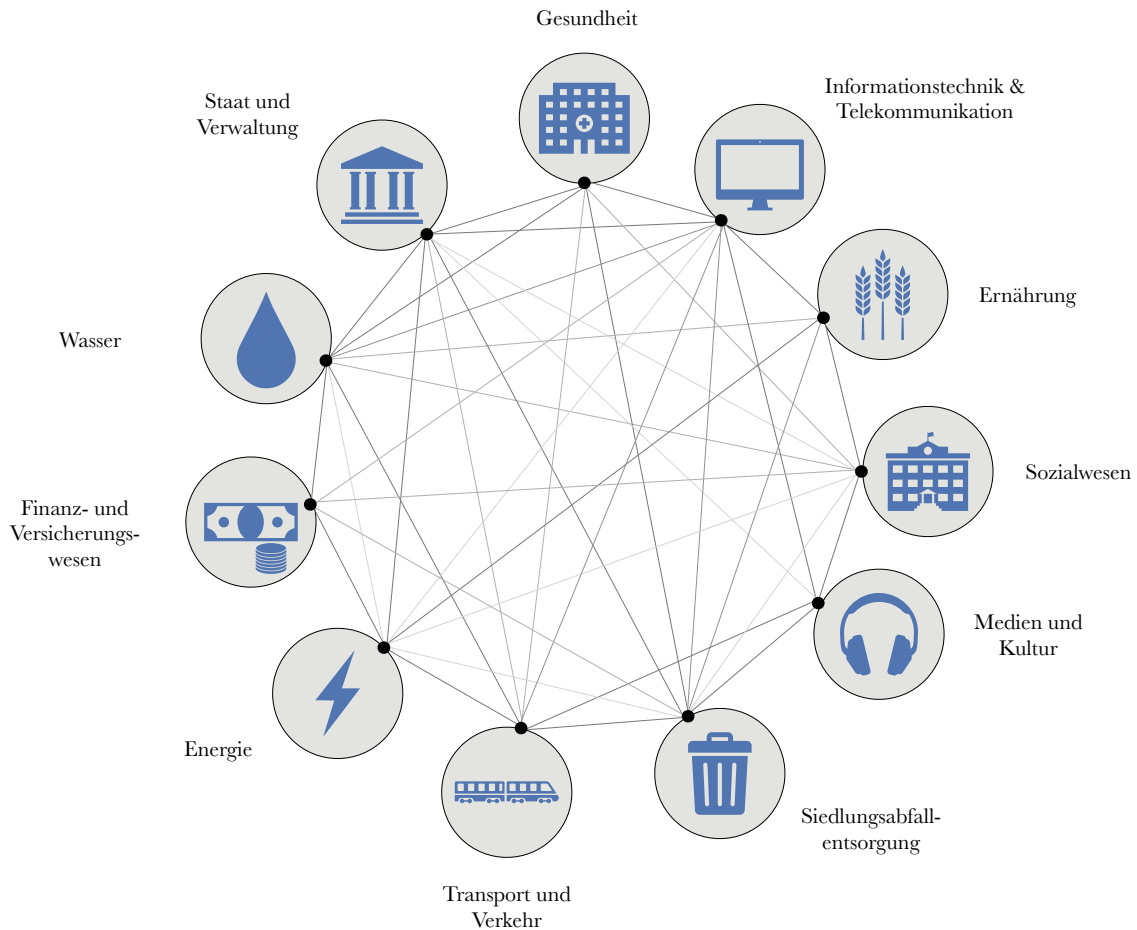


Abbildung 3: KRITIS-Verbindungen zwischen den Sektoren (beispielhaft in Hessen)

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf BBK 2023a, Land Hessen 2020

Curt et al. (2018: 2454) beschreiben KRITIS in diesem Zusammenhang als intrinsisch vulnerabel und betonen die Möglichkeit von KRITIS, dass sie die Vulnerabilität von Regionen akzentuieren, wenn sie ihre Mission nicht mehr erfüllen können (ebd.). Eine Unterbrechung ihrer Funktion kann entsprechend zu einer „disrupt[ion] of societies at different scales: local, national and international“ (ebd.) führen. KRITIS sind daher anfällig für Bedrohungen und mögliche Störquellen, aber für den Wiederaufbau wiederum unverzichtbar (Curt et al. 2018: 2442). Entsprechend zeigt sich das Erkennen der Bedeutsamkeit von KRITIS „wenn

es zu Störungen kommt. Denn sie bilden die Grundlage für das Funktionieren unserer Gesellschaft“ (BBK 2023a)“.

Störungen werden im Folgenden in Kürze zweiseitig behandelt, zum einen i. S. d. Gefährdungsquellen, welche in Störungen resultieren können, zum anderen im Sinne einer Beschreibung der Grundstruktur des KRITIS-Systems in seiner Rolle auf die Konsequenzen einer etwaigen Störung.

In komplexen, voneinander abhängigen Systemen sind auch bestimmte Ausfallpfade und damit Kaskadeneffekte mit hoher Komplexität gekennzeichnet, sodass sie untersucht werden müssen, ohne sich zu sehr auf die Besonderheiten der jeweiligen Gefahr zu konzentrieren (Fekete 2019: 9). Dieser Aspekt führt zu einer noch umfassenderen Einbeziehung verschiedener Gefahren- und Bedrohungsarten, mitunter als All-Gefahren-Ansatz bezeichnet, bei dem vom Menschen verursachte und natürliche Gefahren integriert werden (ebd.).

Einen All-Gefahren-Ansatz verfolgt hierbei auch das BBK, in welchem sowohl natürliche (Auswirkungen des Klimawandels, Erdbeben, Epidemien), als auch anthropogene Gefahren (z. B. Unfällen, Terrorismus, Kriege) subsumiert werden (vgl. Tab. 1).

Natürliche Gefahren	Anthropogene Gefahren
• Stürme, Tornados • Starkniederschläge, Hochwasser • Dürren • Erdbeben • Epidemien, Pandemien	• Unfälle • Systemversagen • Sabotage, Schadprogramme • Terrorismus • Krieg

Tabelle 1: KRITIS-betreffende anthropogene und natürliche Gefahren

Quelle: BBK 2023b, leicht modifiziert

Angemerkt werden muss allerdings, dass es aufgrund der KRITIS auszeichnenden Komplexität nahezu unmöglich ist, sie allumfassend und vollständig vor solchen Gefahren zu schützen (Curt et al. 2018: 2441) und gleichzeitig der „Zusammenhang zwischen immer selteneren Ausfällen und immer schwerwiegenderen Folgen“, bezeichnet als „Verletzlichkeitsparadoxon“ (BMI 2009: 8), Bestand hat. Verletzlichkeit, bzw. im Englischen „vulnerabi-

lity“, kann im KRITIS - Zusammenhang entlang der Definition von Zio (2016: 106) als globale technische Eigenschaft und als Fehler oder Schwäche im Design, Umsetzung, dem Betrieb und/oder der Verwaltung eines Infrastruktursystems oder seiner Elemente interpretiert werden, welche es anfällig für Zerstörung oder Funktionsunfähigkeit macht, wenn es einer Gefahr oder Bedrohung ausgesetzt ist oder seine Fähigkeit zur Wiederherstellung neuer stabiler Bedingungen verringert.

Der Fokus dieser Dissertation liegt hierbei auf dem Zugang räumlicher Planung zum Schutz von KRITIS primär vor den Folgen des Klimawandels als natürliche Gefahren.

Der Multidimensionalität von Gefährdungskomplexen steht somit die Komplexität des KRITIS-Systems gegenüber, welches durch die Facette der das KRITIS-System strukturierenden Interdependenzen beschrieben werden kann. Komplexität manifestiert sich durch das KRITIS-Gesamtsystem als „dynamisches Wirkungsgefüge, in dem sich die einzelnen Subsysteme aufgrund ihrer Vernetzung untereinander prägen und teilweise gegenseitig bedingen“ (Schmitt 2020: 50).

Durch diese gegenseitigen Verbindungen oder Interdependenzen entsteht ein System miteinander verbundener Infrastrukturen (Laugé et al. 2015: 16). Entsprechend kommt es durch die gegenseitigen Verbindungen zwischen KRITIS auch zu Abhängigkeiten einzelner Komponenten der Infrastrukturen. Wenn so beispielsweise ein Teil der Energie-Infrastruktur aufgrund eines Hochwasserereignisses ausfällt, kann es dazu führen, dass aufgrund gegenseitiger Abhängigkeiten auch ein Krankenhaus, aufgrund von Stromausfällen als Teil der Gesundheitsinfrastruktur potenzielle Ausfälle innerhalb des Betriebs zu verzeichnen hat. Solche „Kaskadeneffekte“ bzw. kaskadierende Ausfälle treten somit in diesem Kontext auf, wenn eine Störung in einer Infrastruktur eine oder mehrere Komponenten einer anderen Infrastruktur beeinflusst, was wiederum zur teilweisen oder vollständigen Nichtverfügbarkeit der zweiten Infrastruktur führt (Kotzanikolaou et al. 2013: 172). Aufgrund der hoch-skalierbaren Interkonnektivität des Netzwerks von Infrastrukturen (Fekete 2019: 2) können sich die Auswirkungen von Kaskaden hierbei über die Eingrenzungen von bspw. Flutereignissen, oder auch Hochwassereinzugsgebieten ausdehnen.

Interdependenzen stellen somit „endogene Störungspotentiale“ (Folkers 2018: 162) innerhalb vernetzter Infrastruktursysteme dar. Als mögliche Ausbreitungspfade für die Folgen von Störungen gelten sie entsprechend als zentraler Verwundbarkeitsfaktor innerhalb des KRITIS-Systems (Krings 2020: 578). Folkers beschreibt derartige vitale Systeme als „in ei-

nem doppelten Sinne kritisch“ (Folkers 2018: 162): Zum einen aufgrund ihrer entscheidenden Bedeutung für ein Funktionieren der Gesellschaft, zum anderen aufgrund „ihrer hohen Komplexität aber auch krisenanfällig und damit in einem potenziell kritischen Zustand“ (ebd.). Fekete (2024: 352) erfasst diese Dichotomie in der Bedeutung der Terminologie *kritisch*, zum einen als Aspekt der Bedeutsamkeit, zum anderen als Aspekt der Gefährlichkeit.

Wenn es somit durch im Rahmen der systemischen Vernetzung von KRITIS zu einer Beeinträchtigung oder einem Funktionsausfall kommt, kann dies dazu führen, dass durch die Abhängigkeiten der Subsysteme von Infrastrukturen untereinander solche kaskadenartigen Ausbreitungen Beeinträchtigungen oder Funktionsausfälle ermöglicht werden.

Die Vielzahl an Komponenten, welche in verschiedenen Arten und Weisen miteinander, innerhalb des KRITIS-Systems, verbunden sind, führen zu einer Komplexität des KRITIS-Systems. Diese systemische Komplexität der Interdependenzen kann zu einer chronischen Unterschätzung möglicher Kaskadeneffekte und somit mitunter auch zu unvollständigen und potenziell irreführenden Politiken führen (Kruse et al. 2021: 6). Interdependenzen zwischen Infrastrukturen erhöhen somit auch grundsätzlich die allgemeine Komplexität des „system of systems“ (Rinaldi et al. 2002: 14).

Ein System-of-Systems besteht aus mehreren heterogenen, verteilten, gelegentlich unabhängig voneinander operierenden Systemen, die in Netzwerke auf mehreren Ebenen eingebettet sind und sich im Laufe der Zeit weiterentwickeln (deLaurentis 2007: 263). Die Komplexität eines SoS ergibt sich vor allem aus der Heterogenität seiner Bestandteile, der dynamischen und unsicheren Konnektivität, die durch den Betrieb auf mehreren Ebenen entsteht, und der Rolle der Menschen, welche „Selbstorganisation“ und unterschiedliche Perspektiven auf die operative Verbindung innerhalb eines SoS einbringen (DeLaurentis 2007: 367). Weitergehend besteht das SoS strukturell wie beschrieben aus den zahlreichen Interaktionen, Verbindungen und Interdependenzen innerhalb der Systeme (Varianou Mikkellidou et al. 2017: 1). Auch Städte im weiteren Sinne können als komplexe „systems of infrastructure systems“ verstanden werden, „characterised by various interfaces and a tight coupling between individual infrastructure domains“ (Monstadt et al. 2019: 2355).

Abbildung 4 enthält zur Visualisierung des KRITIS SoS einen allgemein - gehaltenen Überblick über die Modellarchitektur des KRITIS-Systems in Bezug auf die hessischen KRITIS-Sektoren. Zur Modellierung erstellten Eusgeld et al. (2011: 681) einen Modellierungsansatz, bestehend aus drei Ebenen. Die drei Ebenen setzen sich hierbei aus der unteren

ren Ebene, der Systemmodelle einzelner Infrastrukturen, der mittleren Ebene als „Interaktionsmodell zwischen einzelnen Systemen“ des lokales System-von-Systemen, sowie der hohen Ebene, welche das globale System-von-Systemen Modell repräsentiert, zusammen. Auf der mittleren Ebene werden auf Abbildung 4 die elf hessischen KRITIS-Sektoren dargestellt. Erkennbar ist weitergehend die Darstellung der Interdependenzen zwischen KRITIS auf und zwischen den verschiedenen Ebenen.

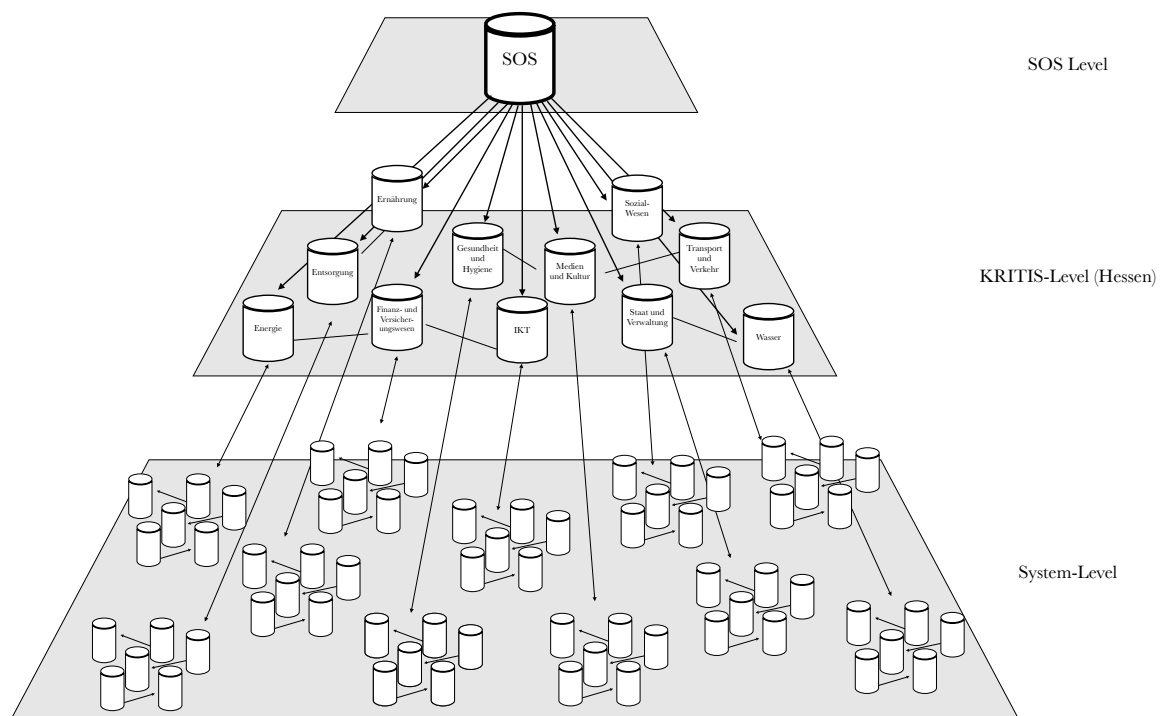


Abbildung 4: Allgemeine Modellarchitektur des KRITIS Systems in Hessen

Quelle: Eigene Darstellung, Modellierung nach Eusgeld et al. 2011: 682

Verbindungen innerhalb des Systems kreieren somit ein komplexes Netz, das, je nach Art seiner Verknüpfungen, Schocks über weite Teile einer Volkswirtschaft und über mehrere Infrastrukturen hinweg übertragen kann (Rinaldi et al. 2002: 14).

Rinaldi et al. (2002: 14-16) beschreiben in diesem Kontext vier Arten der Interdependenzen: Physische-, cyber-, geographische- und logische Interdependenz. Bei physischer Interdependenz hängt der Zustand der einzelnen Infrastruktur von der/den materiellen Leistung(en) einer anderen Infrastruktur ab. Im Kontext der Cyber-Interdependenz hängt der

Zustand einer Infrastruktur von Informationen ab, welche über die Informationsinfrastruktur übertragen werden. Wenn ein lokales Umweltereignis Zustandsänderungen in allen Infrastrukturen in einer bestimmten Umgebung verursacht, handelt es sich laut den Autoren um eine geographische Interdependenz und eine logische Interdependenz tritt dann auf, wenn der Zustand einer Infrastruktur vom Zustand der anderen über einen Mechanismus abhängt, bei dem es sich nicht um eine physische, cybertechnische oder geografische Verbindung handelt (menschlicher Faktor). Das "Verhalten" einer bestimmten Infrastruktur isoliert von ihrer Umwelt oder dem Zusammenhang anderer Infrastrukturen zu analysieren oder zu verstehen, wird durch die Autoren entsprechend als unmöglich beschrieben.

Da somit die Multidimensionalität der Gefährdungsquellen ein komplexes und interdependentes KRITIS-System beeinflusst, besteht die Notwendigkeit die Resilienz von KRITIS als weitere Facette nähergehend zu betrachten.

2.1.3. Resilienz

Holling (1973: 17) beschreibt Resilienz einem sozial-ökologischen Systemansatz folgend, als „die Bestimmung der Beständigkeit von Beziehungen innerhalb eines Systems und als Maß für die Fähigkeit dieser Systeme, Veränderungen von Zustandsvariablen, treibenden Variablen und Parametern zu absorbieren und dennoch bestehen zu bleiben“. Weiterführend definiert er Resilienz als „Maß für die Beständigkeit von Systemen und ihre Fähigkeit, Veränderungen und Störungen zu absorbieren und dennoch die gleichen Beziehungen zwischen Populationen oder Zustandsvariablen aufrechtzuerhalten“ (Holling 1973: 14). In ihrem Fokus auf Katastrophenvorsorge definiert die UNDRR Resilienz darüber hinaus als „die Fähigkeit eines Systems, einer Gemeinschaft oder einer Gesellschaft, die Gefahren ausgesetzt sind, den Auswirkungen einer Gefahr rechtzeitig und effizient zu widerstehen, sie zu absorbieren, sich ihnen anzupassen, sich zu transformieren und sich von ihnen zu erholen, einschließlich durch die Erhaltung und Wiederherstellung ihrer wesentlichen Grundstrukturen und Funktionen durch Risikomanagement“ (UNDRR 2017).

In Anbetracht der unterschiedlichen Auswirkungen von Ereignissen, wobei „einige Ausfälle Einzelfälle bleiben und schnell behoben werden können, andere jedoch Kaskadeneffekte auslösen und großen Schaden anrichten“ (Boin et al. 2007: 51), kann die Förderung der Resilienz „die administrativen und gesellschaftlichen Kapazitäten zur Bewältigung solcher

Situationen verbessern“ (Boin et al. 2007: 54). Darüber hinaus betont der Autor „das allgemeine Bewusstsein, dass eine Katastrophe eintreten, und normale Regierungsfunktionen und kritische Infrastrukturen lahmlegen kann. Wenn eine Mentalität herrscht, 'nach der so etwas hier nicht passieren kann', muss diese in Frage gestellt werden“ (Boin et al. 2007: 54). Dieser Aspekt wird zunehmend deutlicher, wenn man die Folgen von multiplen Ausfällen betrachtet, die als „mehr oder weniger gleichzeitiger Ausfall mehrerer Infrastrukturen“ (Boin et al. 2007: 51) beschrieben werden, wie es bspw. beim Hurrikan Katrina im Jahr 2005 der Fall war.

Curt et al. (2018: 2441) beziehen sich bei Resilienz auf die Fähigkeit, „lebenswichtige gesellschaftliche Funktionen und damit Infrastrukturen so schnell wie möglich wiederherzustellen oder anzupassen“. Im Rahmen einer Analyse aktueller Ansätze zur Bewertung und Steuerung der Resilienz von KRITIS (Curt et al. 2018: 2443) identifizieren die AutorInnen vier Schlüsselbereiche, welche die Resilienz von KRITIS charakterisieren (Curt et al. 2018: 2445):

- a) Managementphasen, die sich auf den Zeitpunkt im Verhältnis zu einem Störereignis konzentrieren und die Phasen ex ante (Planung und Vorbereitung), während des Ereignisses (Absorption des Schocks) und ex post (Wiederherstellung und Anpassung) umfassen (Curt et al. 2018: 2445, Petit et al. 2013: 52).
- b) Managementkomponenten, die aus Antizipation (Vorhersage von Ereignissen), Überwachung/Erkennung (Identifizierung von Vorzeichen), Kontrolle (Umsetzung von Wiederherstellungsmaßnahmen auf der Grundlage vordefinierter Indikatoren) und Rückmeldung aus Erfahrungen (Lernen aus vergangenen Ereignissen zur Verbesserung der zukünftigen Leistung) bestehen (Curt et al. 2018: 2446, Park et al. 2013: 361)
- c) Bereiche, welche die Studie wie folgt ausdifferenziert: Der Technische (der sich auf die Leistungsfähigkeit und die Verbindungen physischer Systeme bezieht), der Organisatorische (der sich auf die Fähigkeit von Organisationen konzentriert, in Krisenzeiten Entscheidungen zu treffen und wichtige Funktionen aufrechtzu-erhalten), der Menschliche (der sich auf menschliches Verhalten und Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen auf Gemeinden und Regierungsbehörden bezieht) und der Wirtschaftliche (der die Fähigkeit umfasst, finanzielle Verluste zu reduzieren und Ressourcen effektiv zuzuweisen) (Curt et al. 2018: 2447, Bruneau et al. 2003: 738, Labaka et al. 2016: 24).

- d) Finalitäten und Ressourcen, die zwischen den Zielen der Resilienz und den Mitteln zu ihrer Erreichung unterscheiden. Finalitäten beziehen sich dabei auf Robustheit als die Fähigkeit, Belastungen standzuhalten, ohne ihre Funktion zu verlieren, und Schnelligkeit als die Geschwindigkeit der Erholung, während Ressourcen sich auf Redundanz als die Fähigkeit, Elemente zu ersetzen, und Einfallsreichtum ("resourcefulness") als die Fähigkeit, Probleme zu erkennen und Ressourcen zu mobilisieren, beziehen (Bruneau et al. 2003: 737-738, Curt et al. 2018: 2446) und Schutz („protectiveness“) als fünftes Element, das von den AutorInnen hinzugefügt wurde und sich auf die Fähigkeit externer Strukturen wie Deiche oder Firewalls bezieht, das System zu schützen (Curt et al. 2018: 2447).

Den AutorInnen zufolge sollten diese vier Dimensionen dabei ganzheitlich betrachtet werden, wobei verschiedene Gefahren unter Berücksichtigung mehrerer Bereiche, räumlicher Aspekte und multiskaliger Auswirkungen zu berücksichtigen sind, verschiedene Phasen des Resilienzmanagements zu beachten sind und die Rolle der Dynamik und des Echtzeitmanagements „sehr heterogener und potenziell unvollständiger Informationen aus vielen ungleich zuverlässigen Quellen“ zu integrieren ist (Curt et al. 2018: 2454).

Während Arbeit bezogen auf KRITIS ursächlich aus einer Schutz- und technischen Perspektive stammt, können moderne Ansätze zur Resilienz von KRITIS, nach Fekete (2019: 3), auch eine komplexe (adaptive) System-Perspektive einnehmen. Darüber hinaus umfasst ein ganzheitliches Verständnis von Resilienz nicht nur das Konzept des „Bouncing Back“, sondern auch das des „Bouncing Forward“ und andere Stabilitätsregime (Fekete 2019: 3). Je nach Art und Schwere einer etwaigen Störung, „kann ein resilientes System aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit den Status quo erhalten oder aufgrund seiner Anpassungsfähigkeit auf einen neuen funktionsfähigen Zustand hin weiterentwickelt werden“ (Groth et al. 2023: 298), obwohl eine Hürde darin besteht, dass Investitionen in eine höhere Infrastrukturresilienz oftmals als unrentabel beschrieben werden und daher unattraktiv erscheinen (Monstadt et al. 2019: 2364).

Gerade auch die in Punkt d) angerissenen Redundanzen, als „das mehrfache Vorhandensein von Strukturen zur Erbringung derselben Leistung“ (Lenz 2009: 58) gelten im KRITIS - Schutz als wichtiger Faktor für die Bewältigung von Extremereignissen. Wenn es entsprechend gelingt, über redundante Strukturen ganzheitliche oder auch teilweise Ausfälle einzelner Infrastrukturelemente zu kompensieren, können Verfügbarkeiten kritischer Dienstleistungen entsprechend zumindest eingeschränkt, oder auch für einen gewissen Zeitraum,

aufrechterhalten werden (Krings 2020: 587-588, Birkmann et al. 2010: 74-75). In Reflexion dessen, dass Abhängigkeiten durch eine stetig wachsende Anzahl von Kopplungen zwischen Teilsystemen verschiedener Sektoren das Potenzial haben, neue bzw. bislang wenig betrachtete Kaskadeneffekte zu erzeugen, wird hier das Beispiel analoger Telefonleitungen angesprochen, die „zunehmend nicht mehr zur Verfügung stehen“ (Groth et al. 2023: 304). In diesem Zusammenhang betonen die AutorInnen, dass ein „gezielter Ausbau von Kapazitäten im Sinne von Kompetenzen und Redundanzen in den technischen und nichttechnischen Teilen der Infrastruktursysteme dringend geboten“ (ebd.: 305) ist. Redundante Strukturen können hierbei nach Krings (2020: 588) als Ressource verstanden werden, was „durchaus eine Neubewertung des vorgefundenen Infrastrukturbestands oder von Planungsalternativen nach sich ziehen [könnte]“.

2.1.4. KRITIS vor dem Hintergrund der Gesetzgebung

Während im deutschen Kontext kein übergreifendes Gesetz zum KRITIS-Schutz besteht, wird jener Schutz insbesondere durch Fachgesetze forciert (BBK 2023c). Begonnen mit Gesetzgebung, welche den Schutz von KRITIS insbesondere im Rahmen der Sicherheit in der Informationstechnik berücksichtigte (2015), verfolgt die Bundesregierung derzeit im Rahmen des KRITIS-Dachgesetzes das Ziel, Standards für den Schutz von KRITIS sektorenübergreifend festzulegen und somit zu harmonisieren.

Bezugspunkte zu KRITIS finden sich sowohl auf EU - als auch in der deutschen Gesetzgebung, die wesentlichen Aspekte sollen hier kurz dargestellt werden und finden in Tab. 2 eine Übersicht.

Die Richtlinie 2008/114/EG des Europäischen Rates vom 08.12.2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern, bildete auf europäischer Ebene einen ersten Schritt in einem „abgestuften Ansatz zur Ermittlung und Ausweisung von EKI und der Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern“ (Nr. 5). Die Richtlinie fokussiert sich hierbei zunächst auf die Sektoren Energie und Verkehr, mit dem Zusatz, dass eine Überprüfung der Richtlinie auch die Inklusion weiterer Sektoren bewirken könnte. Grundsätzliches Ziel der Richtlinie war es somit, ein Verfahren zur Ermittlung und Auswirkung von EKI, „als auch ein gemeinsamer Ansatz für die Bewertung der Notwendigkeit eines besseren Schutzes

derartiger Infrastrukturen [einzuführen], um zum Schutz der Menschen beizutragen“ (RL 2008/114/EG, Art. 1). Im Rahmen der Richtlinie wurde weiterhin ein Verfahren entwickelt, nach welchem jeder Mitgliedstaat potentielle EKI, „die sowohl die sektorübergreifenden als auch die sektorspezifischen Kriterien erfüllen“ (RL 2008/114/EG, Art. 3) ermitteln soll. EKIs werden hierbei definiert als „eine in einem Mitgliedstaat gelegene kritische Infrastruktur, deren Störung oder Zerstörung erhebliche Auswirkungen in mindestens zwei Mitgliedstaaten hätte“ (RL 2008/114/EG, Art. 2, Bst. b).

In der Novellierung des Raumordnungsgesetzes 2008 wurden KRITIS durch den Gesetzgeber als Grundsatz („*Dem Schutz kritischer Infrastrukturen ist Rechnung zu tragen*“ §2 Abs. 2 Nr. 3 S. 4 ROG 2008) in das ROG eingeführt.

Ein Jahr später, am 17.06.2009 folgte die nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen („KRITIS-Strategie“), mit dem Ziel, Zielvorstellungen und den politisch-strategischen Ansatz des Bundes hinsichtlich des Schutzes von KRITIS zusammenzufassen. Ein besonderer Schwerpunkt wird hierbei auf die „kooperative Zusammenarbeit zwischen Staat und Wirtschaft beim Schutz kritischer Infrastrukturen“ (Strauß 2015: 351) gelegt. Im Rahmen der KRITIS-Strategie selbst wird diese Zusammenarbeit als partnerschaftliche Kooperation des Staates mit anderen öffentlichen und privaten Akteuren „bei der Erarbeitung von Analysen und Schutzkonzeptionen“ (BMI 2009: 2) beschrieben. Der Staat an sich steuert in diesem Kontext „primär moderierend, nötigenfalls normierend, die Maßnahme zur Sicherung und zur Sicherstellung des Gesamtsystems sowie der Systemabläufe“ (BMI 2009: 2).

Um einen einheitlichen Rechtsrahmen zur Zusammenarbeit von Staat und Unternehmen im Rahmen der Cybersicherheit von KRITIS herzustellen, wurde im Juli 2015 das Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme, oder auch IT-Sicherheitsgesetz verabschiedet und dadurch das BSI-Gesetz geändert. Ziel war hierbei die Erstellung eines einheitlichen Rechtsrahmens zur Zusammenarbeit von Staat und Unternehmen im Rahmen der Cybersicherheit von KRITIS. Außerdem wurden die Befugnisse des BSI erweitert und die Sektoren Energie, IKT Transport/Verkehr, Gesundheit, Wasser, Ernährung, sowie Finanz- und Versicherungswesen als KRITIS-Sektoren definiert (Art. 1 Nr. 2 IT-Sicherheitsgesetz). Das Gesetz wurde im „IT-Sicherheitsgesetz 2.0“ zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme im Mai 2021 ergänzt, wobei das BSI als Cyber-Sicherheitsbehörde neue Kompetenzen erhielt.

Es folgte die Verordnung zur Bestimmung kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz („BSI-KritisV“) als Begleitung des BSI-Gesetzes und als Instrument zur rechtsverbindlichen Identifizierung von KRITIS. Sie enthält Festlegungen zur Begriffsbestimmung von Anlagen, Betreibern, kritischen Dienstleistungen, Versorgungsgraden und Schwellenwerten, sowie Festlegungen für einzelne KRITIS-Sektoren, welche im IT-Sicherheitsgesetz als solche definiert wurden (BSI 2025).

Auf EU-Ebene wurde im darauf folgenden Jahr, im Juli 2016, die Richtlinie über Maßnahmen zur Gewährleistung eines hohen gemeinsamen Sicherheitsniveaus von Netz- und Informationssystemen in der Union (RL 2016/1148), die „NIS-Richtlinie“, beschlossen. Sie verfolgt das Ziel, Netzwerk- und Informationssysteme in der EU vor IT- und Cyber-Gefahren zu schützen und schafft einen einheitlichen Rechtsrahmen für den Aufbau nationaler Kapazitäten zur Cybersicherheit. Sie fördert die Zusammenarbeit der Mitgliedstaaten und setzt Mindestsicherheitsanforderungen sowie Meldepflichten für KRITIS-Betreiber und bestimmte digitale Diensteanbieter fest (RL 2016/1148, Art. 1, Nr. 2, Bst. d). Zudem werden zentrale Meldestellen durch EU-Mitgliedsstaaten eingerichtet, um eine EU - weite Vernetzung und Vorfallmeldung zu ermöglichen. Die Richtlinie wurde im Dezember 2022 durch die „NIS-2-Richtlinie“ aufgehoben, mit dem Ziel, eine Richtlinie über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union herzustellen. Sie zielt darauf ab, Unterschiede zwischen den Mitgliedsstaaten aufgrund unterschiedlicher Rechtsgrundlagen zu beseitigen, indem Mindestvorschriften für einen koordinierten Rechtsrahmen festgelegt, Mechanismen für die Zusammenarbeit der Behörden geschaffen, die Liste der Sektoren und Tätigkeiten mit Cybersicherheitspflichten aktualisiert und wirksame Abhilfemaßnahmen und Durchsetzungsmaßnahmen eingeführt werden (RL 2022/2555, Nr. 5). Die NIS-Richtlinie soll daher durch die NIS-2-Richtlinie ersetzt werden.

Jüngste Richtlinie auf EU-Ebene ist die Richtlinie über die Resilienz kritischer Einrichtungen („CER-Richtlinie“, RL 2022/2557) mit dem Ziel, die Fähigkeit kritischer Einrichtungen klarer zu definieren und EU-Vorschriften zur Verbesserung der Resilienz kritischer Infrastrukturen zu erlassen. Ziel ist es weiterhin, die Fähigkeit dieser Einrichtungen zu stärken, Sicherheitsvorfälle zu verhindern, zu bewältigen und sich davon zu erholen.

Zum Zeitpunkt der Dissertation hat der deutsche Bundestag bisher den Entwurf eines KRITIS-Dachgesetzes beschlossen (Stand: 17.03.2026), welcher die CER-Richtlinie in nationales Recht umsetzt.

Tabelle 2 enthält hierfür zur Übersicht eine tabellarische Aufschlüsselung wesentlicher Rechtsvorschriften auf EU- und nationaler Ebene mit Bezugspunkten zu kritischer Infrastruktur.

Datum	Rechtsvorschrift	Ebene
08.12.2008	Richtlinie über die Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern (RL 2008/114/EG) „EPSKI-Richtlinie“	
22.12.2008	Änderung des Raumordnungsgesetzes	
17.06.2009	Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen „KRITIS-Strategie“	
17.07.2015	Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme „IT-Sicherheitsgesetz“	
22.04.2016	Verordnung zur Bestimmung kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-KritisV) „BSI-Kritisverordnung“	
06.07.2016	Richtlinie über Maßnahmen zur Gewährleistung eines hohen gemeinsamen Sicherheitsniveaus von Netz- und Informationssystemen in der Union (RL 2016/1148) „NIS-Richtlinie“	
18.05.2021	Zweites Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme „IT-Sicherheitsgesetz 2.0“	
14.12.2022	Richtlinie über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 910/2014 und der Richtlinie (EU) 2018/1972 sowie zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2016/1148) „NIS-2-Richtlinie“	
14.12.2022	Richtlinie über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/14/EG des Rates (RL 2022/2557) „CER-Richtlinie“	
17.03.2026	Dachgesetz zur Stärkung der physischen Resilienz kritischer Anlagen (KRITISDachG) „KRITIS-Dachgesetz“	

Tabelle 2: Übersicht über die zeitliche Abfolge wesentlicher Rechtsvorschriften im KRITIS-Kontext (EU und national)

Quelle: Eigene Darstellung

Entsprechend der Einführung des KRITIS-Grundsatzes in das Raumordnungsgesetz verortet sich der KRITIS-Schutz auch im Aufgabenfeld der Raumplanung, welches im nachfolgenden Unterkapitel hinsichtlich einer begrifflichen Einordnung und der Darstellung der Systematik in Hessen nähergehend beschrieben wird.

2.2. Raumplanung - Begriffliche Einordnung und Systematik insbesondere in Hessen

Zur näheren Einordnung des Felds der Raumplanung sollen im Folgenden die konzeptionellen Grundlagen zur Raumplanung dargelegt werden. Aufgeteilt wird dies zum einen in eine begriffliche Einordnung zur Ausdifferenzierung der Begriffe Raumplanung und -ordnung, der damit zusammenhängenden Terminologien, der Ebene der kommunalen Bauleitplanung und zum anderen in eine Beschreibung der raumplanerischen Systematik in Hessen.

2.2.1. Von Raumplanung zur Bauleitplanung: Begriffliche Einordnung

Während unter dem Begriff Raumplanung eine „zusammenfassende, übergeordnete Planung und Ordnung des Raumes, die vielfältige Fachplanungen zusammenführt und aufeinander abstimmt“ (Schultheis 2011: 4) verstanden werden kann, existiert „weder rechtlich noch wissenschaftlich“ eine eindeutige Definition des Begriffs selbst (Danielzyk et al. 2018: 1932). Die vorliegende Dissertation folgt in diesem Kontext einem Verständnis der Raumplanung als „zusammenfassende, übergeordnete Planung und Ordnung des Raumes, die vielfältige Fachplanungen zusammenführt und aufeinander abstimmt“ (Schultheis 2011: 4). Dabei erfolgt Raumplanung als Mehrebenensystem, bestehend aus Raumordnung, kommunaler Bauleitplanung und raumbedeutsamen Fachplanungen (vgl. Kap. 2.2.2).

Fachliche Nutzungsansprüche sollen dabei „über die Raumplanung in ihren räumlichen Auswirkungen koordiniert werden“ (ebd.). In diesem räumlich-integrierenden Anspruch besteht ein Unterschied zu sektoralen Planungen, wie der Landschaftsrahmen-, Wasserwirtschafts- oder Verkehrsplanung (ebd.). Territorial gebunden muss die Raumplanung „alle Raumnutzungen eines Gebietes koordinieren“ (Fürst 2010: 39) und wird daher auf allen föderalen Ebenen institutionalisiert (ebd.).

Der Begriff der Raumordnung, bzw. ihre Aufgabe wird in §1 Abs. 1 ROG normiert, insofern, als dass der bundesrepublikanische Gesamtraum, sowie seine Teilräume durch Raumordnungspläne, raumordnerische Zusammenarbeit und durch Abstimmung raumbedeutsamer Planungen und Maßnahmen zu entwickeln, zu ordnen und zu sichern sind. Hierbei sind gem. § 1 Abs. 1 Nrn. 1 u. 2 ROG unterschiedliche Anforderungen an den Raum aufeinander abzustimmen, die auf der jeweiligen Planungsebene auftretenden Konflikte auszugleichen, sowie Vorsorge für einzelne Nutzungen und Funktionen des Raums zu treffen. Auf einzelne Elemente dieser Aufgabendefinition der Raumordnung soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

So ist der Begriff der Raumbedeutsamkeit ein Schlüsselbegriff des Raumordnungsrechts (Durner 2018: 1860) und dient dadurch als „Kriterium zur Identifikation jener Maßnahmen und Planungen, die dem Steuerungsanspruch der Raumordnung unterliegen“ (ebd.). Hierbei erstreckt sich die Bindungswirkung der Ziele der Raumordnung nach § 4 Abs. 1 ROG auf die in den Nummern 1-3 näher spezifizierten raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen (ebd.).

Weiterhin findet sich der Begriff der Raumbedeutsamkeit im §3 Abs. 1 Nr. 6 ROG, wobei hier von Raumbedeutsamkeit von Planungen einschließlich der Raumordnungspläne, Vorhaben und sonstigen Maßnahmen gesprochen wird, wenn „Raum in Anspruch genommen oder die räumliche Entwicklung oder Funktion eines Gebietes beeinflusst wird, einschließlich des Einsatzes der hierfür vorgesehenen öffentlichen Finanzmittel“ (Birkmann et al. 2013: 76). Raumbedeutsamkeit ist somit eine durchgängige Voraussetzung für den Einsatz raumordnerischer Instrumentarien und Bindungen (Durner 2018: 1860).

Auch der Klimawandel kann in Verbindung mit dem Aspekt der Raumbedeutsamkeit betrachtet werden, in dem Sinne, als dass "Risiken (...) des Klimawandels [...] dann raumbedeutsam [sind], wenn sie sich auf einen Raum beziehen oder die räumliche Entwicklung oder Funktion eines Gebietes beeinflussen, einschließlich des Einsatzes von Finanzmitteln (Birkmann 2013: 76). Birkmann et al. (2013: 76) geben hierbei ein Beispiel in Form des Bewässerungsbedarfs landwirtschaftlicher Flächen, welcher nicht per se raumbedeutsam ist, „wohingegen dies für die Errichtung neuer Speicherbauwerke zur Bereitstellung der Wassermengen für die Bewässerung sehr wohl der Fall sein kann“. In einer Vorstudie zu den Modellvorhaben zu Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel beschreibt das BMVBS eine raumrelevante Wirkfolge des Klimawandels als räumlich differenziert auftretend und durch räumliche Planung beeinflussbar (BMVBS 2010: 13). Hierbei werden aus-

föhrlicher drei Kriterien für die Raumrelevanz von Klimawandelfolgen eingegrenzt: Es besteht ein räumlich differenziertes Auftreten der Wirkfolge im Gegensatz zu einem ubiquitären Auftreten, „gefährdete Räume sind mit Hilfe von Kriterien abgrenzbar und es sind Instrumente der räumlichen Planung denkbar, die die Eintrittswahrscheinlichkeit oder die Konsequenzen für die Entstehung oder die Wirkungsgebiete unmittelbar beeinflussen können“ (BMVBS 2010: 13). Solche raumrelevanten Folgen des Klimawandels wirken sich daher auf die Inhalte von raumordnerischen Instrumenten aus und „können bzw. sollten mit ihrer Hilfe planerisch bearbeitet werden“ (BMVBS 2010: 13).

Raumbedeutsamkeit in diesem Sinne kann somit auch nach Durner (2018: 1860) als Kurzformel für Maßnahmen gesehen werden, welche eine „Kooperation konfligierender öffentlicher und privater Bodenansprüche und Belange bedürfen“, sowohl durch die Raumordnung als auch auf dem Wege der Abwägung.

Vor dem Hintergrund einer ansteigenden Inanspruchnahme von Boden und Fläche ist die Vorsorge „für einzelne Raumfunktionen und Raumnutzungen durch zusammenfassende, überörtliche und fachübergreifende Raumordnungspläne, durch raumordnerische Zusammenarbeit und durch Abstimmung raumbedeutsamer Planungen und Maßnahmen als zentrale Aufgabe der räumlichen Gesamtplanung im Raumordnungsgesetz (ROG) frühzeitig verankert worden“ (Scholich 2018: 2842). Um diese Anforderungen an räumliche Vorsorge zu konkretisieren, werden unter Berücksichtigung des Gegenstromprinzips auf Länder und insbesondere auf Regionsebene „Ziele und Grundsätze der Raumordnung (...) in beschreibender und zeichnerischer Darstellung festgelegt“ (Scholich 2018: 2842).

Zu zentralen Planelementen zählen hierbei Vorranggebiete (VRG), Vorbehaltsgebiete (VBH) und Eignungsgebiete. In einem VRG, „in welchem eine bestimmte raumbedeutsame Funktion oder Nutzung vorgesehen ist“ (ebd.: 2843), sind andere raumbedeutsame Nutzungen ausgeschlossen, soweit sie mit der „vorrangigen Funktion, Nutzung oder den Zielen der Raumordnung nicht vereinbar sind“ (ebd.: 2843). VRG dienen dabei entweder der „Sicherung standortgebundener Nutzungen oder Funktionen oder deren gezielter Entwicklungen in einem bestimmten Gebiet“ (ebd.: 2843) und haben den Charakter eines Ziels der Raumordnung i.S.d. § 3 Abs. 1 Nr. 2 ROG.

VBH sind derweil „einer bestimmten raumbedeutsamen Funktion oder Nutzung bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Nutzungen besonderes Gewicht beizu-

messen“ (ebd.: 2843) und besitzen den Charakter eines Grundsatzes der Raumordnung i. S. d. § 3 Abs. 1 Nr. 3 ROG.

Während das ROG die Rechtsgrundlage für die deutsche Raumordnung bildet, besteht mit dem Baugesetzbuch (BauGB) die Rechtsgrundlage für das Agieren kommunaler Bauleitplanung. Als unterste Ebene des deutschen Planungssystems geben sich Kommunen, ausgehend aus Art. 28 Abs. 2 GG, „mit der Bauleitplanung als einem Kernstück der kommunalen Selbstverwaltung in eigener Planungshoheit ihr städtebauliches Gesicht und schaffen die Grundlage für Folgeentscheidung zur Nutzung von Grund und Boden in ihrem Hoheitsgebiet“ (Jeromin 2023: 37). § 1 Abs. 2 BauGB unterscheidet hierbei mit dem Flächennutzungsplan (FNP) als vorbereitendem Bauleitplan und dem Bebauungsplan (B-Plan) als verbindlichem Bauleitplan zwei Bauleitpläne voneinander. Diese sollen gemäß § 1 Abs. 5 S. 1 BauGB eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung gewährleisten, welche die „sozialen, wirtschaftlichen und umweltschützenden Anforderungen auch in Verantwortung gegenüber künftigen Generationen miteinander in Einklang bringt“. Gemäß § 1 Abs. 4 BauGB sind sie an die Ziele der Raumordnung anzupassen.

Eines der Kernelemente der Bauleitplanung ist im Verständnis dieser Dissertation die Beitrags-Zielstellung in § 1 Abs. 5 S. 2 BauGB, „eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern“. Zum konzeptionellen Verständnis der Bauleitplanung folgt hierauf eine Einordnung des diesbezüglichen Planverfahrens.

Hierbei sind zunächst vier aufeinander aufbauende Verfahrensschritte voneinander zu unterscheiden (vgl. Abb. 5): Erstens die Vorbereitung des Bauleitplanverfahrens welche die ortsübliche Bekanntmachung des Aufstellungsbeschlusses nach § 2 Abs. 1 BauGB umfasst und zweitens der Vorentwurf zum Bauleitplan. In diesem Schritt wird ein Planentwurf ausgearbeitet, zu welchem nach § 4 Abs. 1 BauGB Behörden und Träger öffentlicher Belange (TöB), als auch nach § 3 Abs. 1 BauGB die Öffentlichkeit frühzeitig am Verfahren beteiligt werden.

Drittens folgt die Entwurfsphase, in welcher nach § 3 Abs. 2 S. 1 BauGB die Auslegung bekanntgemacht wird und der Plan mit Begründung und umweltbezogenen Informationen öffentlich ausgelegt wird. Zudem werden Behörden und sonstige TöB nach § 4 Abs. 2 BauGB beteiligt.

Im Rahmen des vierten Schritts, der Satzung, werden zunächst die eingegangenen Stellungnahmen gemäß § 3 Abs. 2 S. 2 BauGB und § 1 Abs. 7 BauGB geprüft und behandelt, woraufhin bei Bedarf eine erneute öffentliche Auslegung oder ein beschränktes Beteiligungsverfahren anschließt. Daraufhin erfolgt ein Feststellungsbeschluss bei FNP, bzw. ein Satzungsbeschluss bei Bebauungsplänen nach § 10 BauGB. Anschließend wird der FNP nach § 6 Abs. 1 BauGB und der Bebauungsplan nach § 10 Abs. 2 BauGB genehmigt und folgend durch ortsübliche Bekanntmachung der Genehmigung als FNP wirksam, bzw. tritt im Falle von Bebauungsplänen durch ortsübliche Bekanntmachung der Genehmigung oder des Satzungsbeschlusses in Kraft. In Folge dessen werden die Planunterlagen im Internet bereitgestellt.

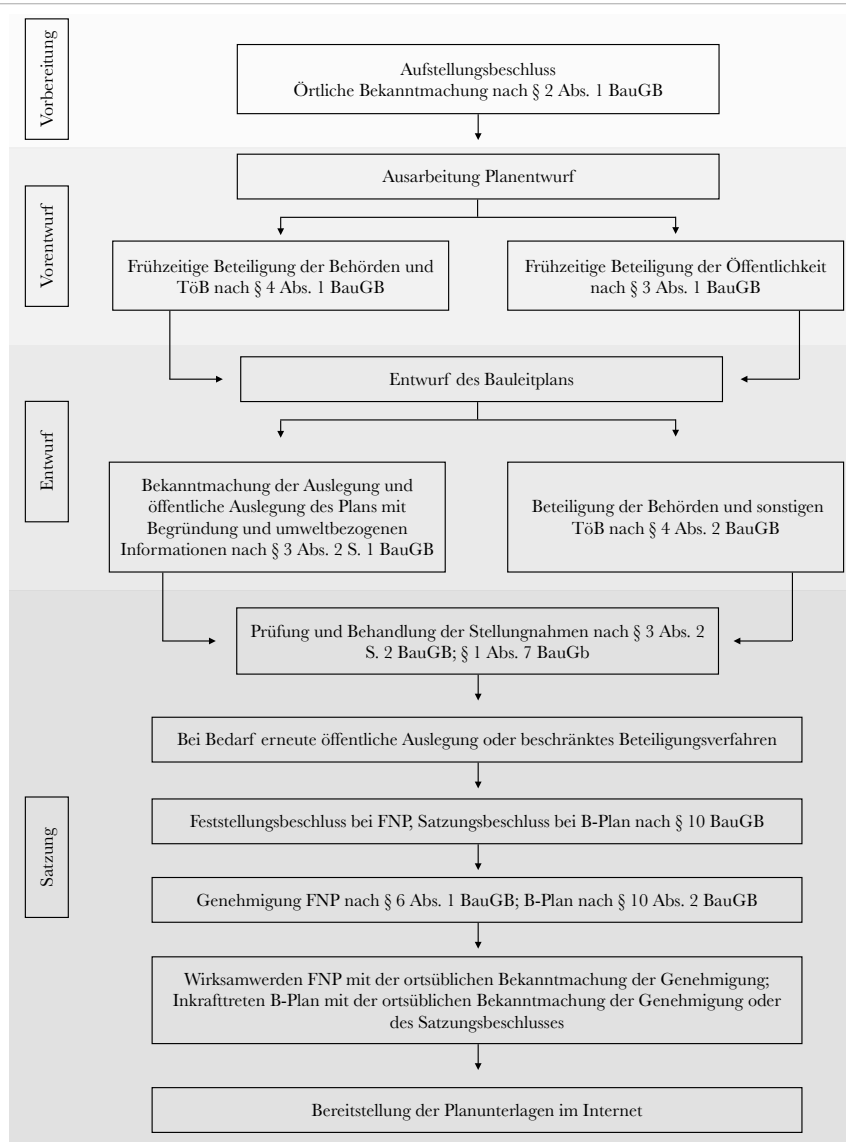


Abbildung 5: Ablauf des Bauleitplanverfahrens

Quelle: Eigene Darstellung nach HMWEVL (2026), Stadtplanungsamt Frankfurt (2026)

Wie auf Abb. 5 im zweiten Schritt zum Entwurf dargestellt, hat die Gemeinde gem. § 2a S. 1 BauGB dem Entwurf des Bauleitplans eine Begründung beizufügen, in welcher gem. § 2a S. 2 Nr. 1 BauGB Ziele, Zwecke und wesentliche Auswirkungen des Bauleitplans und gem. § 2a S. 2 Nr. 2 BauGB in dem Umweltbericht nach der Anlage 1 zum BauGB die auf Grund der Umweltprüfung nach § 2 Abs. 4 BauGB ermittelten und bewerteten Belange des Umweltschutzes dazulegen sind. Neben den Bestandteilen welche in jener Anlage 1 dargelegt sind, ist auch gem. Anlage 1 zum BauGB, Nr. 2, Bstb. B, Doppelbstb. gg eine Prognose über die Entwicklung des Umweltzustands bei Durchführung der Planung anzugeben, wozu unter anderem die „Auswirkungen der geplanten Vorhaben auf das Klima (zum Beispiel Art und Ausmaß der Treibhausgasemissionen) und der Anfälligkeit der geplanten Vorhaben gegenüber den Folgen des Klimawandels“ zuzurechnen sind.

Neben Festsetzungsmöglichkeiten in FNP- bzw. Bebauungsplänen eröffnet parallel mitunter auch der städtebauliche Vertrag nach § 11 BauGB Möglichkeiten zur Vereinbarung von Maßnahmen die mit Klimaschutz in Verbindung stehen: So z. B. gem. § 11 Nr. 4 BauGB, als Gegenstand des Vertrags „entsprechend den mit den städtebaulichen Planungen und Maßnahmen verfolgten Zielen und Zwecken die Errichtung und Nutzung von Anlagen und Einrichtungen zur dezentralen und zentralen Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung“.

Zusätzlich besteht auch mit § 1a Abs. 5 BauGB eine ergänzende Vorschrift zum Umweltschutz, als dass den Erfordernissen des Klimaschutzes sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen wird. Der Grundsatz ist hierbei in der Abwägung nach § 1 Abs. 7 BauGB zu berücksichtigen.

Damit verbunden ist im weiteren Sinne der Begriff des „Climate Proofing“, der von Birkmann et al. wie folgt definiert wird: „Unter „Climate Proofing“ sind Methoden, Instrumente und Verfahren zu verstehen, die absichern, dass Pläne, Programme und Strategien sowie damit verbundene Investitionen gegenüber den aktuellen und zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels resilient und anpassungsfähig gemacht werden, und die zudem auch darauf abzielen, dass die entsprechenden Pläne, Programme und Strategien dem Ziel des Klimaschutzes Rechnung tragen“ (Birkmann et al. 2009: 118).

Somit ergibt sich durch die erwähnte Begriffsdefinition des Climate Proofings von Birkmann et al. (2009) sowie durch die benannten Normen im BauGB eine doppelte Perspektive auf Planverfahren. In der bisherigen Forschung wird dieser doppelte Schutzcharakter jedoch nur indirekt bzw. mit Fokussierung auf den Bereich der Klimaanpassung betrachtet.

Huber et al. (2021) führten so bspw. eine Analyse zum Integrationsstand klimaanpassungsrelevanter Maßnahmen in FNP und B-Plänen zehn mittelgroßer deutscher Städte durch. Die Autorinnen identifizierten hierbei sechs Handlungsfelder (Bauwesen, Grün- und Freiflächen, Infrastruktur, Biodiversität und Naturschutz, Wasserwirtschaft, sowie Risikovorsorge bei Naturkatastrophen) (Huber et al. 2021: 506), welche jeweils verschiedene Anpassungsmaßnahmen clustern. Erkenntnisse der inhaltsanalytischen Betrachtung der identifizierten Pläne ergaben hierbei zum Einen, dass ein Bezug auf Hitze in 70% der FNP's, jedoch nur in 30% der B-Pläne und ein Starkregenbezug in 50% der FNP's und 40% der B-Pläne hergestellt wird (ebd.: 509-510). Zum anderen kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass in „fünf von sechs Handlungsfeldern deutlich mehr Maßnahmen auf der Ebene der Flächennutzungspläne notiert sind, als die aus der Ebene der Bebauungspläne der Fall ist. Hiervon betroffen sind die Handlungsfelder Grün- und Freiflächen, Infrastruktur, Biodiversität und Naturschutz, Wasserwirtschaft und Risikovorsorge bei Naturkatastrophen. Lediglich das Handlungsfeld Bauwesen wird stärker auf der Ebene der Bebauungspläne berücksichtigt“ (ebd.: 510-511). Die Analyse verdeutlicht für beide Ebenen dabei ein grundsätzliches Verbesserungspotenzial für die Integration von Klimaanpassung (ebd.: 511).

Unter dem Begriff des „Place-Based Climate Proofing“ führten Schwappach et al. (2023) eine Analyse von Gewerbe- und Industriegebieten durch und untersuchten anhand von drei Fallbeispielen deren Anpassung an den Klimawandel. Erkenntnisse der Studie inkludieren mitunter ortspezifische Maßnahmen, wie Implementationen von Dach- und Fassadenbegrünungen in zukünftigen Planungen (ebd.: 174), sowie auch die Entwicklung von allgemeinen Standards für Gewerbe- und Industriegebiete, wie die Verpflichtung zur Nutzung nachhaltiger Baumaterialien (ebd.: 180). Die zweite Perspektive, Auswirkungen der jeweiligen Planverfahren auf das Klima, wird jedoch nicht nähergehend beleuchtet.

Möglichkeiten zur Anwendung von Klimaanpassungs- und Schutzmaßnahmen sind zusammenfassend somit im BauGB selbst, als auch in Anlage 1 des BauGB zum Umweltbericht normativ verankert, die tatsächliche Umsetzung hängt allerdings von den Ergebnissen der Abwägung gem. § 1 Abs. 7 BauGB und den individuellen Charakteristika der jeweiligen Planverfahren ab. Fortführend wird der Begriff des Climate Proofings nach Kenntnisstand

des Autors dominierend aus Perspektive der Klimaanpassung analysiert, jedoch erfolgt bisher keine synthetisierende Analyse beider Perspektiven die im Begriff vereinheitlicht sind. Aus dieser Logik heraus entwickelt sich die doppelte Schutzperspektive, welche in Kap. 4 auf KRITIS bezogen und in Betrachtung von Rechenzentren als Fallbeispiel nähergehend betrachtet wird.

Im Folgenden erfolgt zunächst eine Einordnung des Raumplanungssystems in Hessen, um eine Grundlage dazu zu erstellen, welche Planungsebenen in Kapiteln drei und vier betrachtet werden.

2.2.2. Das Raumplanungssystem in Hessen

Der Begriff der Planungsebene in § 1 Abs. 1 Nr. 1 ROG spielt zunächst auf das Mehrebenensystem der Raumplanung in der Bundesrepublik an.

Als kurz darzustellende „oberste“ Ebene verfügt die Bundesraumordnung über das Instrument des bundesweiten Raumordnungsplans.

In Bezug auf dessen untere Ebene ist es Angelegenheit der Länder, ihr Land zu „beplanen [...], was in relativ grobem Maßstab geschieht, sodass darauf noch keine Feinsteuerung abzuleiten ist“ (Fürst 2010: 41). Diese wiederum erfolgt über die Regionalebene, welche die Vorgaben des Landes mit denen ihrer Regionen abgleicht und unter Mitwirkung der Kommunen die regionale Raumordnung entwickelt (ebd.).

Gemäß dieses Aspekts soll sich gem. § 1 Abs. 3 ROG die Entwicklung, Ordnung und Sicherung der Teilräume in die Gegebenheiten und Erfordernisse des Gesamtraums einfügen, weitergehend soll Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Gesamtraums die Gegebenheiten und Erfordernisse seiner Teilräume berücksichtigen, was als Gegenstromprinzip bezeichnet und in Abb. 6 visualisiert werden soll.

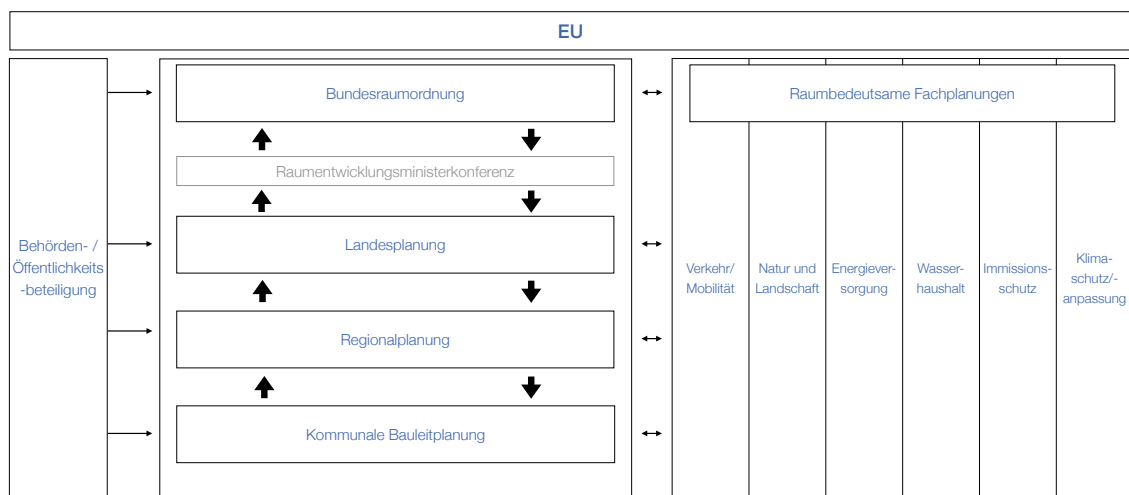


Abbildung 6: Multi-Level Governance-Struktur des deutschen Planungssystems (vereinfacht)

Quelle: Eigene Darstellung nach UBA 2020

In Hessen besteht das Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen, und ländlicher Raum als oberste Landesplanungsbehörde und erstellt den Landesentwicklungsplan „mit dem Ziel, die wirtschaftlichen und sozialen Entwicklungsmöglichkeiten für nachfolgende Generationen zu sichern und die dauerhafte Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes zu wahren“ (Landesplanung Hessen 2026a). Dieser erfüllt die Funktion eines rahmensetzenden und integrierenden Gesamtplans zur räumlichen Ordnung und Entwicklung des Landes Hessen und trifft für einen zehnjährigen Planungshorizont Aussagen zur angestrebten Siedlungs-, Freiraum- und Infrastruktur (ebd.).

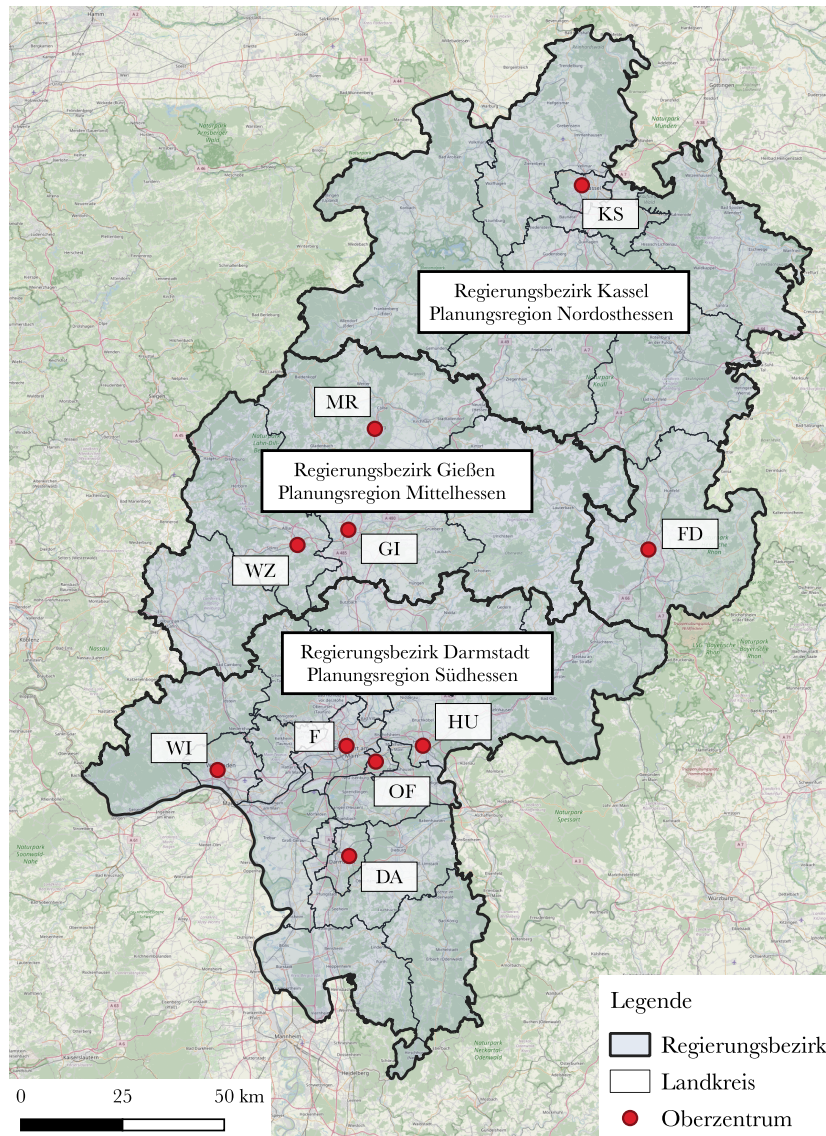


Abbildung 7: Planungsregionen in Hessen

Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: OSM, Oberzentren: Landesplanung Hessen (2026c), Gebietsgrenzen: Zentrale Kompetenzstelle für Geoinformation Hessen (2026)

Anmerkung: KS = Kassel, MR = Marburg, WZ = Wetzlar, GI = Gießen, FD = Fulda, WI = Wiesbaden, F = Frankfurt, OF = Offenbach, HU = Hanau, DA = Darmstadt

Als Planungsebene zwischen Landesplanung und kommunaler Bauleitplanung dient die Regionalplanung der Präzisierung raumplanerischer Ziele auf Regionsebene in den Flächenstaaten (Schultheis 2011: 7-8), wie auch in Hessen. Als Planungsinstrument dient der Regionalplan der Definition von „Ziele[n] zur Siedlungsstruktur und zur Siedlungsflächenentwicklung, zum Freiraumschutz und zur Infrastruktur sowie Ziele, die für Gemeinden, öffentliche Stellen und im einzelnen Bereiche für private Dritte rechtsverbindlich sind“

(Schultheis 2011: 7-8). In fast allen Bundesländern wurden „für die Regionalplanung eigene Organisationsformen geschaffen, die mehrere Kreise umfasst“ (Fürst 2010: 41-42), in Hessen umfasst dies die Regionen Nordost- Mittel- und Südhessen (vgl. Abb. 7).

Als Schwierigkeit föderaler Raumplanung kann dabei die vertikale Koordination beschrieben werden, wobei sich in dieser Koordinationsform „Planungen der einzelnen Ebenen [...] aufeinander zu beziehen und untereinander abzustimmen [haben]“ (Fürst 2010: 42).

Eine nachhaltige Raumentwicklung, welche soziale und wirtschaftliche Ansprüche an den Raum mit seinen ökologischen Funktionen in Einklang bringt und zu einer dauerhaften, großräumig ausgewogenen Ordnung mit gleichwertigen Lebensverhältnissen in den Teilräumen führt, ist nach §1 Abs. 2 ROG Leitvorstellung bei der Erfüllung der Aufgabe der Raumordnung. Gemäß §2 Abs. 2 Nr. 6 S. 7 ROG ist dabei den räumlichen Anforderungen des Klimawandels Rechnung zu tragen, was Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch solche, die der Klimaanpassung dienen, inkludiert.

Wie dargestellt, liegen raumplanerische Steuerungsmöglichkeiten innerhalb der Gefährungskomplexität des Multi-Gefahren-Ansatzes zu KRITIS primär im Rahmen der Auswirkungen des Klimawandels. Dieser Bereich wird im Folgenden in einer Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels im Zusammenhang mit raumplanerischer Steuerung nähergehend betrachtet.

2.3. Raumbedeutsame Auswirkungen des Klimawandels

Die World Meteorological Association (WMO) definiert Klima als die durchschnittlichen Wetterbedingungen für einen bestimmten Ort über einen langen Zeitraum, der von Monaten bis zu Tausenden oder Millionen von Jahren reichen kann und verwendet dabei einen Zeitraum von 30 Jahren, um das durchschnittliche Klima zu bestimmen (WMO 2026). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert Klima weitergehend als „die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet charakterisieren“ (DWD 2024c), das Umweltbundesamt mitunter als „der mittlere Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem bestimmten Gebiet über einen längeren Zeitraum.“ (UBA 2024).

Während sich das Klima historisch vielfältig geändert hat (vgl. Helmholtz 2024) ist seit Beginn der Industrialisierung ein stark zunehmender Temperaturanstieg zu verzeichnen, wel-

cher auf die menschengemachte Verstärkung des Treibhauseffekts zurückzuführen ist (u. a. IPCC 2014: 2; IPCC 2023: 4). Verstärkt und angetrieben durch Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum sind diese anthropogenen Treibhausgasemissionen „höher als je zuvor“ (IPCC 2014: 4). Hierbei beschreibt Mäding (2011: 36), dass „in den zurückliegenden Jahren [...] kein ökologischer Trend so machtvoll in den Vordergrund der Aufmerksamkeit getreten [ist] wie der Klimawandel“. Es können hierbei sowohl großräumige Effekte, wie der Beitrag zum Artensterben, bzw. der Ausbreitung bestimmter Arten, Konsequenzen für Wasserhaushalt und -qualität, als auch kleinräumige Effekte auf geographische Räume, wie Urban Heat Effects, sowie die damit verbundene Bedeutung von Frischluftbildung und -schneisen, verzeichnet werden (Mäding 2011: 38).

Eine wesentliche Quelle für zukünftige Klimaänderungen und derer Auswirkungen und Hintergründe sind hierbei die Sachstandsberichte des IPCC, welche seit 1990 alle sechs Jahre publiziert werden. Der zum Zeitpunkt der Dissertation jüngste ist hierbei der sechste Sachstandsbericht AR6.

Um die Entwicklung und Änderung des künftigen Klimas projizieren zu können, werden Klimamodelle verwendet, um „das komplexe Zusammenspiel verschiedener Komponenten und Prozesse im Erdsystem zu verstehen und Beobachtungen zu interpretieren“ (Schmidt et al. 2024: 8). Solche Klimamodelle werden dazu genutzt, auf Grundlage bestimmter Annahmen, die künftige Klimaentwicklung zu berechnen (UBA 2022). Diese Annahmen werden zu Treibhausgasszenarien zusammengefasst, in deren Ergebnis Klimaprojektionen stehen (UBA 2022). Für den fünften Sachstandsbericht des IPCC wurden hierbei neue Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre entwickelt, sog. *Representative Concentration Pathways*, RCP. „Repräsentativ“ bedeutet hierbei, dass jeder RCP nur eines von vielen möglichen Szenarien darstellt, die zu spezifischen Strahlungsantriebseigenschaften führen würden, der Begriff „Pfad“ weist währenddessen darauf hin, dass nicht nur die langfristigen Konzentrationsniveaus von Interesse sind, sondern auch die Entwicklung, die im Laufe der Zeit zu diesem Ergebnis führt (Moss et al. 2010: 752). Hierbei wurde sich auf vier RCP-Szenarien festgelegt, welche verschiedene Emissionsszenarien, von starken Treibhausgasemissionen (RCP 8.5) bis zum Eingreifen umfassender Klimaschutzmaßnahmen (RCP 2.6) reichen (Rechid et al. 2024: 37), Abb. 8 visualisiert dies.

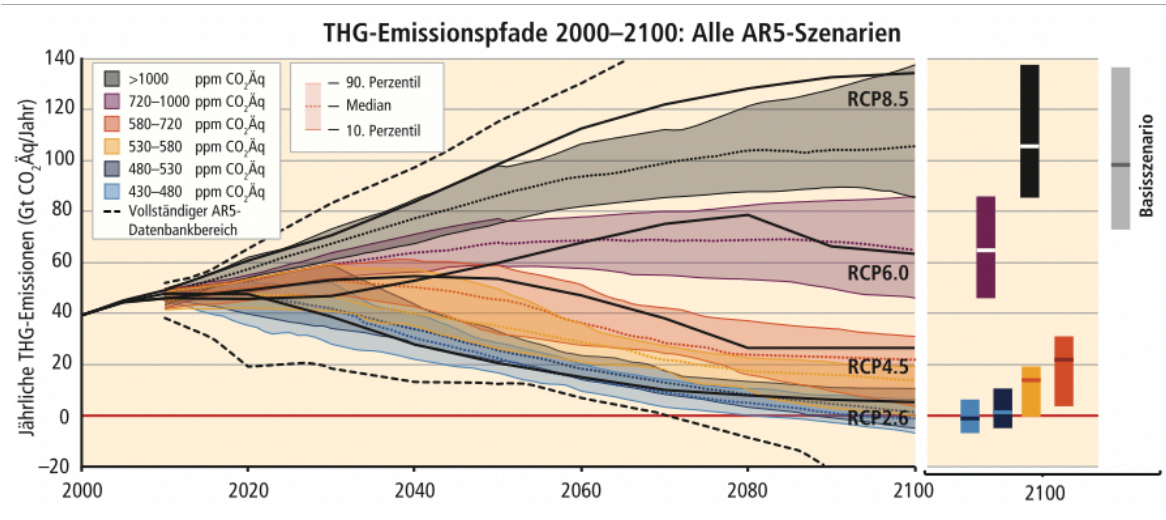


Abbildung 8: Treibhausgas-Emissionpfade 2000-2100, IPCC Sachstandsbericht 5

Quelle: IPCC 2014: 23

Für die Simulationen des sechsten Sachstandsberichts (AR6), welcher in den Jahren 2021, 2022 und 2023 entwickelt wurde, wurden eine Reihe sog. *Shared Socioeconomic Pathways (SSP)* entwickelt, die in „verschiedenen Entwicklungspfade[n] mögliche zukünftige Veränderungen der globalen Gesellschaft beschreiben“ (Schmidt et al. 2024: 11). Hierbei wird abgebildet, wie sich, mit verschiedenen Emissionsminderungszielen, gesellschaftliche Entscheidungen auf die Treibhausgasemissionen auswirken und wie dabei auch die Klimaziele des Pariser Abkommens erreicht werden können (Schmidt et al. 2024: 11). SSPs decken hierbei im Vergleich zu den RCPs eine breitere Spanne möglicher „Treibhausgasemissionen, -konzentrationen und daraus resultierender Strahlungsantriebe ab“ (Schmidt et al. 2024: 11). Die projizierte Entwicklung der globalen CO₂-Emissionen für die verschiedenen SSP-Szenarien ist in Abb. 9 dargestellt.

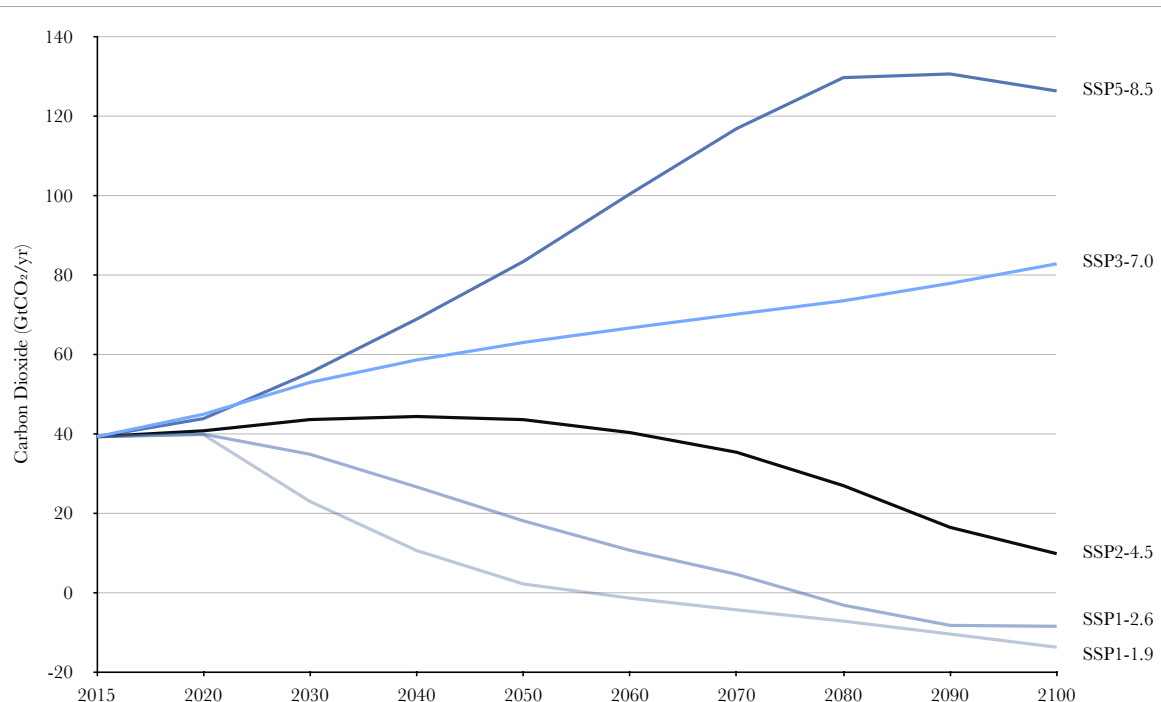


Abbildung 9: Globale CO₂-Emissionen nach den SSP-Szenarien, IPCC Sachstandsbericht 6

Quelle: Eigene Darstellung nach IPCC 2021: 13, Datengrundlage: Rogelj et al. 2021

Die Sachstandsberichte des IPCC verdeutlichen, dass der anthropogene Klimawandel das Auftreten von Wetter- und Klimaextremen in jeder Region des Planeten beeinflusst und zu negativen Auswirkungen auf Natur und Mensch führt (IPCC 2023: 5).

Mitunter sind solche Auswirkungen Hitze-Extreme in urbanen Regionen, mit Konsequenzen für urbane Infrastruktur wie Transportsysteme, Wasser und Energiesysteme (IPCC 2023: 6). Insbesondere der Treibhausgasausstoß wird dabei zu einem Anstieg globaler Erwärmung führen (IPCC 2023: 12). Durch den Anstieg Klimawandel - verbundener Gefahren besteht ein immer kleiner werdendes Fenster für Handlungsmöglichkeiten, was auch die Relevanz internationaler Kooperation unterstreicht (IPCC 2023: 24).

Urbane Systeme sind dabei besonders kritisch für Aspekte wie Emissionsreduzierung und der Erweiterung von klimaresilienter Entwicklung. Schlüsselanpassungs- und Mitigationsstrategien inkludieren hierbei u. a. die Berücksichtigung von Klimawandelauswirkungen und Risiken im Design und der Planung von Siedlungen und Infrastruktur, sowie Landnutzungsplanung (IPCC 2023: 29).

Die Arbeit gegen die Folgen und Auswirkungen des Klimawandels ist dabei verbunden mit den Begriffen des Klimaschutzes und der Klimaanpassung. Während hierbei beide Begriffe

definiert werden, ist die Feststellung relevant, dass beide Handlungsfelder „zwei Seiten derselben Medaille“ (difu 2021: 16) sind und nicht getrennt voneinander betrachtet werden sollten.

Klimaschutz beschreibt grundsätzlich das Ziel, „den Ausstoß von klimarelevanten Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan zu reduzieren, um entsprechend dem Vorsorgeprinzip ein Voranschreiten des Klimawandels zu verhindern“ (difu 2021: 16). Klimaanpassung definiert sich durch den „vorsorgenden Umgang mit nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels und Extremwetterereignissen“ und hierbei der Minimierung von Risiken, Vermeidung von Schäden und Anpassung an die zu erwartenden Veränderungen (difu 2021: 16).

Beide Begriffe sind hierbei auch eng verbunden mit den Begriffen der *mitigation*, in Form der Verminderung und Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen in die Atmosphäre, um Klimafolgen zu reduzieren; und der *adaption* in Form der Vorhersehung und des Ergreifens geeigneter Maßnahmen, um u. a. durch den Klimawandel hervorgerufene Schäden zu minimieren (European Environment Agency 2024).

Der Erfolg von Klimaanpassungs-Maßnahmen für die Reduzierung von klimabedingten Risiken wird in verschiedenen Bereichen dokumentiert. Trotzdem sind die meisten Adaptionsstrategien fragmentiert [...] sektorspezifisch und ungleich über Regionen verteilt, was den weiterhin bestehenden Handlungsbedarf hinsichtlich Klimaanpassung verdeutlicht (IPCC 2023: 8). Hauptsächliche Hürden für Klimaanpassung inkludieren zudem ein fehlendes Engagement des privaten Sektors sowie von BürgerInnen, unzureichende Mobilisierung von Finanzierung, sowie u. a. unzureichendes politisches Engagement (IPCC 2023: 9).

Während Policies und Gesetze zur Mitigation der Folgen des Klimawandels seit AR5 erweitert wurden, ist es dennoch wahrscheinlich, dass das 1.5 Grad Ziel übertroffen wird und es zugleich schwieriger wird, die Erwärmung unter 2 Grad zu halten (IPCC 2023: 10).

Hieran anschließend sollen konkrete Folgen in Fokussierung auf das Land Hessen eingeordnet werden.

2.3.1. Temperatur

Temperatur wird durch den DWD als der „messbare[...] Wärmeszustand von Materie / eines Stoffes / eines Stoffsystems“ (DWD 2026a) definiert, Lufttemperatur fortführend physikalisch als „Maß für den Wärmeszustand eines Luftvolumens“ (DWD 2024a). „Die „besten Abschätzungen“ des Anstiegs der global gemittelten bodennahen Temperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verglichen mit der Zeit von 1850 bis 1900 liegen laut AR6 je nach Szenario bei 1,4 bis 4,4 °C. Über den Kontinenten wird sich die Atmosphäre deutlich stärker erwärmen als über den Ozeanen. Daneben sind weitere spürbare Veränderungen des Klimas zu erwarten: So wird z. B. projiziert, dass der Meeresspiegel weiter ansteigt und das Meereis weiter zurückgeht“ (Schmidt et al. 2024: 16). Entsprechend relevant ist hierbei die Erhöhung der gesellschaftlichen Widerstandsfähigkeit gegenüber Hitzewellen. Dies stellt eine entscheidende Herausforderung dar, welche Anpassungsplaner berücksichtigen müssen (Christidis et al. 2014: 49). Verschiedene Herangehensweisen bestehen hierbei bei der Betrachtung von Hitzewellen: Sie reichen von festen Temperaturschwellenwerten für die Maximumtemperatur, wobei auch die Abkühlung in den Nachtstunden einen hohen Einfluss auf die Belastung durch Hitze auf den menschlichen Körper aufzeigt (Friedrich et al. 2024: 64). Hitzewellen haben hierbei außerdem weitreichende Konsequenzen, so bspw. die Hitzewelle 2003, bei welcher ca. 70.000 Todesfälle in den in Robine et al. (2008: 176) berücksichtigten 16 EU-Ländern der Hitzewelle zuzurechnen waren.

Abbildung 10 zeigt hierbei die Einzelwerte für Deutschland und als 30-jähriges gleitendes Mittel, den Indikator der Lufttemperatur. Dargestellt sind hier Zeitreihen der Abweichungen von den vieljährigen Mittelwerten 1971-2000. Der Verlauf des 30-jährigen gleitenden Mittels zeigt hier im Fall der Lufttemperatur einen Anstieg, insbesondere auch im Bereich des 15.-85. Perzentils der gleitenden Mittel im Rahmen des DWD-Referenz-Ensembles RCP8.5. Lufttemperatur betrachtet man hierbei als Maß für den Wärmeszustand eines Luftvolumens, wobei „je größer die mittlere Geschwindigkeit aller Moleküle in einem Luftvolumen ist, um so höher ist auch seine Lufttemperatur“ (DWD 2024a).

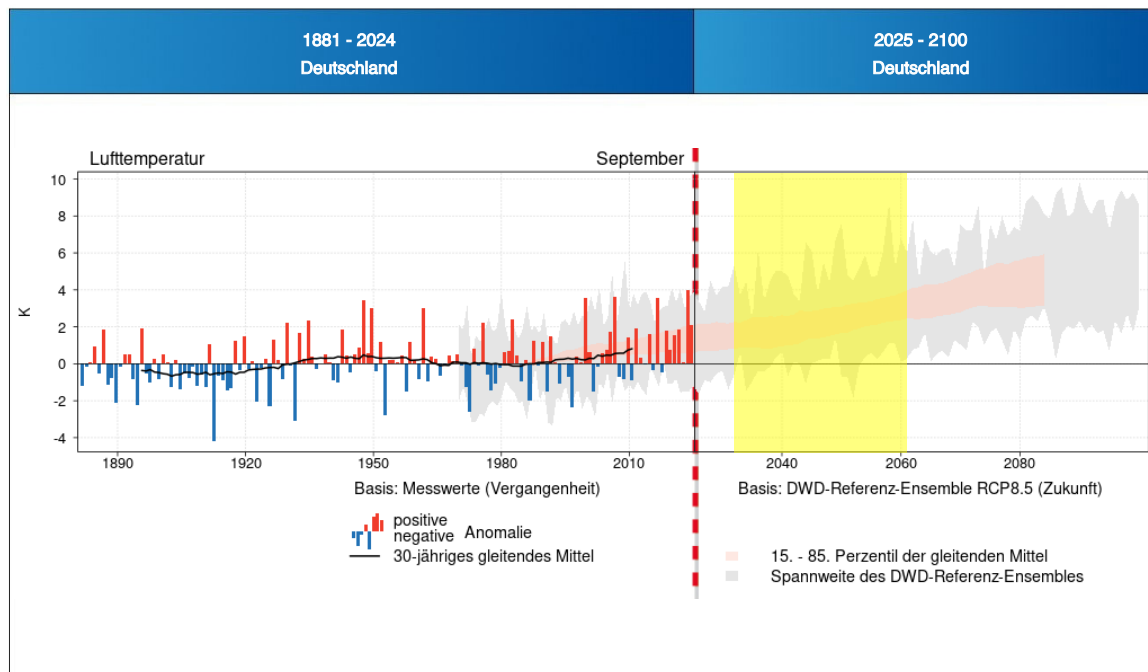


Abbildung 10: Klimaprojektion der Lufttemperatur, Emissionsszenario RCP 8.5, Zeitfenster: 2030-2060

Quelle: DWD 2024 (Deutscher Klimaatlas)

So zeigt bspw. auch Abb. 11 einen Anstieg des Indikators Tropennächte im 15.-85. Perzentils der gleitenden Mittel im RCP8.5 Szenario. Eine Tropennacht wird hierbei als eine Nacht definiert, in der das Minimum der Lufttemperatur $\geq 20\text{ °C}$ beträgt (täglicher Messzeitraum: 18 UTC bis 06 UTC) (DWD 2024b).

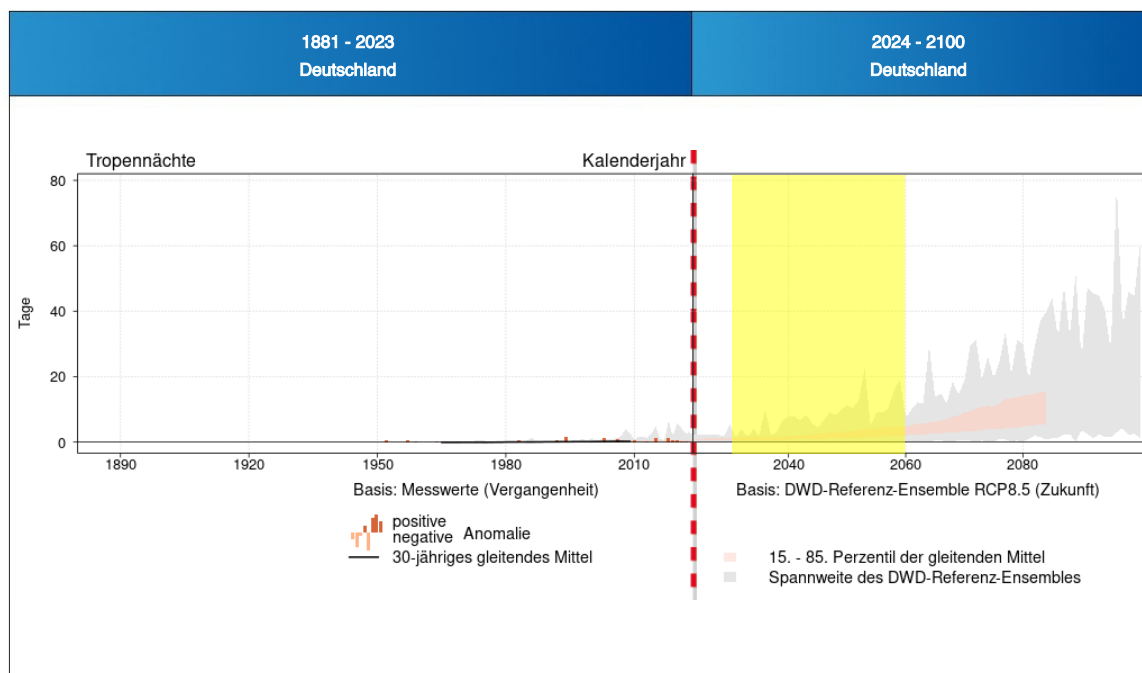


Abbildung 11: Klimaprojektion des Indikators Tropennächte, Emissionsszenario RCP 8.5, Zeitfenster: 2030-2060

Quelle: DWD 2024 (Deutscher Klimaatlas)

Für das Land Hessen stehen verschiedene Datenquellen zur Analyse von Indikatoren im Bereich „Temperatur“ zur Verfügung. Zum einen bietet der Hitzeviewer Hessen (HLNUG 2025b) Daten aus Messungen von Erdbeobachtungssatelliten an. Durch diese Messungen „ist es bei wolkenlosem Himmel möglich, flächendeckend Landoberflächentemperaturen am Tag und in der Nacht abzuleiten“ (ebd.). Zum anderen wurde im Rahmen einer landesweiten Klimaanalyse (iMA 2022) des HMWEVW die Ermittlung „thermisch/lufthygienisch belastete[r] (Siedlungs-)Räume sowie die Identifizierung der möglichst unbelasteten Luftleitbahnen einschließlich der ihnen zugeordneten Kaltluftproduktionsgebiete, die eine ausgleichende Wirkung (Ausgleichsraum) auf die belasteten Wirkräume ausüben können“ (iMA 2022: 13) vollzogen. Zielstellung letzterer Analyse war, weitergehend eine Grundlage dazu zu erstellen, das Schutzgut Klima in der planerischen Abwägung der Regionalplanung berücksichtigen zu können (ebd.). FITNAH-Modellrechnungen meteorologischer Größen, welche der Analyse zu Grunde lagen, wurden mit einer Auflösung von 200m x 200m für Gesamthessen, bzw. 50m x 50m für den Ballungsraum FrankfurtRheinMain durchgeführt (ebd.: 14). FITNAH ist hierbei ein mathematisch-physikalisches Strömungsmodell, welches „dreidimensionale Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Strömung löst“ (Landespla-

nung Hessen 2026b). Das Modell simuliert hierbei die „Erwärmung, bzw. die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft“ (ebd.), wobei Eingangsdaten wie bspw. „das digitale Höhenmodell, die Landnutzung und der Anfangszustand der Atmosphäre vorgegeben werden müssen“ (ebd.). Ausgangslage der Simulation im Kontext der landesweiten Klimaanalyse war hierbei eine autochthone Wetterlage (iMA 2022: 41). Die Simulation wurde weitergehend für einen typischen Hochsommertag, den 1. August, durchgeführt, mit einer bodennahen Lufttemperatur im Mittel von 29°C um 15:00 Uhr, einer relativen Feuchte von 20%, keinem übergeordneten Wind und wolkenlosem Himmel als meteorologische Bedingungen (ebd.: 42). Typische hochsommerliche Verhältnisse repräsentieren somit die Ergebnisse der FITNAH-Simulation (ebd.).

Als Indikator wird auf Abb. 12 die thermische Betroffenheit der Bevölkerung dargestellt. Diese Einstufung ergibt sich aus einer Zusammenschau der Datensätze zur Empfindlichkeit der Bevölkerung (ermittelt aus Einwohnerdichte und Ortsgröße in Hektar), sowie der thermischen Bedingungen (ermittelt aus der Wärmebelastung tagsüber und nachts), die Darstellung erfolgt auf einer Wertstufung von geringer bis extremer thermischen Belastung (iMA 2022: 48-51).

Die höchste thermische Betroffenheit wird dabei im südhessischen Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main identifiziert. Dieser Aspekt ist auch im Zusammenhang mit der Ausbildung städtischer Wärmeinseln zu sehen, ein Phänomen, welches beschreibt, „dass sich innerhalb von Städten Wärme- und Hitzebelastungen unterschiedlich stark bemerkbar machen und Städte im allgemeinen stärker betroffen sind als das unbebaute Umland“ (HLNUG 2026a).

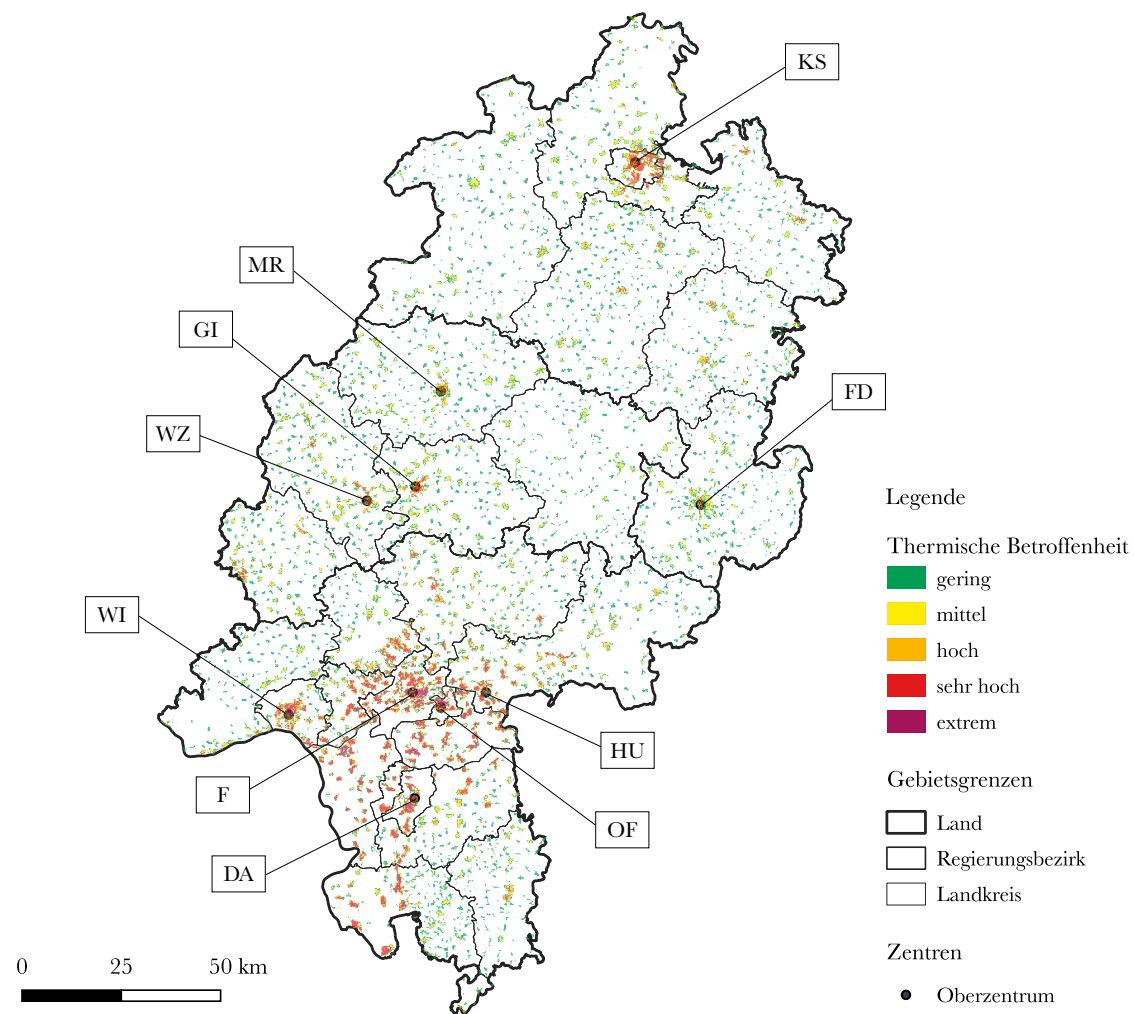


Abbildung 12: Thermische Betroffenheit der Bevölkerung im Land Hessen

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage iMA 2022: 85; Datengrundlage: HMWEVW 2024, OSM, Oberzentren: Landesplanung Hessen (2026c), Gebietsgrenzen: Zentrale Kompetenzstelle für Geoinformation Hessen (2026)

Anmerkung: KS = Kassel, MR = Marburg, WZ = Wetzlar, GI = Gießen, FD = Fulda, WI = Wiesbaden, F = Frankfurt, OF = Offenbach, HU = Hanau, DA = Darmstadt

Des weiteren ist auch die Anzahl an Sommertagen ein Indikator, welcher im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse betrachtet und unter Betrachtung der RCP 4.5 und RCP 8.5 Szenarien prognostiziert wurde. Sommertage definieren sich hierbei bei einem Höchstwert $\geq 25^{\circ}\text{C}$. Analyseergebnisse ergeben diesbezüglich, dass die Anzahl der Sommertage „in der Klimanormalperiode 2031-2060 zur Mitte des Jahrhunderts im hessenweiten Mittel um 9,0 (RCP 4.5) bzw. 9,6 (RCP 8.5) ansteigt (...)“ (iMA 2022: 72). In der Klimanormalperiode 2071-2100 wird im hessenweiten Mittel ein „Anstieg der Anzahl der Sommertage um 11,6

(RCP 4.5) bzw. 23,2 Tage (RCP 8.5) prognostiziert“ (ebd.). Erkennbar ist dieser Anstieg insbesondere im Ballungsraum Frankfurt Rhein/Main, bzw. i.A. in Südhessen.

Die landesweite Klimaaanalyse leistet hierbei auch einen Beitrag zur raumplanerischen Inklusion von Klimawandelfolgen, als dass sie eine Datengrundlage für die Regionalplanung und die regionale Flächennutzungsplanung darstellt. Durch diese Datengrundlage wurde es ermöglicht, neben Vorbehalts- auch Vorranggebiete besonderer Klimafunktionen regionalplanerisch festzulegen (iMA 2022: 89). Durch die „direkten und abgeleiteten FITNAH-Simulationsergebnisse [...], den Einstufungen, die zur Identifizierung der thermisch belasteten Siedlungsgebiete geführt haben und mit Hilfe der [...] Bestimmung der relativen Bedeutung der Ausgleichsräume für diese Siedlungsgebiete“ (iMA 2022: 89) folgen im Rahmen der landesweiten Klimaaanalyse entsprechend Empfehlungen zur Festlegung von VRG und VBH für besondere Klimafunktionen. Empfehlungen zur Festlegung diesbezüglicher VRG werden „für schwache bis mittlere, bodennahe Strömungssysteme (ausgewertet in 5 m über Grund) mit geringem Luftdurchsatz (Gesamtvolumenstromdichte $\leq 60\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$), aber mit sehr hoher Bedeutung hinsichtlich ihrer Durchlüftungsfunktion für die thermisch belasteten Siedlungsgebiete mit *sehr großem Flächenanteil* mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit festzulegen“ (iMA 2022: 90) getroffen. Empfehlungen zur Festlegung von diesbezüglichen VBH „umfassen bodennahe Strömungssysteme (ausgewertet in 5 m über Grund), die auf thermisch belastete Siedlungsgebiete mit einem *großen Flächenanteil* mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit treffen“ (iMA 2022: 91).

Neben größer gefassten Siedlungsgebieten sind auch Auswirkungen von Hitzeereignissen auf KRITIS zu verzeichnen. So untersuchen Groth et al. (2023: 299) den Zusammenhang häufiger auftretender Hitzewellen auf die Energieinfrastruktur, welche „sich negativ auf die Übertragungsfähigkeit auswirken oder zu einer unmittelbaren Beschädigung von einzelnen Elementen wie beispielsweise Masten, Kabeln und Transformatoren führen können“. In Verbindung mit der Exposition von Erdkabeln gegenüber Hitzeereignissen stellen die AutorInnen Tröltzsch et al. (2012: 159) fest, dass Erdkabel größere Schäden bei dem Bau anrichten und auch den Boden erwärmen können. Sie stellen weiterhin fest, dass der Wärmeeffekt bei Trockenperioden zu einer verstärkten Austrocknung der Böden in diesen Abschnitten führt (ebd.). Dieses Beispiel macht deutlich, dass hier die Energie-Infrastruktur sowohl von Auswirkungen des Klimawandels beeinflusst wird, aber auch selbst zu einer Effekt-Verstärkung führen kann.

In einer EU-weiten Analyse zu Auswirkungen klimatischer Extreme auf KRITIS analysieren Forzieri et al. (2017), dass Schäden durch Hitzewellen, Dürren in Südeuropa und Überschwemmungen an den Küsten am dramatischsten zunehmen, aber auch das Risiko von Überschwemmungen im Landesinneren, Stürmen und Waldbränden in Europa steigen wird, wobei die Veränderungen je nach Region ihrer Kalkulation nach unterschiedlich stark ausfallen werden (ebd.: 97). Die regionalen Auswirkungen hängen dabei von den räumlichen Schwankungen der Häufigkeit des Auftretens und der Stärke einer (zukünftigen) Gefahr sowie von der räumlichen Verteilung der gefährdeten Vermögenswerte und der regionalen Wohlfahrt ab (ebd.: 102). Der größte Anstieg an Schäden in Bezug auf den Energiesektor betrifft gem. der Berechnungen der AutorInnen die Energieerzeugung aufgrund ihrer Anfälligkeit für Dürren und Hitzewellen, wobei bis zum Ende dieses Jahrhunderts Dürre- und Hitzeschäden in Europa 67% bzw. 27% aller Gefahrenauswirkungen auf den Energiesektor ausmachen werden (derzeit, zum Stand der Analyse, 31 % bzw. 9 %) (ebd.: 101). Auch im Verkehrssektor werden Hitzewellen lt. den AutorInnen künftige Schäden weitgehend dominieren (92% der gesamten Gefahrenauswirkungen bis 2080), wobei Auswirkungen v. a. auf Straßen und Schienen, bspw. durch Verformungen von Schienen und Schmelzen von Asphalt zu verzeichnen sind (ebd.: 101).

Im Folgenden wird nun im Themenkomplex Niederschlag ein Blick auf die Bereiche Starkregen und Hochwasser geworfen, um auch diese Ereignisse konzeptionell einzuordnen.

2.3.2. Niederschlag

In Betrachtung des Niederschlags, wird im Folgenden zwischen Starkregen und Hochwasser unterschieden.

Starkregen wird vom Deutschen Wetterdienst als (große) Niederschlagsmenge je Zeiteinheit definiert (DWD 2024d), wobei betont wird, dass dieser grundsätzlich überall auftreten kann und zu „schnell ansteigenden Wasserständen und (bzw. oder) zu Überschwemmungen“ (ebd.) führt. Der DWD warnt hierbei vor Starkregen in drei Stufen (DWD 2024d): Regenmengen von 15 bis 25 l/m² innerhalb einer Stunde oder 20 bis 35 l/m² in sechs Stunden (Markante Wetterwarnung); Regenmengen > 25 bis 40 l/m² in einer Stunde oder > 35 l/m² bis 60 l/m² in sechs Stunden (Unwetterwarnung); Regenmengen > 40 l/m² in einer

Stunde oder $> 60 \text{ l/m}^2$ in sechs Stunden (Warnung vor extremem Unwetter). Die Warnungen inkludieren somit Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit (DWD 2024d).

In weiten Teilen Deutschlands können Änderungen sowohl in der Häufigkeit, als auch der Intensität von Starkniederschlägen beobachtet werden, wobei regionale und saisonale Variationen erheblich sind (Kunz et al. 2024: 76). Im Winter haben Zahl und Intensität von Starkniederschlagsereignissen in vielen Regionen in Deutschland zugenommen, während bei sommerlichen Starkniederschlägen eine leichte Verringerung der Niederschlagssummen zu verzeichnen sind und sich das Bild eher uneinheitlich zeigt (Kunz et al. 2024: 76). Für die Zukunft ist hierbei zu erwarten, dass sich die beobachtete Tendenz „einer Zunahme winterlicher Starkniederschläge [...] weiter fortsetzen wird und sommerliche Starkniederschläge erheblich ansteigen“ (Kunz et al. 2024: 77), wobei auch hier die Änderungen räumlich sehr differenziert ausfallen (ebd.). Grundsätzlich muss hierbei betont werden, dass sich die Ergebnisse der zu erwartenden Niederschlagsänderungen zum Teil „erheblich je nach Klimamodell, Realisierung und Emissionsszenario“ unterscheiden (Kunz et al. 2024: 82). Passow et al. (2019: 7) zeigen auf, dass die meisten Regionen in Deutschland einen Anstieg der Intensität von Starkregen im Zeitraum von 1951 und 2006 erfahren haben. Die Gegenden mit dem stärksten Anstieg sind hierbei Südost- und Zentraldeutschland (Passow et al. 2019: 7-8). Die AutorInnen betonen, dass der positive Trend hierbei mit regionalen Charakteristika, wie Höhenlage und Orographie oder Feuchtigkeitstransport aus angrenzenden großen Gewässern zusammenhängen könnte (Passow et al. 2019: 11).

In einer Analyse zur Entwicklung von Starkniederschlägen beschreiben Hattermann et al. (2013: 466) die Wasserhaltekapazität der Atmosphäre und damit ihren absoluten potentiellen Wassergehalt, welcher gemäß dem Clausius-Clapeyron-Gesetz mit der Temperatur zunimmt, und somit in einer sich erwärmenden Welt auch das Potenzial für intensive Niederschläge ansteigt. Als Konsequenz davon ist das Potential für Starkregen („intense precipitation“) über die letzten Jahrzehnte dadurch gestiegen, dass mehr Wasser in der Atmosphäre gespeichert wird. Die AutorInnen zeigen in ihrer Studie auf, dass in vielen Regionen über einen klimatisch relevanten Zeitraum von 1951 bis 2006 Trends zu starken Niederschlägen zu verzeichnen sind, was zur Beobachtung führt, dass Klimaveränderungen für eine bereits nachweisbare Zunahme hydroklimatischer Extreme verantwortlich sind (Hattermann et al. 2013: 475). Für Deutschland indizieren die Ergebnisse der Studie hierbei eine Verbindung des Klimawandels zum Beitrag der Steigerung von Überflutungsgefahr- und risiko.

Im Rahmen der Betrachtung von Niederschlagsereignissen ist, wie oben erwähnt, zwischen Überschwemmungen in Folge von Starkregen und Hochwasser zu differenzieren. Während Hochwasser ebenfalls durch starken oder langanhaltenden Niederschlag entstehen kann, steigt hier der Pegel eines Flusses an und führt in tief gelegenen Gebieten am Fluss zu Überflutungen, das Wasser kommt somit von „unten“ (HLNUG 2018: 4). In Differenzierung dazu kommt das Wasser bei urbanen Sturzfluten „von oben“: Hier fließt Niederschlagswasser, welches oberhalb eines betroffenen Geländes fiel und dort nicht versickern konnte, oberflächlich in die unterhalb gelegenen Flächen (HLNUG 2018: 4). Das Risiko solcher Überflutungen hängt hierbei von der Intensität der (Stark-)niederschläge ab (Hattermann et al. 2013: 472). Die globalen Schäden durch Überflutungen sind in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen und werden von stetigem Bevölkerungswachstum und ökonomischen Aktivitäten in überflutungs-gefährdeten Gebieten beeinflusst (Winsemius et al. 2016: 381).

Fluss-Hochwasser sind zunächst natürliche Ereignisse, welche für das Abflussverhalten von Flüssen charakteristisch sind (UBA 2011: 6). Anthropogene Beeinflussung der Umwelt trägt jedoch maßgeblich zu Entstehung, Verlauf und Auswirkungen von Hochwasserereignissen bei (ebd.).

Als raumplanerischen Beitrag zur Klimaanpassungspolitik betont Mäding (2011: 38) die „planungsrechtliche Sicherung von Retentionsflächen als Vorranggebiete für den vorsorgenden Hochwasserschutz oder die Investition in Deiche“. Der räumliche Hochwasserschutz im Binnenland besteht dabei v. a. „in der Sicherung und Rückgewinnung von Überschwemmungsbereichen und überschwemmungsgefährdeten Bereichen“ (Janssen 2018: 894). Mit der Einheit HQ (Hochwasserabflussmenge „Hochwasser Quantum“) wird der Schutzstatus nach dem Bemessungshochwasser bezeichnet (ebd.). Unterschieden werden hierbei nach §74 Abs. 2 WHG unterschiedliche Hochwasserwahrscheinlichkeiten:

- HQ_{extrem} : Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit (voraussichtliches Wiederkehrintervall mindestens 200 Jahre) oder bei Extremereignissen
- HQ_{100} : Hochwasser mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (voraussichtliches Wiederkehrintervall mindestens 100 Jahre)
- Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit

Im Hochwasserschutz ist zudem zwischen natürlichem und technischem Hochwasserschutz zu unterscheiden. Natürlicher Schutz inkludiert die „Sicherung und Wiederherstellung von

Überschwemmungsgebieten und Retentionsflächen“ (Janssen 2018: 894), technischer „bauliche Maßnahmen wie die Errichtung von Flutungspoldern, Rückhaltebecken, Talsperren, Deichen und den Rückbau von Flussbau- und Kraftwerken“ (ebd.).

Raumplanerisch besteht hierbei seit 2021 ein Bundesraumordnungsplan für Hochwasserschutz (BRPH). Dieser harmonisiert bundesweit raumplanerische Standards zur besseren Koordinierung des Hochwasserschutzes und führt mitunter einen risikobasierten Ansatz in der Raumplanung zur Berücksichtigung von Empfindlichkeiten und Schutzwürdigkeiten ein (BMWSB 2026).

Weiterhin unterstützen Regional- und Bauleitplanung „mit ihren Instrumenten z.T. über die nach Wasserrecht (WHG, HWG) festgesetzten Flächen hinaus - ein Flächenmanagement, das die Sicherung und Rückgewinnung von natürlichen Überschwemmungsflächen, die Risikovorsorge in potenziell überschwemmungsgefährdeten Bereichen (z. B. hinter Deichen) und den Rückhalt des Wassers in der Fläche umfasst (Landesplanung Hessen 2020: 81). Hierbei umfassen VRG für vorbeugenden Hochwasserschutz „[a]lle nach § 76 WHG in Verbindung mit § 45 HWG festgesetzten bzw. als festgesetzt geltenden Überschwemmungsgebiete sowie die in den Arbeitskarten der Wasserbehörden dargestellten und im Staatsanzeiger für das Land Hessen veröffentlichten Gebiete“ (ebd.: 81) und VBH für vorbeugenden Hochwasserschutz „Risikogebiete außerhalb von Überschwemmungsgebieten. Dies sind in Hessen Gebiete, die erst bei Überschreitung eines Hochwasserereignisses, wie es statistisch einmal in 100 Jahren zu erwarten ist, überschwemmt werden (...)“ (ebd.: 82).

Auf kommunaler Ebene stellen außerdem starkregenbezogene Gefahren- und Risikokarten eine wichtige Grundlage zur Ableitung geeigneter Präventionsmaßnahmen dar (Baier et al. 2021: 179). Baier et al. (2021: 179) stellten hierbei im Rahmen einer deutschlandweiten Analyse der Veröffentlichungen von Starkregengefahrenkarten fest, dass trotz „anfänglicher Bedenken (unter anderem Datenschutz) die Vorteile der Veröffentlichung von Starkregengefahrenkarten überwiegen und dass das bisherige Feedback der Bevölkerung [im Rahmen der untersuchten Städte] überwiegend positiv war“.

Auch zu den Auswirkungen von Niederschlag auf KRITIS können diverse Erkenntnisse herangezogen werden:

Als sensibel gegenüber extremen Niederschlagsereignissen zeigt sich z. B. die Binnenschifffahrt sowie Schieneninfrastruktur, teilweise als Transportinfrastruktur von Energieträgern (Cortekar et al. 2013: 19). Ebenfalls im Zusammenhang schwankender Pegelstände steht die

Funktionalität von Wasserkraftanlagen, welche sowohl von zu hohen als auch zu niedrigen Wasserständen negativ beeinflusst werden können (Groth et al. 2018: 195). Lt. Groth et al. (2018: 195) reagieren hierbei Laufwasserkraftwerke sensibler gegenüber extreme Ausreißer der Pegelstände als Speicherkraftwerke.

Eine ähnliche Analyse vollzieht Fekete (2020) in einer Studie zur Resilienz von Sektoren kritischer Infrastrukturen in Folge von kaskadierenden Auswirkungen während Flutereignissen. Untersuchungsraum der Arbeit ist in diesem Fall Köln und der an das Stadtgebiet angrenzende Rhein-Erft-Kreis. Fekete beschreibt hierbei zwei Kaskaden; zum einen Auswirkungen des Ausfalls der Verkehrsinfrastruktur und zum anderen den zusätzlichen Ausfall des KRITIS-Sektors Energie aufgrund eines Flutereignisses. Beschrieben wird hierbei eine einseitige Abhängigkeit des Notfall-Managements, sowie auch von Krankenhäusern vom Energie-Sektor und die Analyse verdeutlicht, dass der Ausfall des Elektrizitäts-Systems starke Einwirkungen auf die Resilienz der weiteren Sektoren hat (Fekete 2020: 5). Mittels einer dritten Kaskade macht Fekete deutlich, dass etwaige Reparaturen, welche im Zusammenhang mit dem Hochwasser-bedingten Ausfall des KRITIS-Sektors Energie stehen, wiederum vom Ausfall der Verkehrsinfrastruktur betroffen sind. Dieser Ausfall beeinflusst somit auch gleichzeitig den Wiederaufbau des Energie-Sektors (Fekete 2020: 5).

Auch die mögliche Unterspülung von Strommast-Fundamenten, sowie die Betroffenheit von Umspannungsanlagen durch Hochwasser-Ereignisse wird als zu beachten beschrieben (Groth et al. 2015: 17, Groth et al. 2018: 197), wobei Hochwasserereignisse zu Unterbrechungen in der Strom- und Wasserversorgung führen können, da Umspannstationen in Überflutungsgebieten im Vorfeld kontrolliert abgeschaltet werden oder durch unerwartet eindringende Wassermassen Schaden nehmen sowie auch Wassergewinnungsanlagen betroffen sein können“ (Groth et al. 2023: 302).

Gebbeken (2016) betrachtet außerdem die Auswirkungen von Hochwasserereignissen auf Brücken als Teil des KRITIS-Sektors Transport und Verkehr und verdeutlicht die Gefahren durch Schwemm- und Treibgut und dessen Festsetzung im Gewässerquerschnitt. Von einer solchen Festsetzung sind nach dem Autor zumeist Brücken mit Pfeilern in Fließgewässern betroffen, da durch die Verengung des Flusses die Fließgeschwindigkeit zunimmt und Pfeiler so den hydrodynamischen Kräften des Flusses gegenüber stärker exponiert sind (Gebekken 2016: 206). Entsprechenderweise steigern diese Einwirkungen das Schädigungsrisiko der Pfeiler erheblich (ebd.). Eine präventive Lösung, welche der Autor anspricht, ist beispielsweise die Wahl „der richtigen Querschnittsformen der umströmten Körper und eine

ausreichende Gründungstiefe“ (ebd.: 207). Auch bei bestehenden Bauwerken könne nach ihm auch nachträglich eine Armierungsschicht an der Gewässersohle verbaut werden, um die darunterliegenden Sedimentschichten vor Erosion zu schützen (ebd.).

In Zusammenhang mit dem KRITIS-Sektor Transport und Verkehr untersuchen Keller et al. (2014) die Auswirkungen extremer Niederschlags-Ereignisse in Baden-Württemberg im Jahr 2013. Die AutorInnen kommen hierbei zu dem Schluss, dass die starken Auswirkungen auf die Straßen-Infrastruktur des Landes Ende Mai des Jahres in Form von Unfällen und Straßensperrungen auf den lang andauernden Regenfällen in den Vormonaten und der damit zusammenhängenden Übersättigung des Bodens basieren (Keller et al. 2014: 237). Die dann Ende Mai auftretenden Starkregenereignisse waren somit der „trigger point“ für die Überlastung des KRITIS-Sektors (ebd.).

Insbesondere die Auswirkungen des Auguthochwassers 2002 auf die Wasserversorgung und das Infektionsgeschehen der Bevölkerung in Sachsen und Sachsen-Anhalt, wird durch Braubach (2011) der KRITIS-Sektor Gesundheit betrachtet. So mussten in Sachsen 10% der Krankenhäuser in Folge des Hochwassers evakuiert werden, unter anderem die drei innerstädtischen Kliniken in Dresden, sowie das Dresdener Universitätsklinikum (Braubach 2011: 121). Der KRITIS-Sektor wurde somit durch das Hochwasser-Ereignis erheblich beeinträchtigt und gefährdet.

2.4. Zwischenfazit

Die Einordnung der konzeptionellen Grundlagen verdeutlicht zunächst dreierlei:

Erstens sind KRITIS als interdependente Einrichtungen zu verstehen, welche sich einerseits aufgrund ihrer relativen Bedeutsamkeit (ihrer Kritikalität) für das Funktionieren des staatlichen Gemeinwesens auszeichnen und andererseits aufgrund ihrer Bedeutung im Falle ihres Ausfalls zu negativen Konsequenzen für jenes Funktionieren führen können. In ihrem Schutz sind sowohl anthropogene, als auch natürliche Gefahrenquellen zu berücksichtigen, wobei es insbesondere in letzterem Komplex der Klimawandel ist, welcher auch raumplanerische Handlungserfordernis hervorruft. Zudem besteht in Deutschland kein einheitlicher rechtlicher Rahmen zum Schutz von KRITIS¹.

¹ Im Zeitraum der Einreichung der Dissertation hat der dt. Bundestag den Entwurf eines KRITIS-Dachgesetzes beschlossen, welcher allerdings aus zeitlichen Gründen nicht mehr berücksichtigt werden konnte.

Zweitens ist auch in Hessen eine steigende klimatische Dynamik zu verzeichnen. insbesondere Temperaturanstieg, bzw. Hitzeereignisse, sowie Niederschlagsereignisse wie Hochwasser und Starkregen erfordern Handlungen. Grundsätzlich bezeichnen es Groth et al. (2023) hierbei als zu erwarten, dass es in Folge des Klimawandels „vermehrt zu Einschränkungen oder Ausfällen von kritischen Infrastrukturen kommt, wobei insbesondere die Strom-, Wärme- und Wasserversorgung, die Abwasserentsorgung, der Verkehrssektor sowie die Informationstechnik und Telekommunikation zu nennen sind“ (Groth et al. 2023: 298). Gerade für Infrastrukturbetreiber erscheint es dabei als relevant, neben den direkten klimawandelbedingten Betroffenheiten der eigenen Sektoren, auch die möglichen indirekten Folgen zu berücksichtigen, „die von anderen Sektoren ausgehen, zu denen systemrelevante Abhängigkeiten bestehen“ (Groth et al. 2023: 300).

Drittens verortet sich neben Infrastrukturbetreibern, durch den KRITIS-Grundsatz im ROG, auch die Raumplanung innerhalb des Aufgabenbereichs des KRITIS-Schutzes. Gleichzeitig zeigen sich verschiedene Handlungsfelder im Bereich der Berücksichtigung raumrelevanter Klimawandelfolgen insbesondere hinsichtlich vorbeugendem Hochwasserschutz und dem Schutz thermisch betroffener Siedlungsgebiete im Bereich der Raumplanung. Der Climate-Proofing-Ansatz und dessen normative Integration in das BauGB ermöglichen zudem, die daraus resultierende Perspektive der Klimaanpassung und des Klimaschutzes auch im KRITIS-Kontext auf Ebene der kommunalen Bauleitplanung im Sinne einer doppelten Schutzperspektive (Diller et al. 2023) zu analysieren.

Der Einordnung der konzeptionellen Grundlagen folgt nun eine Analyse der Verschneidung der Themenkomplexe KRITIS im Klimawandel im Zusammenhang mit raumplanerischer Steuerung. Dies erfolgt zum einen zur Adressierung des ersten Forschungsziels, in dessen Rahmen analysiert wird, wie KRITIS-Schutz in Zusammenhang mit Klimawandelfolgen in hessischer Raumplanung berücksichtigt wird. Zum anderen wird darauf folgend Forschungsziel 2 adressiert, i.d.S. als dass Hürden, die eine Umsetzung des KRITIS-Schutzes begleiten, analysiert werden.

3. KRITIS im Klimawandel in Hessen: Status quo und Hürden in raumplanerischer Steuerung

Die Anpassungsfähigkeit und Resilienz kritischer Infrastrukturen gewinnt angesichts der Auswirkungen des Klimawandels auf ihre Funktions- und Leistungsfähigkeit zunehmend an Bedeutung (Huddleston et al. 2022: 67, 70; Forzieri et al. 2017: 97). Hierbei werden KRITIS i. d. R. für langfristige Lebensdauern konzipiert und gebaut, was sie schneller auftretenden Ereignissen, wie bspw. Sturmfluten, als auch langsamer fortschreitenden Ereignissen, bspw. dem Anstieg des Meeresspiegels, aussetzt (Huddleston et al. 2022: 67). Lange Lebensdauer von, und Vernetzungen unter KRITIS resultieren hierbei in einer zukünftigen Zunahme des Gefahrenpotentials beider Ereignisformen (Huddleston et al. 2022: 74).

Die Governance von KRITIS umfasst dabei unterschiedliche, oft fragmentierte Politikbereiche und Gebiete, sowie institutionell entflochtene Versorgungs(teil-)bereiche (Monstadt et al. 2019: 2353). Herausforderungen bestehen in diesem Kontext (vgl. Monstadt et al. 2019: 2355) zunehmend nicht mehr nur darin, die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen und das Ausmaß der dadurch verursachten Schäden zu verringern, sondern auch darin, die soziale und technische Bereitschaft und Resilienz zu erhöhen, die erforderlich sind, um mit Infrastrukturausfällen umzugehen und flexible Reaktionen auf Störungen zu mobilisieren.

Mit der Einführung des KRITIS-Grundsatzes in das Raumordnungsgesetz 2008 trug der Gesetzgeber auch der räumlichen Planung auf, den Belang des Schutzes kritischer Infrastrukturen im Rahmen von Abwägungen zu berücksichtigen (Riegel 2015: 2). Während KRITIS somit durch den Grundsatz in § 2, Abs. 2, Nr. 3, S. 4 ROG („Dem Schutz kritischer Infrastrukturen ist Rechnung zu tragen“) raumplanerisch zu berücksichtigen sind, wurde in diesem Zusammenhang mitunter jedoch kritisiert, dass der Gesetzgeber diesen Abwägungs- und Berücksichtigungsauftrag „ohne [...] die Rolle der Raumplanung im Verhältnis zur Gesamtheit der Aufgabe [des] Schutz[es] Kritischer Infrastruktur näher [zu] untersuch[en] und beschr[eiben]“ (Riegel 2015: 2) formulierte.

Entsprechend dieser Ausgangshürde und zudem durch die Komplexität und Abstraktheit des durch den Grundsatz entstehenden Auftrags an Planungsträger, sowie fehlender Operationalisierungs- und Handlungsansätze (Schmitt 2020: 49), mangelt es derweil an einer Überführung des Grundsatzes in die raumordnerische Praxis. Festzuhalten ist hierbei, dass der ROG-Grundsatz zum KRITIS-Schutz „aufgrund seiner definitorischen wie inhaltlichen

Uneindeutigkeit derzeit weder in einer anlagen- noch in einer systembezogenen Perspektive zu helfen [vermag]“ (Schmitt 2020: 49).

Auch beispielsweise der Aspekt der Kaskadeneffekte, zentrales Element in der Schutzperspektive auf KRITIS, kann vor allem in szenariohaften Betrachtungen für umfassend definierte Einzelfälle ermittelt werden (BMVI 2017: 39). Das BMVI stellt außerdem fest, dass dies „keine Aufgabe für Raumordnungs-, sondern für die Katastrophenschutzbehörden, die solche Betrachtungen regelmäßig für ihre Einsatzplanungen anstellen [ist]“ (BMVI 2017: 39). Der Zugang der Raumordnung im Umgang mit KRITIS wird weitergehend als der „räumlich bestimmbare physische Standort der Infrastrukturen, nicht aber die systemische Bedeutung der einzelnen Netzelemente, weil sich diese, wie das oben beschriebene Beispiel zeigt, mindestens deutschlandweit, wenn nicht sogar europaweit erstrecken können“ (BMVI 2017: 39), beschrieben.

Trotz dieser grundsätzlichen Herausforderungen im Zugang der Raumordnung im Speziellen und der räumlichen Planung im Allgemeinen zum Schutz von KRITIS bleibt der Grundsatz im ROG bestehen und ist fortlaufend Gegenstand der Betrachtung von Planungsakteuren, bspw. im Neuaufstellungsprozess von Regionalplänen.

Dieses Kapitel verfolgt gemäß der skizzierten Forschungs- und Praxisproblematik das Ziel, am Beispiel des Landes Hessen zum einen den Status quo hinsichtlich der Umsetzung des Schutzes von KRITIS vor Klimawandelfolgen zu untersuchen und zum anderen Herausforderungen in diesem Zusammenhang zu analysieren. Aufgrund der Neuaufstellung der drei betrachtbaren Regionalpläne in Hessen, ergibt sich hier ein Möglichkeitsfenster zu betrachten, wie Akteure den KRITIS-Schutz auch in der Neuaufstellung der Planwerke umsetzen.

Zunächst erfolgt hierzu eine Darstellung des Forschungsstandes zum KRITIS-Schutz in der räumlichen Planung. Der Aufstellung des Forschungsstandes folgen zunächst eine Darstellung der die Untersuchung anleitenden Forschungsfragen, sowie danach eine Darstellung des methodischen Konzepts des Kapitels. Im Anschluss daran erfolgt die empirische Untersuchung, die Diskussion der Ergebnisse und ein das Kapitel abschließende Zwischenfazit.

3.1. Der KRITIS-Schutz in räumlicher Planung

Im Aufgabenbereich der räumlichen Planung wird der Schutz von KRITIS grundsätzlich im Zusammenhang mit nachhaltiger räumlicher Entwicklung gesehen, welche als nicht denkbar beschrieben wird, „ohne dass Ziele der Krisenresistenz und der Resilienz verfolgt bzw. zumindest nicht konterkariert werden“ (Riegel 2015: 78). Fachplanungen haben dabei prinzipiell vorrangig die Durchführbarkeit ihrer Vorhaben bzw. „mögliche Beeinträchtigungen des eigenen Zuständigkeitsbereiches durch ein Vorhaben“ (Riegel 2015: 78) in ihrer Verantwortung, während die Regionalplanung „in der Regel das Gesamtgefüge der Raumfunktionen und Nutzungen im Blick“ hat (ebd.).

Riegel (2015) führte im Zusammenhang mit einer Untersuchung zur Berücksichtigung des Schutzes von KRITIS in der Raumplanung eine quantitative Umfrage bei regionalen Planungsträgern durch, an welcher 64 von 111 Regionen teilnahmen (ebd.: 119). Erste Erkenntnis dieser Umfrage besteht zunächst darin, dass der Schutz von Infrastrukturen eine überwiegend öffentliche Aufgabe darstellt, wenn auch die Betreiber primär in der Verantwortung der Sicherheit der Infrastrukturversorgung stehen (Riegel 2015: 106). Ergebnis ist weitergehend die Erkenntnis, dass die Regionalplanung in der KRITIS-Schutz Thematik eine koordinierende Rolle übernehmen sollte, es sich jedoch bislang „kein ausreichendes Problembewusstsein herausgebildet hat“ (Riegel 2015: 106).

Riegel (2014: 28-29) argumentiert weiterhin, dass soziale, wirtschaftliche oder ökologische Bedürfnisse Vorrang vor KRITIS - Schutz - Argumenten haben können, wenn bspw. die Bündelung von Energie- und Verkehrsinfrastruktur beibehalten wird, um natürliche Ressourcen vor Fragmentierung, also z. B. Zerschneidungen zu schützen, obwohl eine KRITIS-Schutz-Perspektive empfiehlt, diese Bündelung zu vermeiden. Letzteres insbesondere aus dem Aspekt der geographischen Interdependenzen heraus, als insofern „mehrere unmittelbar nebeneinanderliegende Infrastrukturen demselben gefährlichen Ereignis ausgesetzt sein können“ (Krings 2020: 580). Riegel betont weitergehend, dass es trotz bestehender Einschränkungen unerlässlich ist, das KRITIS-Bewusstsein in die Raumplanung zu integrieren und die regionale Widerstandsfähigkeit durch die Widerstandsfähigkeit der Infrastruktur langfristig zu verbessern (Riegel 2014: 29).

Herausgehend aus dem Handlungsbedarf, geeignete Methoden zu entwickeln, um „die Vernetzung der Systeme verschiedener Sektoren und Teilsysteme auf einem angemessenen

Abstraktionsniveau abzubilden und einzuschätzen“ (Riegel 2015: 123) entwickelte Riegel einen Modellansatz mit dem Ziel der „Lokalisierung von Bereichen mit einer hohen räumlichen Dichte von wichtigen Infrastrukturen, sei es durch eine Parallelführung an Trassenkorridoren oder durch die Überkreuzung von Infrastrukturtrassen“ (Riegel 2015: 126). Der entwickelte Modellansatz diente dazu, regionale Schwerpunkte zu identifizieren, in welchen unterschiedliche Infrastrukturen räumlich akkumuliert dargestellt und diese Information mit einer Einschätzung zur Kritikalität verschnitten wurden, wodurch im Ergebnis Aussagen zu „besonders sensiblen Bereichen für die Infrastrukturversorgung in einer Region getroffen werden“ (Riegel 2015: 165). Limitationen des Ansatzes sind primär dahingehend zu sehen, dass Aussagen hinsichtlich tatsächlicher Konsequenzen von Infrastrukturausfällen oder Störungen sowie bspw. Kaskadenentwicklungen nicht getroffen werden können (Riegel 2015: 165). Hierzu wird die Erforderlichkeit von System- oder Ausbreitungsanalysen hervorgehoben, welche der von Riegel entwickelte statische räumliche Ansatz nicht inkludiert (Riegel 2015: 165). Dies ist weitergehend im Zusammenhang der Einschätzung des BMVI zu sehen, insofern als dass Kaskadeneffekte „immer nur in szenariohaften Betrachtungen für umfassend definierte Einzelfälle definiert werden [können]“, was v. a. in den Aufgabenbereich der Katastrophenschutzbehörden fällt (BMVI 2017: 39). Das BMVI kommt zudem zu dem Schluss, dass sich der primäre Zugang der Raumordnung im Umgang mit KRITIS durch den „räumlich bestimmbaren physischen Standort der Infrastrukturen“ (BMVI 2017: 39) definiert, auch aus der Logik, dass sich systemische Bedeutungen einzelner Netzelemente mitunter national, außerdem kontinental erstrecken können. Das Erstrecken von Ereignissen über große Distanzen und administrative Grenzen wird mitunter als „Auseinanderklaffen von Problemraum und Aufgabenwahrnehmung“ umrissen (BMVI 2017: 38; Krings 2020: 581).

Der Frage der Erfassung systemischer Interdependenzen widmet sich weitergehend Schmitt (2020), auf deren Erkenntnisse im Folgenden in Kürze eingegangen werden soll. Ziel ihrer Untersuchung war es, einen Operationalisierungsansatz des systemischen Kaskadenpotentials zu entwickeln, welcher Grad und Enge der Subsystem-Vernetzungen misst und „Möglichkeit und Stärke eines sich potenziell über das KRITIS-Wirkungsgefüge ausbreitenden Kaskadeneffekts über die Zeit“ (Schmitt 2020: ii) ermittelt. Die Berechnung des systemischen Kaskadenpotenzials folgt im Zusammenhang der Untersuchung der deskriptiv-statistischen Auswertung einer Online-Umfrage (n = 103) mit Akteuren von KRITIS-Teilsektoren. Grundlage des Operationalisierungsansatzes ‚systemisches Kaskadenpotential‘ stellt die

Multiplikation der Faktoren ‚Position der Subsysteme‘ (als Rolle eines jeden Subsystems innerhalb des Wirkungsgefüges des KRITIS-SoS) sowie als zweiter die Stärke und die zeitliche Entwicklung von Abhängigkeiten (Schmitt 2020: 134). Das rechnerische Ergebnis stellt die Möglichkeit und Stärke der systeminternen Ausbreitungen eines potenziellen Kaskadeneffekts dar (Schmitt 2020: 134). Das systemische Kaskadenpotential wird somit als Instrument zur Messung von systemischer Kritikalität eingeführt, was wiederum als „Relevanz einer kritischen Infrastruktur aufgrund ihrer Positionierung innerhalb des Systems“ definiert wird (Kruse et al. 2021: 1).

Kruse et al. 2021 betonen in ihrer Arbeit zur systemischen Kritikalität zum einen die gesetzliche Verantwortung von Raumplanungsbehörden, die Landnutzung in ihrem Zuständigkeitsbereich zu verantworten, zum anderen aber auch die notwendige Berücksichtigung der physischen Komponente von KRITIS i. S. d. folgenbasierten Kritikalität (ebd.: 12). Weiterhin betonen die AutorInnen die Problematik, dass Kaskadeneffekte auch außerhalb definierter Planungsgebiete auftreten können, während räumliche Planung im Rahmen der festgesetzten administrativen Grenzen agiert, somit oft keine gesamten Netzwerke erfasst, als auch über keine geeigneten Informationen zur Erfassung systemischer Kritikalität verfügt (ebd.). Diese systemische Perspektive, auch i. S. d. beschriebenen „problem[s] of fit“ (Schmitt 2020: 10), steht somit im Gegensatz bzw. Ungleichgewicht zur flächenorientierten Sichtweise der Raumplanung (Birkmann et al. 2016: 10, Greiving et al. 2016: 7, Kruse et al. 2021: 12).

Systemische Kritikalität als inhärentes Charakteristikum von KRITIS zeigt sich somit nur indirekt im Handlungsspielraum räumlicher Planung. Dennoch besteht in § 2, Abs. 2, Nr. 3, S. 4 ROG, KRITIS-Schutz ein Grundsatz der Raumordnung und KRITIS-Schutz ist somit eine Frage raumplanerischen Handelns.

Der Forschungsbedarf, welcher aus den skizzierten Aspekten heraus adressiert und im Folgenden behandelt wird, besteht somit darin, vor dem Hintergrund definitioneller und inhaltsbezogener Ambiguität der Umsetzung des KRITIS - Schutz - Grundsatzes, die Multidimensionalität von Klimawandelfolgen in ihren Auswirkungen auf den Schutz KRITIS in Zusammenhang mit raumplanerischem Handeln zu untersuchen. Zielstellung ist es weitergehend, eine qualitative Sicht auf den Handlungsspielraum und bestehende Hürden in der Umsetzung des KRITIS - Schutzes, im zeitlichen Zusammenhang mit der Neuaufstellung der Regionalpläne im Land Hessen zu werfen. Im Folgenden sollen darauf aufbauend die das Kapitel anleitenden Forschungsfragen dargestellt werden.

3.2. Forschungsfragen

Aufbauend auf den dargestellten Forschungsstand und der Darstellung des Forschungsbedarfs sollen im Folgenden die Forschungsfragen aufgestellt werden, welche die Untersuchung anleiten.

Zunächst ist zu erkennen, dass durch die Arbeiten von Riegel (2015) und Schmitt (2020) deutschlandweite quantitative Befragungen durchgeführt wurden, welche ergaben, dass sich die räumliche Planung i. A. als eine relevante Akteurskonstellation darstellt, der KRITIS - Grundsatz des ROG allerdings noch nicht vollständig operationalisiert wurde. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich der Bedarf qualitativer Forschung am Beispiel eines konkreten Bundeslandes, wie der KRITIS - Grundsatz in der Praxis umgesetzt wird. Forschungsfrage 1 lautet daher:

F1.1: Worin besteht der Handlungsrahmen im Kontext der raumplanerischen Steuerung von KRITIS vor dem Hintergrund des Klimawandels in Hessen?

Nach Identifikation des Handlungsrahmens, in welchem der KRITIS-Grundsatz operationalisiert wird, auch gerade im Zusammenhang mit der Neuaufstellung der hessischen Regionalpläne, liegt der zweite Forschungsbedarf darin, konkrete Hürden zu identifizieren, die den Handlungsspielraum limitieren. Forschungsfrage 2 lautet daher:

F1.2: Inwiefern stellen sich Hürden bei der Umsetzung des KRITIS - Grundsatzes in der hessischen Raumplanung dar?

Das Untersuchungsdesign, welches zur Untersuchung der Forschungsfragen entwickelt wurde, soll im Folgenden dargestellt werden.

3.3. Untersuchungsdesign und Methodik

Mit dem Ziel, den Status quo der Berücksichtigung des KRITIS-Schutzes, sowie den Handlungsrahmen und etwaige Hürden einzugrenzen, wurden leitfadengestützte Experteninterviews mit Planungsakteuren in Hessen durchgeführt. Diese Art der Erhebung zielt darauf ab, „spezifische Informationen über ein zu untersuchendes Phänomen zu generieren, die anderweitig nicht zu erhalten wären“ (Kaiser 2021: 36). Als ExpertInnen können nach Kaiser (2021: 47) zum einen gelten, „wer im weitesten Sinne verantwortlich ist im Prozess der politischen Problemlösung“ sowie „wer - aus welchen Gründen auch immer - über relevantes Wissen über den Prozess der politischen Problemlösung verfügt“. Auch wenn Kaiser (2021) diesen Begriff aus einer politikwissenschaftlichen Perspektive einordnet, kann diese Einordnung auch für die vorliegende Dissertation herangezogen werden.

Im Rahmen der Identifikation der interviewten ExpertInnen wurde die Datenerhebungsphase hierbei in Phase I, in welcher Interviews mit Akteuren der Landes- und Regionalplanung als auch der regionalen Flächennutzungsplanung geführt wurden, sowie in Phase II, wo mit dem BBSR und dem BBK, sowie ausgewählten raumbedeutsamen Fachplanungen gesprochen wurde, aufgeteilt. Tabelle 3 enthält hierzu eine Übersicht.

Datenerhebungsphase I

Interview-kürzel	Institution	Datum	Dauer
I02	HMWEVW (Landesplanung Hessen)	04.03.2024	1h 14 min
I01	RP Gießen (Regionalplanung Mittelhessen), 2 ExpertInnen	25.01.2024	40 min
I07	RP Darmstadt (Regionalplanung Südhessen)	12.04.2024	1h 22 min
I05	Regionalverband Frankfurt	11.03.2024	1h 49 min

Datenerhebungsphase II

I10	Bundesnetzagentur (Netzausbau)	15.05.2024	1h 01 min
I03	Bundesnetzagentur (Ausbau Stromnetze)	28.06.2024	53 min
I09	Hessen Mobil	18.04.2024	37 min

I04	BBSR	02.08.2024	59 min
I06	BBK, 2 ExpertInnen	21.08.2024	1h 35 min

Tabelle 3: Experteninterviews zu den Ebenen der Raumordnung, raumbedeutsamer Fachplanungen und weiterer Institutionen

Quelle: Eigene Darstellung

Zur Einschätzung der Thematik aus Sicht der Raumordnung fand in I02 ein Experteninterview mit der Landesplanung Hessen statt. Zur Analyse des Betrachtungsrahmens der Regionalplanung wurde zum einen ein Interview (I01) mit zwei ExpertInnen der Regionalplanung Mittelhessen und zum anderen ein Interview (I07) mit der Regionalplanung Südhessen durchgeführt². Da im räumlichen Kontext der Metropolregion FrankfurtRheinMain der regionale Flächennutzungsplan die Funktion des Regionalplans übernimmt, wurde weitergehend ein Experteninterview mit dem Regionalverband FrankfurtRheinMain (I05) vollzogen.

Subsumiert unter „Datenerhebungsphase II“ wurden als Beispiel raumbedeutsamer Fachplanung mit dem KRITIS-Sektor *Energie* zwei getrennte Experteninterviews mit der Bundesnetzagentur (I10 und I03) und für den KRITIS-Sektor *Transport und Verkehr* ein Experteninterview mit Hessen Mobil (I09) durchgeführt.

Um Institutionen in die Analyse mit einzubeziehen, welche inhaltliche Anknüpfungspunkte zum KRITIS - Schutz i. A. aufweisen, wurden außerdem zwei ExpertInnen des BBK (I06), sowie ein Experte des BBSR (I04) interviewt.

Die Vorbereitung der Experteninterviews erfolgte zunächst durch Erstellung eines Leitfadens. Hierbei wurde das SPSS-Verfahren zur Leitfadenerstellung nach Helfferich (2009: 182ff.) angewendet, bei welchem Fragen zunächst allgemein gesammelt, daraufhin geprüft, sortiert und in einen Leitfaden subsumiert werden³. Das Ziel, welches durch dieses Vorgehen verfolgt werden sollte, ist zum einen das qualitative Grundprinzip der Offenheit

² Ein Experteninterview mit dem Regierungspräsidium Kassel zur Betrachtung der regionalplanerischen Perspektive der Region wurde nach erfolgter Anfrage aus zeitlichen Kapazitätsgründen abgelehnt. Die empirische Betrachtung dieser Region beschränkt sich somit auf die textliche Analyse des sich in Neuaufstellung befindlichen Regionalplans.

³ Die in diesem Zusammenhang erstellten Leitfäden sind in den Anhängen 1-9 einsehbar.

zu wahren und gleichzeitig „dennoch die für das Forschungsinteresse notwendige Strukturierung vorzugeben (Helfferich 2009: 182).

Die nach dem SPSS - Verfahren erstellten Leitfäden wurden mit einer Vorlaufzeit von einer Woche vor dem Interview an die jeweiligen ExpertInnen versendet, um eine Vorbereitung des Interviews gewährleisten zu können. Zusätzlich zu den Leitfäden wurde jeweils eine von den ExpertInnen zu unterschreibende Einverständniserklärung versendet, welche das Einverständnis der Aufzeichnung, Verschriftlichung, Anonymisierung und Auswertung der Experteninterviews bestätigte. Diese wurde für alle in Tab. 3 aufgeführten Interviews unterzeichnet.

Nach Durchführung der Experteninterviews wurden diese im Anschluss transkribiert und unter Verwendung der Software MaxQDA inhaltsanalytisch ausgewertet.

Zur „ausreichend genaue[n] Verschriftlichung für die Anwendung der qualitativen Inhaltsanalyse“ (Kuckartz et al. 2024: 201) erfolgte die Transkription gemäß der Transkriptionsregeln für die computergestützte Auswertung gemäß Kuckartz et al. (2024: 200). Die Transkriptionen wurden fortlaufend anonymisiert, um einen direkten Rückschluss auf die konkreten interviewten Personen zu vermeiden (Kuckartz et al. 2024: 204).

Die Auswertung der Transkriptionen erfolgte entlang der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse gem. Kuckartz et al. (2024; im Folgenden verkürzt als „Inhaltsanalyse“ bezeichnet). Auf das Vorgehen soll im Folgenden kurz eingegangen werden, der Ablauf ist zudem auf Abb. 13 dargestellt.

Als Beginn der Inhaltsanalyse stellt in Phase 1 „das interessierte sorgfältige Lesen des Textes und das Markieren von besonders wichtig erscheinenden Textpassagen“ (Kuckartz et al. 2024: 133) den Beginn der Analyse dar. Das Ziel der Inhaltsanalyse ist darauf aufbauend, mittels Kategorien und Subkategorien eine inhaltliche Strukturierung der Daten zu erzeugen (ebd.)

In Phase 2 wurden Hauptkategorien deduktiv aus Forschungsfragen und auch den die Experteninterviews vorbereitenden Leitfäden entwickelt. Für die Hauptkategorien gilt entsprechend, „dass sie häufig mehr oder weniger direkt aus den Forschungsfragen abgeleitet werden können und die damit verbundenen Themen bereits bei der Erhebung von Daten leitend waren“ (Kuckartz et al. 2024: 133).

Aus urheberrechtlichen Gründen wurde die Abbildung in der digitalen Version entfernt.

Abbildung 13: Vorgehen im Rahmen der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse

Quelle: Kuckartz et al. 2024: 132, leicht modifiziert

Die Hauptkategorien, welche im Rahmen dieses Kapitels erstellt wurden, sind gemäß des grundsätzlichen Forschungsinteresses: „Bezug der ExpertInnen zum KRITIS-Schutz“, „Berücksichtigung des Klimawandels im Zusammenhang mit KRITIS“, „Handlungsrahmen (Status quo)“, „Hürden im Rahmen der planerischen Steuerung von KRITIS“, „Handlungsbedarf (weitergehender) und -Möglichkeiten“, sowie „Multiebenengovernance von KRITIS“.

Im ersten Codierprozess, Phase 3, wurde die jeweilige Transkription sequenziell, also „d. h. Zeile für Zeile, vom Beginn bis zum Ende“ (Kuckartz et al. 2024: 134) durchgegangen und Textabschnitte den Kategorien zugewiesen.

In Folge dieses ersten Codierprozesses erfolgte eine induktive Ausdifferenzierung der deduktiv generierten Kategorien (Phase 4, vgl. Kuckartz et al. 2024: 138), wobei dies direkt in MaxQDA erfolgte. Als zweiter Codierprozess wurden die Transkriptionen darauf folgend in

Phase 5 mit den entwickelten Subkategorien codiert (Kuckartz et al. 2024: 142). In Phase 6, in Kuckartz et al. (2024: 132) als „einfache und komplexe Analysen“ betitelt, stehen die Themen und Subthemen im Mittelpunkt des Auswertungsprozesses (Kuckartz et al. 2024: 147). Im Rahmen der empirischen Untersuchung (Kap. 3.4) wird primär mit der kategorienbasierten Analyse entlang der Hauptkategorien gearbeitet (vgl. Kuckartz et al. 2024: 148). Gemäß der Forschungsfragen erfolgt die Analyse hauptsächlich entlang der Kategorien „Handlungsrahmen (Status quo)“, „Hürden“, sowie „Handlungsbedarf- und Möglichkeiten“, jeweils im Zusammenhang mit der planerischen Steuerung von KRITIS.

Die Verschriftlichung der Ergebnisse (Phase 7, Kuckartz et al. 2024: 154) erfolgt nun entsprechend als empirische Untersuchung im Folgenden Kapitel.

3.4. Empirische Untersuchung

Die empirische Untersuchung wird zunächst in die zentralen Bereiche *Handlungsrahmen* und *Hürden* der Umsetzung des KRITIS-Schutzes in hessischer Raumplanung ausdifferenziert. Der Untersuchung folgt die Diskussion der Ergebnisse und ein daran anschließendes Zwischenfazit.

3.4.1. KRITIS-Schutz in hessischer Raumplanung - Handlungsrahmen

Zur Betrachtung des Handlungsrahmens, im Sinne des Status quos der Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes in hessischen Raumordnungsplänen soll im Folgenden zunächst betrachtet werden, in welcher Form der KRITIS - Grundsatz in den rechtskräftigen Plänen und im Vergleich dazu in den Plänen, die sich in Neuaufstellung befinden, Berücksichtigung findet. Es wird hierbei zunächst der Landesentwicklungsplan Hessens betrachtet, darauf folgend der Regionalplan Nordosthessen, der Regionalplan Mittelhessen und der Regionalplan Südhessen. In die Betrachtung dieser Planwerke werden entsprechend ebenenspezifisch die Erkenntnisse der durchgeführten Experteninterviews integriert.

In der zum Zeitpunkt der Anfertigung der Dissertation zur Verfügung stehenden Lesefassung des Landesentwicklungsplans Hessen 2020 findet sich der Begriff „kritische Infra-

struktur“ in der Begründung zur Gebietskategorie „Vorranggebiet für vorbeugenden Hochwasserschutz“ (vgl. Tab. 4). Unter Betonung des Vorrangs des vorsorgenden Hochwasserschutzes vor entgegenstehenden Raumnutzungen wird darauf hingewiesen, dass ins. „kritische Infrastrukturen (Definition siehe Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen 2009) von den jeweiligen Eigentümern bzw. von den für die Infrastrukturen verantwortlichen Akteuren hinsichtlich ihrer konkreten Hochwassergefährdung zu prüfen und soweit geboten durch bauliche und technische Maßnahmen an die Hochwassergefahren anzupassen [sind] (siehe BMUB 2015: Hochwasserschutzfibel. Objektschutz und bauliche Vorsorge). Neu- und Umbauten in diesen Gebieten sind in einer hochwasserangepassten Weise auszuführen.“ (Landesplanung Hessen 2020: 82). Die Begründung erfolgt hierbei zu den Punkten 4.2.4-9 bis 4.2.4-12. Zur Eingrenzung des KRITIS - Begriffs bezieht sich die Festlegung hierbei auf die nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen aus dem Jahr 2009 (vgl. Kap 2.1.4, ebd.).

Planwerk	Quelle	Gebietskategorie	KRITIS-Bezug	Handlungs-auftrag
LEP Hessen	S. 82	VRG vHW-S (Begründung)	„Vor dem Hintergrund der mit Hochwasserereignissen i. d. R. verbundenen hohen Schadenssummen bzw. Nutzungseinschränkungen sind bestehende Gebäude und Infrastrukturen, insbesondere kritische Infrastrukturen (Definition siehe Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen 2009) von den jeweiligen Eigentümern bzw. von den für die Infrastrukturen verantwortlichen Akteuren hinsichtlich ihrer konkreten Hochwassergefährdung zu prüfen und soweit geboten durch bauliche und technische Maßnahmen an die Hochwassergefahren anzupassen (siehe BMUB 2015: Hochwasserschutzfibel. Objektschutz und bauliche Vorsorge)“	• Prüfung und Anpassung auf HW-Gefahren durch Eigentümer/ für Infrastruktur verantwortliche Akteure

Tabelle 4: KRITIS-Bezug im LEP Hessen (Planungsebene: Landesplanung Hessen)

Quelle: Eigene Darstellung

Auf Ebene der Landesplanung wird hierbei die „grobe Flughöhe“ (I02: 16) beschrieben, auf welcher agiert wird. Die Aufgabe der Raumordnung wird in diesem Zusammenhang als Sicherung von Flächen für bestimmte Infrastrukturen, insbesondere die konfliktarme Flächensicherung charakterisiert (I02: 4). Skizziert wird außerdem, dass fehlende Zuständigkei-

ten auf bestimmte weitere Teile des KRITIS-Systems den Einfluss der Raumordnung und somit auch deren Handlungsspielraum einschränkt:

„Wenn man [als] kritische Infrastruktur [...] Landwirtschaft nimmt, also die Versorgung mit Lebensmitteln, die ist jetzt auch nicht, sage ich mal, in Gefahr. Aber natürlich wird sie stark beeinträchtigt und beeinflusst. Aber das sind halt teilweise so Bereiche, wo die Raumordnung einfach keine Zuständigkeit hat. Also wie gesagt, das Problem ist, wir machen Vorgaben in der Regel für die Regionalplanung, dass sie eben Raum, also Flächen in der Zuordnung entsprechend sichert oder ordnet. Aber was dann tatsächlich auf der Fläche genau passiert, wissen wir nicht.“ (I02: 16)

Großräumige Infrastrukturen, wie bspw. Stromtrassen liegen hierbei in der Hand der Fachplanungen, deren Planungsstände durch die Landesplanung in Raumordnungspläne übernommen werden (I02: 8, I02: 28). Während, so auch die Erwähnung im Landesentwicklungsplan 2020, Steuerungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit Hochwasservorsorge am größten gesehen werden, wird zum Beispiel die Zuständigkeit hinsichtlich des Schutzes vor Starkregenereignissen primär auf kommunaler Ebene verortet (I02: 4).

Auch die zum Zeitpunkt der Erstellung der Dissertation in Offenlage befindlichen neu-aufgestellten Regionalpläne Nordost-, Mittel- und Südhessen ordnen den Schutzbedarf kritischer Infrastrukturen in vergleichbaren Gebietskulissen ein.

Während der bestehende Regionalplan Nordosthessen (Rechtskraft 2009) keinen direkten Bezug auf KRITIS nimmt, bezieht sich die Offenlage des Regionalplans Stand: September 2024 in der Begründung zu Punkt 4.1.5 Ziel 1 auf KRITIS (vgl. Tab. 5).

Planwerk	Quelle	Gebiets-kategorie	KRITIS-Bezug	Handlungs-auf-trag
RegP Nord-ostH (Rechts-kraft 2009)	-	-	Kein direkter Bezug auf KRITIS	-

RegP Nord- ostH (Vorent- wurf)	S. 113	VRG vHW-S (Begrün- dung)	„Um Schäden durch Überschwemmungen zu verhindern, sind Vorranggebiete für vorbeugenden Hochwasserschutz von gegenüber Hochwasser sensiblen Raumnutzungen freizuhalten (z. B. Freiflächenphotovoltaik-Anlagen). Dies gilt vor allem für sogenannte <u>Kritische Infrastrukturen</u> , die wegen ihrer herausragenden Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen besonders schutzwürdig sind. Werden beispielsweise wichtige Transportwege in ihrer Funktion beeinträchtigt oder fallen ganz aus, kann dies nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere schwerwiegende Folgen haben. Bestehende Gebäude und Infrastrukturen (insbesondere Kritische Infrastrukturen) sind – soweit geboten – durch bauliche und technische Maßnahmen an die Hochwassergefahren anzupassen. Neu- und Umbauten in Vorranggebieten für vorbeugenden Hochwasserschutz sind in einer hochwasserangepassten Weise auszuführen.“	• Freihaltung von gegenüber HW-sensiblen Raumnutzungen • Anpassung des Bestands durch bauliche/technische Maßnahmen (soweit geboten) • Neu- und Umbau in HW-angepasster Weise
	S. 115	VBH vHW-S (Begrün- dung)	„Beispielsweise unterliegen vulnerable soziale Infrastrukturen (z. B. Seniorenheime, Krankenhäuser, Kindertagesstätten) oder <u>Kritische Infrastrukturen</u> einer besonderen Schutzwürdigkeit (vgl. Begründung zu 4.1.5 Ziel 1). Sie sollten deshalb nicht in Bereichen errichtet werden, die bei Hochwasser überschwemmt werden. Bestehende Infrastrukturen mit besonderer Schutzwürdigkeit sollten hinsichtlich ihres konkreten Hochwasserrisikos geprüft und – soweit erforderlich – an die Hochwassergefahren angepasst werden. Erweiterungen sollen in den Gefahrenbereichen unterbleiben.“	• Bestand: Prüfung auf HW-Risiko • Bestand: Anpassung an HW-Gefahren (soweit erforderlich) • Erweiterungen sollen unterbleiben

Tabelle 5: KRITIS-Bezug im Regionalplan Nordosthessen (Planungsebene: Regionalplanung)

Quelle: Eigene Darstellung

In der Begründung wird festgehalten, dass zur Verhinderung von Schäden durch Überschwemmungen, VRG für vorbeugenden Hochwasserschutz von gegenüber Hochwasser sensiblen Raumnutzungen freizuhalten sind. Betont wird, dass dies v.a. für sogenannte „kritische Infrastrukturen [gilt], die wegen ihrer herausragenden Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen besonders schutzwürdig sind“ (Regierungspräsidium Kassel 2024: 113). Als Beispiel wird infolgedessen die Funktionsbeeinträchtigung oder der Ausfall wichtiger Transportwege beschrieben, welche „nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Stö-

rungen der öffentlichen Sicherheit oder andere schwerwiegende Folgen“ (ebd.) verursachen kann. Weitergehend wird betont: „Bestehende Gebäude und Infrastrukturen (insbesondere Kritische Infrastrukturen) sind – soweit geboten – durch bauliche und technische Maßnahmen an die Hochwassergefahren anzupassen“ (ebd.).

Weitere Berücksichtigung finden KRITIS in der Begründung zu Punkt 4.1.5 Grundsatz 1 zu Vorbehaltsgebieten für vorbeugenden Hochwasserschutz.

Im Rahmen der Begründung des Grundsatzes wird u. a. der Aspekt der Schadenspotenzialreduktion angesprochen. Hierbei wird in Bezug zum BRPH beschrieben, dass solche Potenziale verringert werden können, „indem eine differenzierte Risikobetrachtung erfolgt, bei der zum Beispiel die Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit, aber auch die Schutzwürdigkeit der geplanten Nutzung betrachtet wird“ (Regierungspräsidium Kassel 2024: 115). Schutzwürdigkeit wird in diesem Kontext näher eingegrenzt, indem darauf hingewiesen wird, dass vulnerable soziale Infrastrukturen, (Seniorenheime, Krankenhäuser und Kindertagesstätten werden hier beispielhaft genannt) oder KRITIS einer solchen unterliegen (ebd.).

Auch der Regionalplan Mittelhessen befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung der Dissertation in Neuauflage, wobei sich hier auf den Entwurf zur Beteiligung gem. § 6 Abs. 2 und 3 HLPG i.V.m. § 9 ROG bezogen wird (Stand 23.09.2021) (vgl. Tab. 6).

Vergleichbar mit dem Entwurf des Regionalplans Nordosthessen finden auch hier KRITIS eine Erwähnung in den jeweiligen Begründungen zu VRG und VBG für vorbeugenden Hochwasserschutz.

Primär wird die besondere Schutzwürdigkeit von KRITIS vor dem Hintergrund von Punkt 6.4.1-1 betont.

Planwerk	Quelle	Gebiets- kategorie	KRITIS-Bezug	Handlungs-auf- trag
RegP MittelH (Rechts- kraft 2010)	-	-	Kein direkter Bezug auf KRITIS	-
RegP MittelH (Vorent- wurf)	S. 91-92	VRG vHW-S (Begrün- dung)	„Vor diesem Hintergrund haben sog. <u>Kritische In- frastrukturen</u> eine besondere Schutzwürdigkeit. Kritische Infrastrukturen sind Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwe- sen wie z. B. wichtige Transportwege oder Energie- trassen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebli- che Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden (vgl. „Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infra- strukturen“, BMI 2009). Bestehende Kritische In- frastrukturen sollen von den jeweiligen Eigentü- mern bzw. von den für die Infrastrukturen verant- wortlichen Akteuren hinsichtlich ihrer konkreten Hochwassergefährdung geprüft und, soweit gebo- ten, durch bauliche und technische Maßnahmen an die Hochwassergefahren angepasst werden. Pla- nungen neuer bzw. Erweiterungen bestehender Kritischer Infrastrukturen sollen in den Gefahren- bereichen unterbleiben (vgl. Ziel II.2.3 und Grund- satz II.3, BRPH).“	• Bestand: Prü- fung auf HW- Gefährdung durch Eigentü- mer/ für Infra- struktur verant- wortliche Ak- teure • Bestand: Anpas- sung durch bauli- che/technische Maßnahmen an HW-Gefahren (soweit geboten) • Planungen neu- er/Erweiterun- gen bestehender KRITIS sollten unterbleiben
	S. 93	VBH vHW-S (Begrün- dung)	„Auf die besondere Schutzwürdigkeit sog. Kri- scher Infrastrukturen wird bereits in der Begrün- dung zu 6.4.1-1 hingewiesen. Bestehende Kritische Infrastrukturen sollen hinsichtlich ihrer konkreten Hochwassergefährdung geprüft und, soweit erfor- derlich, an die Hochwassergefahren angepasst wer- den. Erweiterungen sollen in den Gefahrenberei- chen unterbleiben.“	• Bestand: Prü- fung konkreter HW-Gefähr- dung, Anpas- sung an HW- Gefahren (so- weit erforder- lich) • Erweiterungen sollten unter- bleiben

Tabelle 6: KRITIS-Bezug im Regionalplan Mittelhessen (Planungsebene: Regionalplanung)

Quelle: Eigene Darstellung

Definitivisch werden KRITIS als „Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen wie z. B. wichtige Transportwege oder Energietrassen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden (vgl. „Nationale

Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen“, BMI 2009)“ (Regierungspräsidium Gießen 2021: 88) eingegrenzt. Bestehende KRITIS sind dabei von den jeweiligen Eigentümern bzw. „von den für die Infrastrukturen verantwortlichen Akteuren hinsichtlich ihrer konkreten Hochwassergefährdung geprüft und soweit geboten durch bauliche und technische Maßnahmen an die Hochwassergefahren angepasst werden. Erweiterungen solcher Kritischer Infrastrukturen sollen in den Gefahrenbereichen unterbleiben“ (ebd.).

Des Weiteren wird auch im Grundsatz zu VBG für vorbeugenden Hochwasserschutz auf diesen Abschnitt verwiesen.

Neben dem Verweis auf die Begründung zu Punkt 6.4.1-1. sollen in VBG für vorbeugenden Hochwasserschutz, bestehende KRITIS „hinsichtlich ihrer korrekten Hochwassergefährdung geprüft und soweit erforderlich an die Hochwassergefahren angepasst werden. Erweiterungen sollen in den Gefahrenbereichen unterbleiben“ (Regierungspräsidium Gießen 2021: 89).

Die Rolle der Regionalplanung beim Schutz von KRITIS, wird in diesem Zusammenhang von den Befragten als unklar und begrenzt beschrieben (I01: 4). Dies ist insbesondere zusammenhängend mit dem Aspekt fehlender KRITIS-Definitionen, was eine regionalplanerische Integration des Schutzes erschwert (I01: 4, I01: 36). Entsprechend wird das Thema KRITIS, wie dargestellt, primär „abstrakt-verbal“ im Zusammenhang mit Hochwasserschutz behandelt, wobei der Schutzauftrag oft direkt an die Betreiber weitergegeben wird (I01: 4). Betont wird auch hier, dass sich Teile des KRITIS-Systems dem Einfluss regionalplanerischer Steuerung entziehen:

„Werden alle kritische Infrastrukturen in diesem Regionalplan abgebildet? Also wenn man jetzt [...] zum Beispiel ein großes Rechenzentrum als kritische Infrastruktur sieht, hat es keinen Berührungspunkt mit dem Regionalplan, weil es wird nicht dargestellt. Es verbirgt sich in einem Vorranggebiet Industrie und Gewerbebestand oder im Siedlungsbestand. Also da sind wir ja, was die Vorhabenebene angeht, sind wir ja völlig außen vor“ (I01: 34).

Der Regionalplan Südhessens / regionaler Flächennutzungsplan für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main befindet sich ebenfalls zum Zeitpunkt der Erstellung der Dissertation in Neuauflage (Stand 23.05.2025) (vgl. Tab. 7).

Planwerk	Quelle	Gebiets-kategorie	KRITIS-Bezug	Handlungs-auf-trag
RegP SüdH (Rechts- kraft 2011)	-	-	Kein direkter Bezug auf KRITIS	-
RegP SüdH (Vorent- wurf)	S. 192	FNP-Dar- stellung von Bauflä- chen in- nerhalb HQ ₁₀₀ (Begrün- dung)	„Vor diesem Hintergrund haben sogenannte Kriti- sche Infrastrukturen eine besondere Schutzwürdig- keit. Bestehende Kritische Infrastrukturen sollen von den für die Infrastrukturen verantwortlichen Akteuren hinsichtlich ihrer konkreten Hochwasser- gefährdung geprüft und soweit geboten durch bauli- che und technische Maßnahmen an die Hochwas- sergefahren angepasst werden.“	• Bestand: Prü- fung auf HW- Gefährdung durch für Infra- struktur ver- antwortliche Akteure • Bestand: Anpas- sung durch bauli- che/technische Maßnahmen an HW-Gefahren (soweit geboten)
	S. 193	VRG vHW-S (Begrün- dung)	„Um Schäden durch Überschwemmungen zu ver- hindern, sind Vorranggebiete für vorbeugenden Hochwasserschutz möglichst von gegenüber Hochwasser sensiblen Raumnutzungen freizuhal- ten. Dies gilt vor allem für sogenannte Kritische Infrastrukturen, die wegen ihrer wichtigen Bedeu- tung für das staatliche Gemeinwesen besonders schutzwürdig sind (siehe auch Ziel II.2.3 (Z) des Bundesraumordnungsplans Hochwasserschutz).“	• Freihaltung von gegenüber HW- sensiblen Raumnutzun- gen
	S. 194	VBH vHW-S (Begrün- dung)	„Hier soll insbesondere mit Hilfe von Hochwasser- gefahren- und risikokarten auf eine Verringerung der Schadenspotenziale hingewirkt werden. Gibt es für eine Siedlungsentwicklung keine Alternative außerhalb der durch Hochwasser gefährdeten Ge- biete, ist die Siedlungsentwicklung auf das notwen- dige Maß zu begrenzen und in einer an die Hoch- wassergefahr angepassten Weise umzusetzen. Auf- grund ihrer besonderen Schutzwürdigkeit sollten Kritische Infrastrukturen nicht in überschwem- mungsgefährdeten Bereichen errichtet werden.“	• KRITIS sollten nicht in über- schwemmungs- gef. Bereichen errichtet wer- den

Tabelle 7: KRITIS-Bezug im Regionalplan Südhessen (Planungsebene: Regionalplanung)

Quelle: Eigene Darstellung

Vergleichbar mit den beiden vorher betrachteten Regionalplänen finden sich hier auch KRITIS-Einordnung in den Flächenkulissen VRG und VBG für vorbeugenden Hochwasserschutz.

Vor dem Hintergrund der Verhinderung eines „weiteren Anstiegs der Schadensrisiken in überflutungsgefährdeten Gebieten“ (Regierungspräsidium Darmstadt 2025: 191) wird die besondere Schutzwürdigkeit kritischer Infrastrukturen betont. Nähergehend wird begründet, dass „[b]estehende Kritische Infrastrukturen [...] von den für die Infrastrukturen verantwortlichen Akteuren hinsichtlich ihrer konkreten Hochwassergefährdung geprüft und soweit geboten durch bauliche und technische Maßnahmen an die Hochwassergefahren angepasst werden“ sollen (ebd.).

In der Begründung zu Ziel Z7.3.1-3 erfolgt der Bezug zum BRPH, indem betont wird, dass VRG für vorbeugenden Hochwasserschutz „von gegenüber Hochwasser sensiblen Raumnutzungen freizuhalten sind“ (ebd.), was lt. Begründung v.a. für KRITIS gilt, „die wegen ihrer wichtigen Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen besonders schutzwürdig sind (siehe auch Ziel II.2.3 (Z) des Bundesraumordnungsplans Hochwasserschutz)“ (ebd.: 192).

Auch in der Begründung zu VBG für vorbeugenden Hochwasserschutz (G7.3.1-2 und G7.3.1-4) wird darauf hingewiesen, dass KRITIS nicht in überschwemmungsgefährdeten Bereichen errichtet werden sollten (ebd.: 193).

Auch im Rahmen dieses Plans befindet sich die Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes somit im Flächenkontext des Hochwasserschutzes, in abstrakt-verbaler Form jeweils in den Begründungen zu VRG und VBH. Als Eingrenzung des Handlungsspielraums wird hierbei nochmals die Rolle der Regionalplanung bei der großmaßstäblichen Sicherung von Flächen hervorgehoben:

„Und wenn man das Beispiel, also wir planen keine Kindertagesstätten, also das Planen, plant die Regionalplanung nicht. Wir sind auch kein eigener Planer, keine Fachplanung für Verkehrsplanung. Wir stellen zwar Verkehrsstrassen dar, ob Schiene, ob Straßen, wenn sie entsprechende Bedeutung haben, aber wir planen die nicht. Und es wäre natürlich wichtig (..) Die Fachplanung, sagen wir mal so, haben es jetzt eher dann auch im Auge zu gucken, wo müssen Sie oder wenn Sie eine Straße planen oder eine neue Autobahn irgendwas, dann spielt es natürlich eine Rolle, den Aspekt als kritische Infrastruktur im Auge zu haben. Dann muss man gucken, vor welchen Umweltgefahren es auch geht“ (I07: 18).

Wie aus der vergleichenden Darstellung der Neuauflagen der Regionalpläne hervorgeht, befinden sich KRITIS-Hinweise primär in den Begründungen zu Zielen und Grundsätzen der Gebietskategorien Vorrang- und Vorbehaltsgebiete des vorbeugenden Hochwasser-

schutzes. Dies deckt sich auch mit den Einschätzungen der ExpertInnen, welche den KRITIS-Schutz primär ebenfalls in Verbindung mit diesen Gebietskategorien sehen (I01: 4, I07: 20). Betont wird hierbei weiterhin, dass die Thematik durch die Erwähnung vor allem auf die kommunale Ebene „transportiert“ (I07: 26) wird. Abbildung 14 soll die Hinweise aus den Regionalplänen in Offenlage zusammenfassend visualisieren.

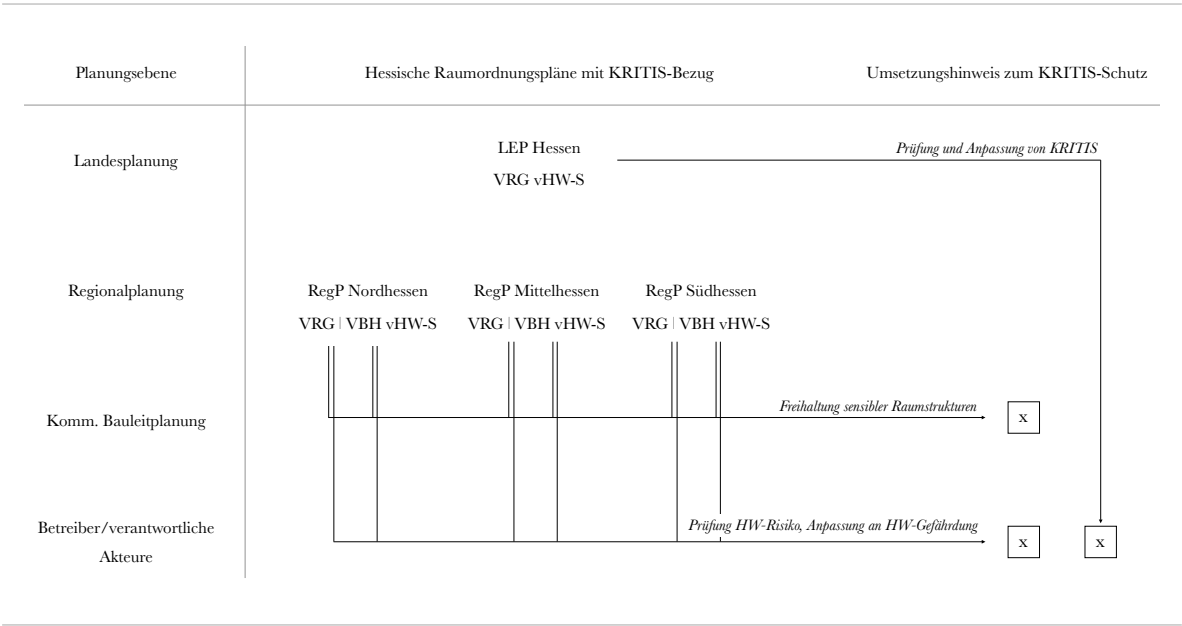


Abbildung 14: Systematik von KRITIS-Hinweisen in den hessischen Raumordnungsplan-Neuaufgaben

Quelle: Eigene Darstellung

Zentral ist dieser Aspekt ebenfalls für die Perspektive der Landesplanung, in welcher hervorgehoben wird, dass viele Zusammenhänge mit KRITIS in der Zuständigkeit der kommunalen Ebene liegen (I02: 16). Zuständigkeitsbelange sind außerdem in der Komplexität des KRITIS-System in Verbindung mit unzureichender Definition des Begriffs selbst zu betrachten. Betont wird hierbei die Vielfältigkeit der KRITIS-Felder, wobei die Einschätzung getroffen wird, dass diese zum großen Teil Bereiche umfassen, in welchen Raumordnung „tatsächlich gar keine Handlungsmöglichkeiten hat“ (I02: 4).

Die grundsätzliche Diskussion über Handlungsmöglichkeiten zeigt sich detaillierter in der Betrachtung des Spannungsfelds zwischen verschiedenen Planungsebenen, wo bspw. in der Regionalplanung nur abstrakt Dinge geregelt werden können, „die sich dann immer weiter konkretisieren und am Ende [...] derjenige, der am Standort etwas errichten will, entschei-

den und auch die Vorgaben einhalten [muss], die da sind“ (I03: 62). Auch die Festlegung von raumordnerischen Zielen stellt sich in diesem Zusammenhang als diffizil dar, als dass „sehr harte Kriterien“ (I03: 62) notwendig sind, um tatsächlich Ziele festlegen zu können. KRITIS - Erwähnungen, wie zuvor dargestellt, finden sich somit primär im textlichen Zusammenhang mit Begründungen zu regionalplanerischen Grundsätzen und nicht in Verbindung mit „verbindliche[n] Festlegung[en], dass wir da ein Ziel haben, wo sozusagen jemand sich daran ganz fest, strikt dran halten muss“ (I07: 20).

Die Rolle der Raumordnung wird somit primär darin gesehen, „Flächen für bestimmte Infrastrukturen zu sichern und vor allem die Flächen so zu sichern, dass sie eben möglichst konfliktarm sind“ (I02: 4). Dieser Aspekt wird im raumordnerischen Handlungsbereich primär im Zusammenhang mit Hochwasserschutz gesehen, der Schutz vor Starkregenereignissen wird vor allem im Kontext des kommunal-bauleitplanerischen Handlungsspielraum verankert (I02: 4). Im Zusammenhang mit Hochwasserschutz wird die Raumplanung in Deutschland als „eines der langfristigen und wirksamsten Instrumente [skizziert], um durch Bebauungsgebote zum Beispiel bei Überflutungszonen Risiken zu vermeiden“ (Fekete 2024: 265).

Im Bereich der raumbedeutsamen Fachplanungen, welche in der Erhebung berücksichtigt wurden⁴, stellt zudem technischer Basisschutz eine Priorität dar (I09: 36, I03: 30). So wird bspw. im Zusammenhang mit der Straßeninfrastruktur beschrieben, dass „durch entsprechende Dimensionierung, durch entsprechende Wahl von Rundungen, durch entsprechende Materialwahl hier die Resilienz erhöh[t]“ wird (I09: 36). Auch wird die Zielstellung angesprochen, dass, „sollte so ein Extremwetterereignis kommen, extreme Niederschläge zum Beispiel, dass danach sicherlich die Infrastruktur nicht zu 100 % unbeschädigt ist, aber dass sie nur solche Schäden davonträgt, dass man sie weiter nutzen kann [...]“ (I09: 6). Limitationen im KRITIS-Schutz bestehen in diesem Zusammenhang außerdem darin, dass das bestehende Netz nicht hinsichtlich verbundener weiterer KRITIS betrachtet wird, Interdependenzen zu Krankenhäusern, Seniorenresidenzen, oder Stromerzeugern (I09: 14) somit nicht in die Betrachtung der Netz-Resilienz einbezogen werden. Handlungsspielraum der straßenverkehrlichen Fachplanung in diesem Zusammenhang wird prinzipiell mit der Zielstellung verbunden, dass auf Grundlage einer Gefährdungsanalyse (Linke et al. 2022) so eingewirkt wird, dass „[...] sollte so ein Extremwetterereignis kommen, extreme Nieder-

⁴ vgl. Tab. 3, für den KRITIS Sektor Energie wurden zwei Experteninterviews mit der Bundesnetzagentur, für den KRITIS Sektor Transport und Verkehr eines mit Hessen Mobil geführt.

schläge zum Beispiel, dass danach sicherlich die Infrastruktur nicht zu 100% unbeschädigt ist, aber dass sie nur solche Schäden davonträgt, dass man sie weiter nutzen kann - das ist das Wichtigste“ (I09: 6).

Während Hessen Mobil die fachplanerische Zuständigkeit für das Straßenverkehrsnetz trägt, fungiert die BNetzA als Genehmigungsbehörde für länder- oder grenzüberschreitende Ausbauprojekte im Stromnetz, rein innerstaatliche Vorhaben bleiben hierbei in der Hoheit der Länder (I10: 2). Zentrales Kriterium im Sinne der Systemsicherheit besteht hierbei im N-1 Kriterium als „Grundprämisse der gesamten Netzberechnungen“ (I10: 12). Dies bedeutet, dass selbst „nach dem Ausfall eines Netzbetriebsmittels im Übertragungsnetz (z. B. Leitung oder Transformator), die weiterhin noch in Betrieb befindliche Netzinfrastruktur in der Lage ist, sich an die neue Lastflusssituation anzupassen, ohne dass hierdurch wiederum Netzbetriebsmittel in der eigenen oder angrenzenden Regelzone über den zulässigen Grenzwerte überlastet werden“ (BNetzA 2025: 14). Während sich Klimaresilienz der Infrastruktur als expliziter Begriff derweil nicht begrifflich in planerischen Grundlagen wiederfindet, ist sie aber durchaus implizit in verschiedenen Belangen enthalten (I10: 16). So können Masten bspw. in Überschwemmungsgebieten errichtet werden, wenn sie keine Barrierewirkung entfalten (I10: 16) und Erdkabel werden in 1,8 Metern Tiefe in solchen Gebietskulissen als meist unproblematisch beschrieben (I10: 22). Resilienz gegenüber Extremwetter wird hierbei primär im Aufgabenbereich der technischen Fachplanung, bzw. des Anlagenschutzes durch den Vorhabenträger gesehen:

„Also viel technischer Basisschutz, also der die technische Sicherheit und die Versorgungssicherheit. Sie werden, glaube ich, derzeit im Rahmen der Fachplanung, die wir betreiben, einfach vorausgesetzt. Ja, weil das auch ja kraft Gesetzes die Verantwortung des Netzbetreibers ist, für diesen sicheren Netzbetreiber Netzbetrieb und für die Ausfallsicherheit Folge zu leisten“ (I10: 48).

3.4.2. Hürden im Rahmen der Umsetzung des KRITIS-Schutzes in hessischer Raumplanung

In Folge der Darstellung des Handlungsspielraums im Rahmen der Umsetzung des KRITIS - Grundsatzes soll der Fokus im Folgenden auf Hürden, welche die Umsetzung eingrenzen, gerichtet werden.

Im Zusammenhang mit Hürden in der Umsetzung des KRITIS - Grundsatzes ist zunächst die grundsätzliche KRITIS - Definition bzw. deren Fehlen insofern von Belang, als dass betont wird, dass wenn auf Bundesebene KRITIS (noch) nicht definiert sind, auf Landesebene eine Definition ebenfalls als „schwierig“ beschrieben wird (I02: 12).

Eine fehlende verbindliche Definition von KRITIS ist hierbei eng mit einer Einschränkung des regionalplanerischen Handlungsspielraums und einer entsprechenden Unsicherheit verbunden, den Schutz von KRITIS „in den Plan [zu] bringen, ohne nicht vorher eine einheitlich festgelegte Definition der kritischen Infrastrukturen in Hessen oder dann eben für uns konkret in Mittelhessen zu haben“ (I01: 4), wie eine Expertin der Region Mittelhessen schildert. Auch der hohe Abstraktionsgrad vorhandener Handreichungen wie der hessischen KRITIS - Übersichtsliste, wird in diesem Zusammenhang hervorgehoben (I01: 42). Hierbei bestehen allerdings insofern teilweise unterschiedliche Perspektiven auf diesen Aspekt als Hürde, als dass z. T. auch skizziert wird, dass der KRITIS - Begriff bzw. seine Definition „nicht strittig“ sind (I02: 10), als auch dass die Problemlage nicht in der Definition selbst liegt (I07: 18), sondern inwieweit bspw. „regionalplanerisch Vorgaben [gemacht werden können]“ (ebd.).

In diesem Kontext wird somit nicht nur das Fehlen einer KRITIS-Definition, sondern auch das Fehlen einer „Definition der Gefahren, die im Hinblick auf den Klimawandel zu beachten sind“ (I01: 36) hervorgehoben. Diese situative Kritikalität als Einordnung, „wann eine natürliche Gegebenheit oder eine natürliche Gefahr kritisch ist“ (I02: 10), erscheint hierbei durch klare Reglementierungen im Hochwasserschutz und der entsprechenden Abgrenzung von Gefährdungsklassifikationen eindeutig (I02: 10), Unklarheiten bestehen allerdings bei der Einordnung anderer Gefährdungen, die mit dem Klimawandel zusammenhängen, wie bspw. im Zusammenhang mit Starkregen (I01: 36, I07: 20). Handlungsbedarf wird in diesem Kontext somit primär darin gesehen, Bewertungsrahmen für die Kritikalität solcher räumlicher Situationen zu entwickeln, woraufhin identifiziert werden kann, „wie tatsächlich die Raumordnung das so steuern sollte oder steuern kann, dass es eben keine kritische Situation darstellt“ (I02: 78). Entsprechend liegt die Frage v. a. darin, welche räumliche Gefahren für Infrastrukturen voll identifizierbar sind und Risiken entsprechend darauf folgernd über Lage oder Bauweise minimiert werden können (I03: 24).

Darüber hinaus ist der Handlungsspielraum übergeordneter Planungsebenen wie der Landes- und der Regionalplanung mit dem Aspekt, bzw. der Hürde, verbunden, KRITIS, insofern als solche bekannt, grundsätzlich im Planwerk darzustellen. Während z.T. Infrastruktura-

ren wie Schienentrassen, Autobahnen, oder Stromtrassen regionalplanerisch dargestellt werden (I01: 34), hat,

„wenn man jetzt zum Beispiel ein großes Rechenzentrum als kritische Infrastruktur sieht, [...] es keinen Berührungspunkt mit dem Regionalplan, weil es wird nicht dargestellt. Es verbirgt sich in einem Vorangebiet Industrie und Gewerbebestand oder im Siedlungsbestand“ (ebd.)“.

In Zusammenhang mit der KRITIS - Definitionshürde kristallisiert sich hierbei die Problematik heraus, dass zunächst unbekannt ist, welche Planungen die regionalplanerisch abgebildet werden sollen, als KRITIS gelten (I01: 34). Auch im Lichte dieser Problematik entziehen sich weitere potentielle KRITIS, wie bspw. Abfallentsorgungsanlagen, entsprechender Abbildungsmöglichkeiten im Regionalplan und entsprechendem planerischem Einfluss auf dieser Ebene (I01: 42).

Ein zweiter Aspekt, der in der Darstellung von KRITIS im Planwerk zu beachten ist, ist mit dem Sicherheitsverständnis von KRITIS verbunden. Während dies im Zusammenhang mit natürlichen Gefährdungskomplexen wie dem Klimawandel und Erdbeben, kein hohes Risiko darzustellen scheint, ist es im Kontext anthropogener Gefährdungskomplexe, wie bspw. Sabotageakte, durchaus ein als relevant zu beachtender Aspekt, was von einem Experten mit den Fragestellungen kommentiert wird: „Man kann sich natürlich auch fragen: Müssen diese Infrastrukturen alle frei erkenntlich sein? Kann jeder an jeder Karte sehen, was da ist und was es für eine Bedeutung hat?“ (I03: 26). Zum einen besteht hier die Betreiberperspektive aus Sicherheitsinteresse negativ gegenüber Veröffentlichung von KRITIS-Daten, zum anderen die Perspektive räumlicher Planung mit öffentlicher Auslegung von Planungsverfahren (I06: 43):

„Das heißt, es werden unheimlich viele Informationen, die von der einen Seite als sensitiv, als sicherheitsrelevant empfunden werden und niemand irgendwo lesen möchte, von der anderen Seite, einfach weil die Verfahren so vorsehen, für alle offen ausgelegt und transparent dargestellt. Und da haben wir ein völlig diametral unterschiedliches Interesse, was den Umgang mit dieser Information anbetrifft und auch unterschiedliche Kulturen des Umgangs damit“ (I06: 43).

Neben der öffentlichen Auslage von Planverfahren ist auch im Umgang mit Bestand eine Hürde im KRITIS-Schutz originär im gesetzlichen Handlungsrahmen der Raumplanung. So reduziert sich der Einfluss von Landes- als auch Regionalplanung auf den Umgang mit Neuplanungen und verzeichnet keinen Einfluss auf bereits bestehende Infrastrukturen (I01: 4, I02: 6).

3.5. Diskussion

Die Diskussion orientiert sich im Folgenden an den beiden in Kap. 3.2 aufgestellten Forschungsfragen.

Fl.1: Worin besteht der Handlungsrahmen im Kontext der raumplanerischen Steuerung von KRITIS vor dem Hintergrund des Klimawandels in Hessen?

Raumplanerische Steuerung wurde in der diesem Kapitel vorangestellten Analyse in eine Betrachtung der räumlichen Gesamtplanung, in Form der Raumordnung (Landesplanung in Hessen und den Regionalplanungen), sowie ausgewählten raumbedeutsamen Fachplanungen, in Form der Bundesnetzagentur für den Aspekt des Übertragungsnetzausbaus und Hessen Mobils für die Fachplanung des Straßennetzes, aufgegliedert.

Der Begriff KRITIS und somit die Berücksichtigung des § 2, Abs. 2, Nr. 3, S. 4 ROG zum Schutz von KRITIS wurde auf Ebene der hessischen Regionalplanung v.a. im Rahmen der Neuaufstellung der Regionalpläne betrachtet (I07: 20). Insbesondere die Sicherung von Flächen für bestimmte Infrastrukturen, sodass diese Flächen „möglichst konfliktarm“ (I02: 4) sind, wird als Aufgabenbereich in diesem Zusammenhang definiert.

Hierbei beeinflusst die Datengrundlage, welcher dieser Flächensicherung zugrunde liegt, den Handlungsrahmen raumordnerischer Steuerung: „[D]ie Raumordnung ist so gut, wie die Datengrundlage, die uns zur Verfügung steht (I02: 22)“. Bei klimawandelbezogenen Gefahren wird diese Datengrundlage im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen als sehr gut eingeschätzt (I02: 22). Klar definierte Schwellenwerte, wie bspw. HQ₁₀₀, führen dazu, dass auch entsprechende Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für vorbeugenden Hochwasserschutz räumlich abgegrenzt und raumordnerisch gesichert werden können. Weitergehend zeigt sich hier die Signifikanz situativer Kritikalität, definiert als die Frage wann eine natürliche Gefahr kritisch ist (I02: 10), entsprechenden Flächenkategorien zu Grunde zu legen, was im Bereich des vorbeugenden Hochwasserschutzes möglich ist (I07: 20). Im Bereich des vorbeugenden Hochwasserschutzes kann die hierbei Wirkung der europäischen Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG) hervorgehoben werden. Diese verpflichtete alle EU-Mitgliedstaaten dazu, eine Hochwasserrisikobewertung (bis Ende 2011), Hochwassergefahren- und

Risikokarten (bis Ende 2013) sowie Hochwasserrisikomanagementpläne (bis Ende 2015) fertigzustellen (EU 2007; Nakamura et al. 2017: 920-921). In einer Untersuchung, die den polnischen, deutschen und slowakischen Kontext hinsichtlich Landnutzungsänderungen in Hochwassergefahrenflächen zwischen 1990 und 2018 vergleicht, analysierten Borowska-Stefańska et al. (2025: 19), dass sich in allen drei betrachteten Ländern die Auswirkungen der Hochwasser-Richtlinie (2007/60/EG) und ihrer Umsetzung in nationales Recht in Form einer Eindämmung der Bebauung in hochwassergefährdeten Gebieten beobachten lassen.

So findet sich entsprechend auch die Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes, im Zuge der Neuaufstellung der hessischen Regionalpläne, im Rahmen der Flächenkategorien VRG/VBH zu vorbeugendem Hochwasserschutz wieder. Unter der Betonung der besonderen Schutzwürdigkeit von KRITIS wird der Auftrag des Schutzes von KRITIS im Rahmen dieser Flächenkategorien zum einen in Vorranggebieten als Prüfauftrag auf Hochwassergefährdung an die Eigentümer und für Infrastruktur verantwortliche Akteure verstanden, KRITIS durch baulich-technische Maßnahmen anzupassen (vgl. Regierungspräsidium Gießen: 91-92, Regierungspräsidium Darmstadt: 192) und zum anderen mit dem Zusatz versehen, dass Planungen neuer und Erweiterungen bestehender KRITIS unterbleiben sollen (ebd.).

Der Auftrag des technischen KRITIS-Schutzes wird entsprechend der Vorgaben in den Regionalplan-Offenlagen primär an die Betreiber weitergegeben (I01: 4, I01: 36). Weiterhin wird der Handlungsrahmen zweiseitig gesehen: Zum einen besteht der Auftrag, KRITIS durch baulich-technische Maßnahmen anzupassen, zum anderen besteht der Bereich der Voraus-Planung, i. d. S. als dass soweit wie möglich Gefahren und Betroffenheiten vorausgedacht werden und Maßnahmen eingeplant werden müssen, die zu einer Verringerung der Betroffenheit führen (I03: 24). Der Bezug auf Anpassung durch baulich-technische Maßnahmen zeigt sich ebenfalls im Kontext raumbedeutsamer Fachplanungen, wo Resilienz der Infrastruktur gegenüber bspw. Extremwetterereignissen als technischer Basisschutz v. a. im Aufgabenbereich technischer Fachplanung sowie des Anlagenschutzes durch etwaige Vorhabenträger verortet wird.

Hierbei ist entsprechend, wie das Beispiel des vorbeugenden Hochwasserschutzes zeigt, die Einschätzung von situativer Kritikalität von Klimawandelfolgen relevant.

Es stellt sich folglich die Frage, welche räumlichen Gefahren für KRITIS vollumfänglich identifizierbar sind und entsprechend dann über Lage und Bauweise, Risiken minimiert werden können (I03: 24). Nach der Einschätzung räumlicher Gefahren sind auch Starkregen- und Hitzeereignisse als relevant zu betrachten.

Starkregenereignisse entziehen sich aufgrund ihrer kleinmaßstäblichen Auftretenswahrscheinlichkeit zunächst dem Einfluss regionalplanerischer Steuerung (I01: 36, I07: 20). Hierbei werden insbesondere auf Ebene kommunaler Bauleitplanung Berücksichtigungsmöglichkeiten bspw. durch Inbezugnahme von Fließpfadkarten gesehen (I07: 20, Regierungspräsidium Darmstadt: 195).

Hinsichtlich Hitzeereignissen wird im Land Hessen die landesweite Klimaanalyse (iMA 2022) als Datengrundlage beschrieben, welche regionale Hotspots ermittelte, für welche gutachterliche Vorschläge zur Sicherung der klimarelevanten Freiflächen erarbeitet wurden, die zur Abkühlung dieser überwärmten Siedlungsgebiete beitragen sollen (I02: 6). Die entsprechenden Ergebnisse finden sich in der hessischen Raumordnung in VRG/VBH für besondere Klimafunktionen wieder (Landesplanung Hessen 2020: 77). In den jeweiligen Regionalplänen sind entsprechend „regional [bedeutsame] Luftleitbahnen sowie die für das Siedungsklima bedeutsamen Flächen des Freiraums (Kalt- / Frischluftentstehungsgebiete), die im räumlichen Zusammenhang mit lufthygienisch und / oder bioklimatisch belasteten Siedlungsräumen stehen und wichtige Aufgaben für den Klima- und Immissionsschutz wahrnehmen, als „Vorranggebiete für besondere Klimafunktionen“ bzw. „Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen“ festzulegen“ (Landesplanung Hessen 2020: 76). Auch wenn auf Regionalplanungsebene Aussagen innerhalb dieser Flächenkulisse nicht mit KRITIS-Schutz verknüpft ist (I07: 30), kann diskutiert werden, ob sich der Handlungsrahmen der räumlichen Gesamtplanung in Hessen bzgl. des Schutzes von KRITIS auf diese Flächenkulissen erweitern könnte.

Im Rahmen der Berechnungen der landesweiten Klimaanalyse⁵ ist es entsprechend primär der Indikator „Thermische Betroffenheit“, welcher, als Grundlage zur Festlegung der VRG und VBH für besondere Klimafunktionen, die thermische Betroffenheit der Bevölkerung auf einer Skala von „gering“ bis „extrem“ einordnet. Gerade hitzesensitive KRITIS, wie bspw. Krankenhäuser, bzw. im Konkreten KRITIS, welche sowohl kritisch i.S.d. Funktion für die Gesellschaft sind, aber auch auf welche insbesondere hitzevulnerable Bevölkerungs-

⁵ Die Berechnungsgrundlagen werden in Kap. 2.3.1 nähergehend ausgeführt.

gruppen angewiesen sind, sollten in diesen thermisch betroffenen Siedlungsgebieten besonders auf ihre Anpassung an Hitze geprüft und geplant werden. Denkbar ist in diesem Sinne eine Beifügung des Gebots hitzeangepasster Bauweise- und Planung in den regionalplanerischen Begründungen dieser Flächenkategorien. Eine solche begründende Ergänzung könnte dabei, angelehnt aus den textlichen Beispielen im Zusammenhang mit vorbeugendem Hochwasserschutz wie folgt aussehen, wobei als textliche Grundlage der Begründungstext zu VRG/VBH besonderer Klimafunktionen verwendet wird:

„[„Die Sicherung und Entwicklung innerörtlicher Freiflächen sowie weiterer geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung lokaler thermischer Belastungen ist Gegenstand der kommunalen Ebene“ (Landeplanung Hessen 2020: 77)]. Vor dem Hintergrund extremer thermischer Belastung (gem. der Ergebnisse der landesweiten Klimaaanalyse Hessen) ist hierbei in Gebietskulissen mit extremer thermischen Belastung die Schutzwürdigkeit kritischer Infrastrukturen zu betonen. Bestehende KRITIS, insbesondere jene, welche Versorgungsleistungen für hitzevulnerable Personengruppen anbieten (bspw. Krankenhäuser, Altenpflegeeinrichtungen), sollen von den für die Infrastrukturen verantwortlichen Akteuren hinsichtlich ihrer konkreten thermischen Vulnerabilität geprüft und soweit geboten durch bauliche und technische Maßnahmen an Hitzegefahren angepasst werden.“

Situative Kritikalität gegenüber Hitzeereignissen orientiert sich hierbei nach der Klassifizierungsterminologie der landesweiten Klimaaanalyse, wobei in der Begründungsergänzung „extrem“ (vgl. iMA 2022: 85) als Schwellenwert verwendet wurde.

Im Folgenden werden nun die Hürden in der Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes nähergehend diskutiert.

F1.2: Inwiefern stellen sich Hürden bei der Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes in der hessischen Raumplanung dar?

Zunächst ist im Zusammenhang mit den Hürden, welche die Umsetzung des KRITIS Grundsatzes in der hessischen Raumplanung begleiten, das Fehlen einer legal-bindenden KRITIS Definition (I01: 4, I03: 8) zu betonen. Dieses Fehlen verhindert somit zunächst eine gesetzgeberisch vorgelegte geographische, ortsbestimmte Festlegung dessen, welche Infrastrukturen tatsächlich als KRITIS eingeordnet werden. Vor dem Hintergrund des Fehlens einer rechtsbindenden KRITIS-Definition (vgl. Jasiunas et al. 2021: 7), wirkt auch der Umfang der bestehenden KRITIS-Einteilungen für eine Operationalisierung zu umfang-

reich. Dies lässt sich am Beispiel der hessischen KRITIS-Übersichtsliste (Landesregierung Hessen 2020) illustrieren:

„Ich meine diese Liste, die es davon für Hessen gibt, die ist ja unendlich lang [...] da ist ja alles aufgeführt, von der Lebensmittelproduktion bis (...), konkret auf die raumordnerische Ebene, ich meine, da (...) könnte man ja ohnehin schon ganz viele Dinge von vornherein streichen, wo man einfach sagen muss, da hat die Planung keinen Einfluss.“ (I01: 42)

Beide Aspekte, fehlende KRITIS-Definition und Abstraktion vorhandener Übersichtslisten, sind mit der Operationalisierung des Kritikalitätsbegriffs (vgl. Kap. 2.3.1) verbunden. In einer Fokussierung auf die US-amerikanische KRITIS-Gesetzgebung kritisiert Lundberg (2026: 4) hierbei das Entstehen eines allumfassenden Rahmens, in welchem bestehende Ansätze zum Schutz von KRITIS angewendet werden, unabhängig von ihrer direkten Relevanz für nationale Kritikalität. Betont werden zwei Problemstellungen: Zum einen die Definitorische, als dass in der Gesetzgebung hinsichtlich KRITIS Anlagen, welche tatsächlich kritisch sind, mit solchen, die „lediglich“ wichtig sind, vermischt werden und zum anderen die Terminologische, als dass die Verwendung des Begriffs „KRITIS“ als Bezeichnung für „alles“ zu konzeptioneller Verwirrung führt, die sich entsprechend auch auf die Schutzumsetzung auswirkt und beeinflusst, wie die Betreiber von Anlagen ihre Rolle verstehen (Lundberg 2026: 11).

Während es im Kontext dieser Komplexität einer einheitlich festgelegten KRITIS-Definition bedarf, wird der Schutzauftrag entsprechend regionalplanerisch primär an die Betreiber von KRITIS „weitergegeben“ (I01: 4).

Im KRITIS-Schutz agiert die räumliche Planung wie zuvor dargestellt gefahrenorientiert, wobei jedoch hinsichtlich der Einschätzung situativer Kritikalität von Ereignissen außerhalb der gesetzlich definierten Hochwasser-Risikokategorien, wie bspw. im Zusammenhang mit Starkregen (I01: 36, I07: 20), Unsicherheit dahingehend besteht, wie bewertet werden kann, „wann eine Situation kritisch ist und wie Raumordnung das so steuern sollte/kann, dass es [...] keine kritische Situation darstellt“ (I02: 78).

Herausgehend aus der Darstellung des Handlungsrahmens in Diskussion der vorherigen Forschungsfrage ergeben sich auch aus dessen Betrachtung Hürden, welche den Handlungsspielraum räumlicher Planung hinsichtlich des Schutzes von KRITIS auf Ebenen der Raumordnung einschränken. Hierbei sind raumordnerische Regulierungsmöglichkeiten zentral abhängig von den spezifischen (kritischen) Infrastrukturen, die dargestellt werden

sollen. So werden bspw. Höchstspannungsübertragungsleitungen zeichnerisch in Regionalpläne übernommen und die entsprechenden Regierungspräsidien als TöB an den Planverfahren beteiligt, jedoch können z. B. Rechenzentren, trotz ihrer Klassifikation als KRITIS, nicht im Regionalplan dargestellt werden. Sie verbergen sich entsprechend in VRG Industrie, Gewerbe, oder im Siedlungsbestand (I01: 34).

Ebenfalls herausgehend aus der Synthese der Aspekte fehlender KRITIS-Definition und der damit verbundenen Schwierigkeit dahinter, konkrete KRITIS-Standorte definieren zu können, als auch der dargestellten eingeschränkten Regulierungsmöglichkeit von KRITIS, ist auch der Aspekt der Berücksichtigung von Kaskadeneffekten unter den die Umsetzung einschränkenden Hürden einzuordnen. Die Zuständigkeit für die Untersuchung von Kaskadeneffekten wird hierbei mangels Wissen darüber, „wo“ tatsächlich kritische Punkte sind (I07: 50), primär bei Katastrophenschutzbehörden gesehen (I07: 52). Dies ist weiterführend auch unter dem Aspekt des „problem[s] of fit“ (Schmitt 2020: 10) zu sehen, wobei Infrastrukturen als großflächige, miteinander verbundene Netzwerke bestehen, deren Auswirkungen bspw. über die Hochwassergebiete und sogar über die Hochwassereinzugsgebiete hinausreichen (Fekete 2019: 2).

Darüber hinaus kristallisieren sich, ursächlich der Aufgabenbereiche des Katastrophenschutzes auf den Schutz von KRITIS, sowie des Aufgabenbereichs der räumlichen Planung, zwei Logiken hinsichtlich der Resilienz von KRITIS heraus: Zum einen das Verständnis räumlicher Planung, resiliente, räumliche Strukturen in der Planung auf langfristige Entwicklungen hin zu denken und entsprechend langfristig die Daseinsvorsorge-Tragfähigkeit in bestimmten Regionen abzusichern. Hierbei kann auf das von Curt et al. beschriebene Element der „protectiveness“ Bezug genommen werden, welches im Zusammenhang einer Einordnung von Resilienz-Konzepten bzgl. KRITIS von den AutorInnen als „the capacity of external works or equipment to protect the system from threats“ (ebd.: 2447) beschrieben wird. In diesem Zusammenhang können raumplanerische Festsetzungen, wie VRG und VBH für vorbeugenden Hochwasserschutz als ein solcher externer Aspekt gesehen werden, welcher dafür designed sind, Systeme vor Bedrohungen zu schützen, bevor diese zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit führen. Zum anderen besteht die ereignisorientierte Logik des Bevölkerungsschutzes, räumliche Strukturen dahingehend zu organisieren, sodass großflächige Ausfälle gem. des All-Gefahren-Ansatzes keinen großflächigen Ausfall der Versorgung hervorrufen (I06: 17).

In Betrachtung letzterer Logik ist auch das datenschutzbezogene Sicherheitsverständnis von KRITIS zu reflektieren. Herausgehend aus dem All-Gefahren-Ansatz des Katastrophen- und Bevölkerungsschutzes, während räumliche Planung primär den Aspekt der natürlichen Gefahren in ihrem Aufgabenbereich verortet, steht eine planerische Veröffentlichung bspw. von KRITIS-Standortdaten dem Sicherheitsverständnis von KRITIS-Betreibern entgegen (I06: 43).

Im Folgenden sollen nun die Erkenntnisse des Unterkapitels in einem Zwischenfazit zusammenfasst werden.

3.6. Zwischenfazit

Die empirische Analyse verdeutlicht eine Fokussierung der Umsetzung des Schutzes von KRITIS auf den Schutz vor Hochwassergefahren, während andere Klimawandelfolgen, wie Starkregen und Hitze, raumordnerisch nicht mit KRITIS-Schutz verknüpft werden. Auf Ebenen der Landes- und Regionalplanung wird KRITIS-Schutz, folgend den Vorgaben des BRPH, somit primär abstrakt - verbal in Begründungen der Bereiche vorbeugenden Hochwasserschutzes behandelt. Hierbei besteht mit klaren, rechtlich definierten Eingrenzungen situativer Kritikalität, wie bspw. HQ₁₀₀-Abgrenzungen, die Möglichkeit aufgrund der Datenlage, in diesem Fall Klimawandelfolgen, räumlich klar abzugrenzen und die Möglichkeit, auch den KRITIS-Schutz in diesen Flächenkategorien zu verorten. Während die textliche Erwähnung in diesen Gebietskategorien stattfindet, wird der konkrete Auftrag, KRITIS baulich und technisch an Klimawandelfolgen, insofern notwendig, anzupassen, primär im Aufgabenbereich der für die Infrastruktur - Verantwortlichen, bzw. Betreiber gesehen und der räumliche Schutz im Bereich kommunaler Bauleitplanung verortet.

Einschränkungen hierbei bestehen zunächst primär im Sinne zweier Definitionen: Zum einen die fehlende rechtlich-bindende Definition von KRITIS, was den Zugang dazu erschwert, konkret räumlich identifizieren zu können, welche Infrastrukturen aufgrund ihrer Bedeutung für das Gesamtsystem kritisch sind, und zum anderen, welche räumliche Gefahren, außerhalb des Aspekts Hochwasserschutz, für den Betrieb von KRITIS Schwellenwert-bezogen kritisch sind - der Aspekt situativer Kritikalität. Vor diesem Hintergrund zeigt sich die Mitigation von Starkregenereignissen v.a. auf der kommunalen Ebene. Der Aspekt Hitze, bzw. thermische Exposition könnte in den seit der Erstellung der landesweiten Klima-

analyse Hessens definierten Flächenkategorien für besondere Klimafunktionen ebenfalls in Begründungen mit dem Aspekt KRITIS-Schutz vernetzt werden.

Die in der Erhebung betrachteten raumbedeutsamen Fachplanungen agieren hierbei mit eigenen Schutzansätzen. Hier sind z. B. das N-1 Kriterium in der Gestaltung des Übertragungsnetzes und die Anpassung auf Grundlage der Gefährdungsanalyse im Kontext der Straßeninfrastrukturplanung zu nennen.

Der konkrete übergeordnet-planerische Umgang mit KRITIS ist somit zunächst zum einen von praktischen Hürden, als auch zum anderen durch Zuständigkeitsfragen gekennzeichnet. Als zentrales Zwischenfazit kann hierbei gezogen werden, dass die Umsetzung des Schutzes von KRITIS primär aus einer Synergie zwischen kommunaler Bauleitplanung und den Betreibern von KRITIS, sofern aufgrund fehlender KRITIS-Definition als solche identifizierbar, besteht. Dieser Aspekt soll im Folgenden Kapitel am Beispiel des Handlungsfelds kommunaler Bauleitplanung im Umgang mit Rechenzentren als KRITIS-Fallbeispiel beleuchtet werden.

4. Doppelte Schutzperspektive auf KRITIS am Beispiel von Rechenzentren

Die Digitalisierung als Zusammenfassung unterschiedlicher Phänomene „die zumeist aus technologischen Entwicklungen im Umfeld von Computern und Datennetzen resultieren“ (Bieber 2021: 1) trägt grundlegend zu einer Veränderung der Art und Weise, wie Menschen arbeiten, kommunizieren und am gesellschaftlichen Leben teilhaben, bei. Sie schafft damit sowohl neue Chancen als auch Herausforderungen für gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Strukturen. Der mit der Digitalisierung einhergehende Wandel zeigt sich weitergehend auch in der Neuformung von Städten und Quartieren, insbesondere in der Form, als dass er beeinflusst, wie Menschen leben, arbeiten und sich bewegen (Tappert et al. 2025: 1).

Eine verstärkte Entwicklung von und auch ein steigender Bedarf an Digitalisierung manifestiert sich zudem in einem Anstieg von Infrastrukturen als Grundgerüst und Voraussetzung der Digitalisierung, mitunter in Form von Rechenzentren (Soares et al. 2024: 1). Es kann hierbei erkannt werden, dass eine steigende Nachfrage an Rechenleistung, Speicherkapazität und Datenübertragung dabei nicht allein durch Effizienzsteigerungen bei IKT-Equipment von Rechenzentren gedeckt werden kann, sondern „neue Rechenzentren gebaut, der Nutzungsgrad bestehender Rechenzentren erhöht, oder Rechenkapazität aus dem Ausland bezogen werden“ können (BMWK 2025: 5).

Europaweit konzentrieren sich Rechenzentrenagglomerationen in den größeren Metropolen, wobei Frankfurt, nach London, den größten Standort darstellt - gemessen an Rechenzentrenkapazität im Kontext von im Bau- bzw. in Planung befindlichen Gebäuden (Cushman & Wakefield 2024: 9-39, vgl. Abb. 15).

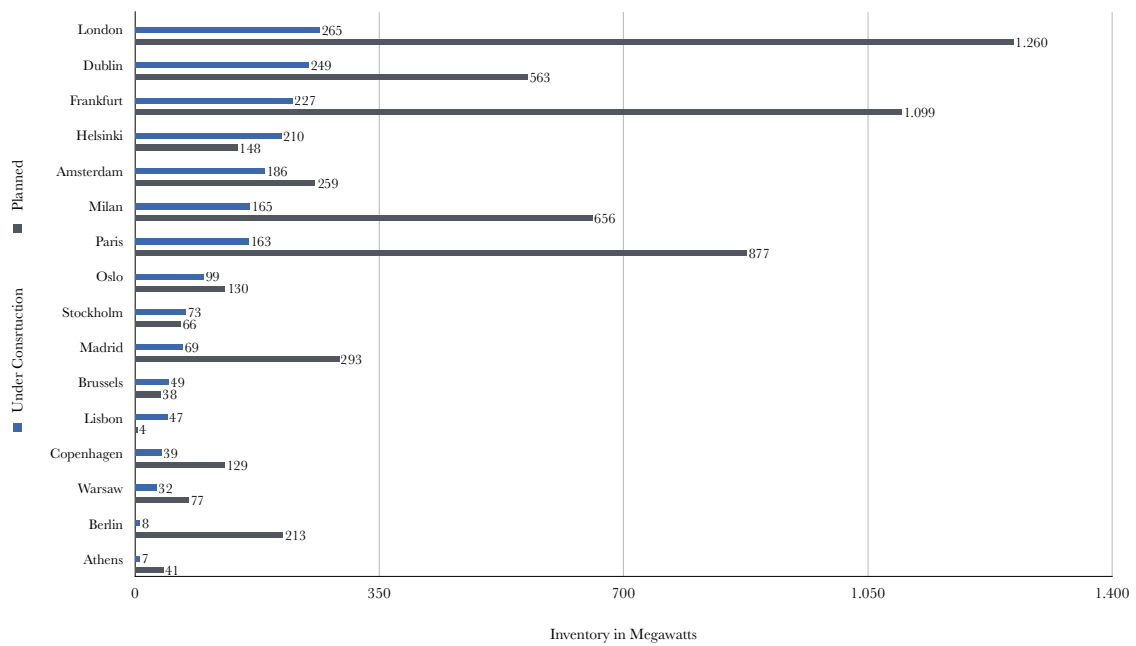


Abbildung 15: Geplante und im Bau befindliche Rechenzentrumskapazität in Europa im 2. Halbjahr 2024, nach Märkten (in MW)

Quelle: Eigene Darstellung nach Cushman & Wakefield 2024: 9-39

In diesem Kontext hebt sich v. a. die geplante Leistung hervor, die sich am deutlichsten in den Standorten London, gefolgt von Frankfurt, Paris, Mailand und Dublin auch in verstärkter räumlicher Planungstätigkeit zeigt.

Fokussiert auf Deutschland hebt sich entsprechend primär der Großraum Frankfurt/Rhein-Main aufgrund des Netzwerknotens DE-CIX hervor, wobei auch Entwicklungen in der Region Berlin/Brandenburg und im rheinischen Revier einen Anstieg erkennen lassen (vgl. Abb. 16; GDA 2024: 27; Bitkom 2024: 19; BMWK 2025: 6). Der DE-CIX in Frankfurt ist hierbei der „hinsichtlich des Datenvolumens größte Internetknoten weltweit“ (HMDI 2025: 10).

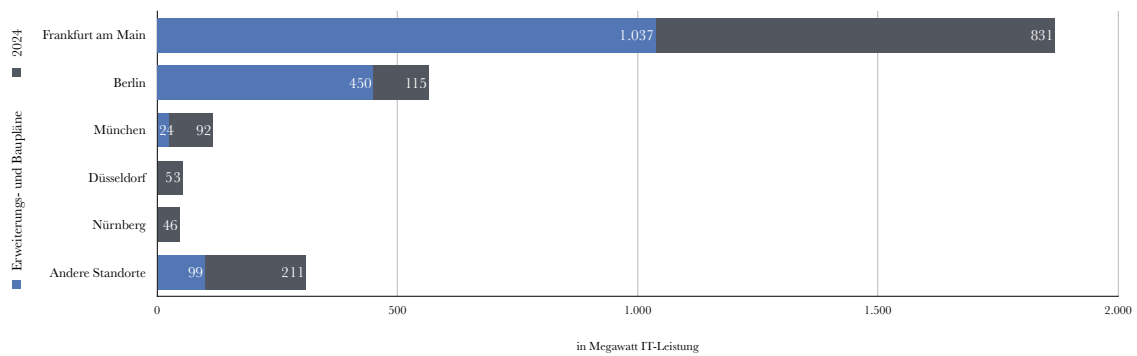


Abbildung 16: Bau- und Ausbaupläne von Rechenzentren nach Metropolregion-Standorten im Jahr 2024

Quelle: GDA 2024: 27, leicht modifiziert mit Genehmigung der German Datacenter Association

Das Phänomen der „data gravity“ beschreibt, dass große Datenmengen eine Art Anziehungskraft entwickeln, die weitere Daten anzieht, kann hierbei zur Erklärung genutzt werden, weswegen sich Rechenzentren räumlich sehr stark auf einzelne Standorte konzentrieren (BMWK 2025: 7; vgl. Abb. 16). Große Datenmengen lassen sich so bspw. nur mit „hohem Aufwand verschieben [...] und viele Anwendungen, die auf die Daten zugreifen [erfordern] geringe Latenzen“ (BMWK 2025: 7). Latenz bedeutet in diesem Kontext die Zeit, welche Daten benötigen, „um von einem Punkt in einem Netzwerk zu einem anderen zu gelangen“ (Cloudflare 2025).

Der Aspekt der „data gravity“ führt, insbesondere im Ballungsraum Frankfurt, zu einer „rapiden räumlichen Entwicklung“ (Diller et al. 2023: 340), welcher auch planerischen Steuerungs- und Handlungsbedarf hervorruft (ebd.). Dieser Bedarf ist eng mit der Notwendigkeit einer nachhaltigen räumlichen Steuerung verknüpft, da Rechenzentren mitunter Umweltauswirkungen, bspw. in Form von emittierter Abwärme (vgl. Yuan 2023), verursachen. Gleichzeitig ist die räumliche Konzentration in der Metropolregion FrankfurtRheinMain mit Auswirkungen des Klimawandels in Form von hoher thermischer Betroffenheit der Region, aber auch Hochwasser- und Starkregenaspekten, welche zu berücksichtigen sind, verbunden.

Rechenzentren sind somit zunächst als Infrastruktur mit einer hohen räumlichen Entwicklung zu verstehen, bei welcher sowohl Auswirkungen des Klimawandels auf die Infrastruktur als auch Umweltauswirkungen der Infrastruktur selbst zu betrachten sind.

In den folgenden Unterkapiteln soll nun zunächst die Verbindung von Rechenzentren und KRITIS hergestellt werden (Kap. 4.1). In diesem Unterkapitel werden auch die verschiedenen Typisierungen von Rechenzentren in Kürze dargestellt.

In Folge dessen werden die beiden Perspektiven, Auswirkungen des Klimawandels auf Rechenzentren und Umweltauswirkungen von Rechenzentren, mit dem Forschungsstand verknüpft (Kap. 4.2). Dies folgt dem Ziel, zunächst darzustellen, woraus sich die entsprechenden Forschungslücken- und -fragen ergeben, die anleitend für die empirische Untersuchung dieses Abschnitts der Dissertation stehen. Letztere werden in Kapitel 4.3 dargestellt.

Folgend auf diese Darstellung baut der methodische Rahmen der Fallstudienuntersuchung auf, in welchem dargelegt wird, wie die Fragestellungen an zwei Praxisbeispielen untersucht werden (Kap. 4.4).

Die beiden Praxisbeispiele, zwei Bauleitplanverfahren mit Rechenzentrenbezug, werden entsprechend der Rahmenstellung der Untersuchung aus beiden Perspektiven, einerseits dem Schutz der Rechenzentren-Infrastruktur vor Klimawandelfolgen und andererseits dem Schutz der Umwelt vor Auswirkungen der Rechenzentren-Infrastruktur, beleuchtet. Dies erfolgt in den Kapiteln 4.5 und 4.6.

Die Untersuchung schließt mit einer die Forschungsfragen analysierenden Diskussion (Kap. 4.7) sowie einem Zwischenfazit, welches diesen Abschnitt abschließt (Kap. 4.8)

4.1. Rechenzentren als KRITIS: Typisierung, Einordnung und Rahmenbedingungen

Rechenzentren erfüllen als Serverstandorte Aufgaben der Speicherung, Verarbeitung und des Austauschs von Daten (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 7). Die Zunahme dieser Aufgaben hat zur Folge, dass die Kapazitäten der Rechenzentren steigen und entsprechend mehr Rechenzentren benötigt werden (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 7).

Als Gebäude für den Betrieb von Servern beherbergen Rechenzentren einerseits Komponenten der Rechentechnik wie Computer, Speicher und Netzwerkkomponenten, andererseits weitere Infrastrukturen wie Stromversorgung (inkl. Notstromaggregate), "Systeme der Umgebungskontrolle und Kühlaggregate, Brandschutzeinrichtungen und Sicherheitstechnik" (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 8). „Die Räumlichkeiten in denen Daten

gespeichert werden, variieren von transportierbaren, temporären und modularen Einrichtungen über gigantische, neugebaute Lagerhallen bis zur Umnutzung bestehender Gebäude“ (Neubauer 2022: 18).

Rechenzentren können entsprechend ihrer Größe und infrastrukturellen Ausstattung typisiert werden (vgl. Abb. 17).

Insbesondere Hyperscale-RZ sind hierbei hervorzuheben, die sich aufgrund ihrer hohen Effizienz in Kombination mit einer organisierten und einheitlichen Rechnerarchitektur mit einer sehr hohen Anzahl an Servern, von weiteren RZ-Arten abgrenzen lassen (Jones 2018: 164).

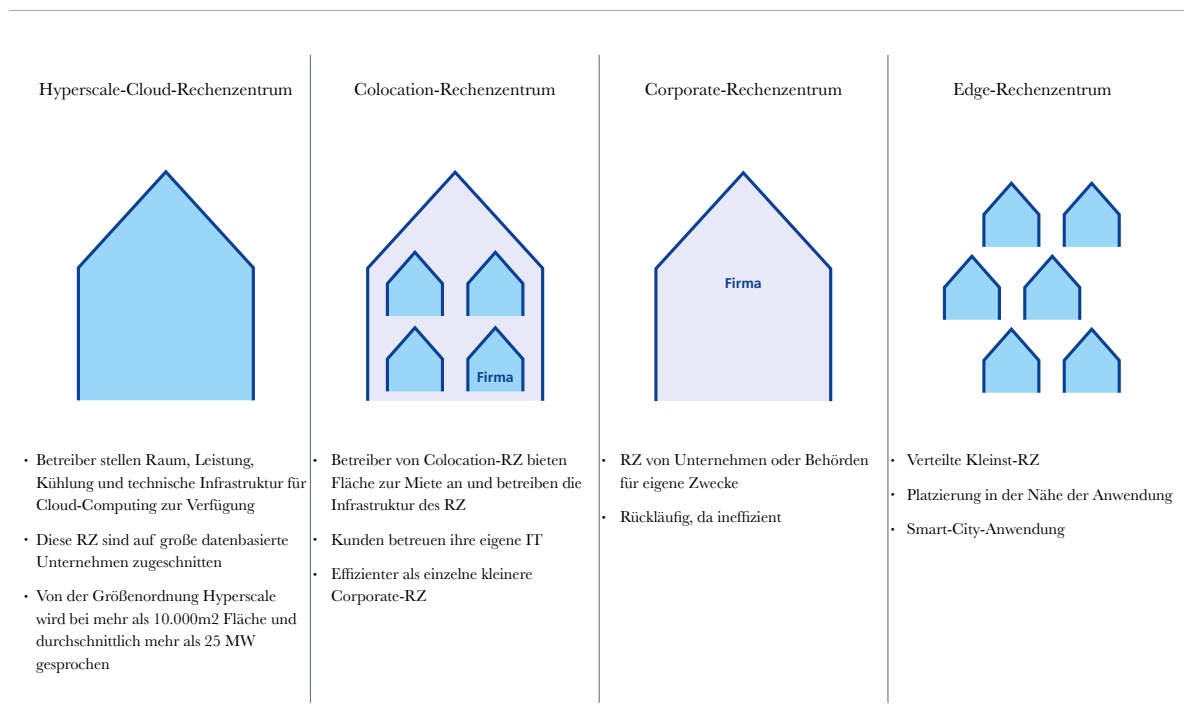


Abbildung 17: Typisierung von Rechenzentren

Quelle: Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 9, leicht modifiziert mit Genehmigung des Regionalverbands FrankfurtRheinMain

In der gesellschaftlichen Wahrnehmung kann die Rolle von RZ als relativ verborgen beschrieben werden (Siddik et al. 2021: 10), da ihre Rolle bei der Speicherung, Verwaltung und Verteilung von Daten für diejenigen, die auf ihre Dienste angewiesen sind, weitgehend unerkannt bleibt. Ähnliches identifizieren die AutorInnen für die Umweltauswirkungen von Rechenzentren, die der Öffentlichkeit ebenfalls weitgehend verborgen bleiben.

Rechtlich werden Rechenzentren weitergehend durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) gem. § 5 Abs. 4 Nr. 1 u. 2. BSI-KritisV; Anhang 4 BSI-KritisV als

KRITIS eingeordnet, wenn sie eine Housing-Dienstleistung erbringen und einen Schwellenwert von einer vertraglich vereinbarten Leistung von 3,5 MW erreichen.

Im Rahmen der hessischen Übersichtsliste über Sektoren, Branchen, kritische Dienstleistungen, kritische Prozesse und Beispiele für Anlagen / Einrichtungen sowie Zuständigkeiten in der Landesverwaltung (Land Hessen 2020) werden Rechenzentren dem KRITIS Sektor *Informationstechnik und Telekommunikation*, der Branche *Informationstechnik*, der kritischen Dienstleistung *Datenspeicherung- und Verarbeitung* und den kritischen Prozessen *Housing*, *IT-Hosting* und *Vertrauensdienste* zugeordnet (Land Hessen 2024: 15). In der näheren Beschreibung der Anlage- bzw. Einrichtung erfolgt die Beschreibung „Rechenzentren (Housing; Gebäude, die Server oder Netzwerktechnik bereitstellen)“ (ebd.).

4.2. Forschungsstand zur doppelten Schutzperspektive und Standortlogik

In den vorherigen Abschnitten wurde jeweils in Kürze dargestellt, dass Rechenzentren als KRITIS sowohl hinsichtlich ihrer eigenen Umweltauswirkungen als auch im Hinblick auf mögliche Einflüsse durch Klimawandelfolgen zu betrachten sind. Die daraus resultierende doppelte Schutzperspektive (vgl. Diller et al. 2023) soll im Folgenden weiter ausgeführt werden.

Die doppelte Schutzperspektive inkludiert zum einen die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels, vor denen KRITIS geschützt werden müssen, zum anderen die zum Teil bestehenden Auswirkungen von KRITIS auf die Umwelt, vor denen diese wiederum geschützt werden muss. Letzteres gilt insbesondere für „expansive“ (Diller et al. 2023: 340) KRITIS wie Rechenzentren, die aufgrund ihrer rapiden räumlichen Entwicklung planerischen Steuerungs- und Handlungsbedarf hervorrufen.

Expansive räumliche Entwicklung geht dabei einher mit den steigenden Anforderungen der Gesellschaft an die Digitalisierung: Begonnen mit der steigenden Nutzung von E-Commerce, online-Services und digitaler Kommunikation im 21. Jahrhundert, kennzeichnet die derzeit jüngste Phase die Ausbreitung von Cloud-Computing, Big Data und dem Internet of Things (IoT); Phänomene, welche sich auch in einem Anstieg der dafür notwendigen physischer Infrastruktur - Rechenzentren - wiederfinden (Ewim et al. 2023: 3).

Während die normativen Grundlagen zur doppelten Schutzperspektive und zum Ansatzes des Climate Proofings bereits in den konzeptionellen Grundlagen skizziert wurden (vgl. Kap. 2.2.1), sollen im Folgenden zunächst beide Seiten der doppelten Schutzperspektive aus Sicht der Vorgaben des BSI, der entsprechenden in Hessen aufgestellten Leitfäden zur Steuerung von Rechenzentren, sowie dem Forschungsstand beleuchtet werden, um anschließend näher auf das methodische Vorgehen und die Durchführung der Fallstudien zu dieser Thematik einzugehen.

Im Rahmen der Kriterien für die Standortwahl von Rechenzentren des BSI wird neben den Anforderungen an die Abstände zu Orten besonderer Gefährdung (BSI 2024: 8ff.) auch die „Berücksichtigung von Naturgewalten“ (BSI 2024: 11ff.) näher erläutert.

Im Zusammenhang mit Hochwasser an Flüssen legt das BSI fest, dass alle „betriebsnotwendigen Anlagen einschließlich der Zufahrten mindestens 2 m über dem höchsten Hochwasser seit 1960 (HHW1960)“ liegen müssen. (BSI 2024: 11). Darüber hinaus gilt für Standorte im Einzugsbereich mehrerer Gewässer der höchste HHW1960-Wert unter Berücksichtigung aktueller Klimarisiken (BSI 2024: 11). Die BSI-Publikation weist zudem darauf hin, dass diese Vorgabe in geomorphologisch ungünstigen Gebieten wie dem Ahrtal nicht ausreicht und in diesen Fällen eine individuelle Risikoanalyse unter Berücksichtigung historischer Hochwasserereignisse zu berücksichtigen ist (BSI 2024: 11).

Starkregenereignisse finden in der Publikation des BSI insofern Berücksichtigung, als dass darauf hingewiesen wird, dass diese zu einer massiven Überlastung des örtlichen Abwassersystems führen können, weshalb „ein höchstverfügbares RZ so hergerichtet werden [muss], dass alle betriebswichtigen Einrichtungen (z. B. NEA inklusive Frischluftversorgung, USV, Klimatisierung, Energieversorgung) bis zu einer Überflutung der Rückstauenebene um bis zu 1 m störungsfrei arbeiten“ (BSI 2024: 12).

Auch Waldbrandgefahren werden in der Publikation berücksichtigt, hier soll im Falle der Planung von RZ „in oder nahe einem Waldgebiet“ (BSI 2024: 12) einschließlich aller „betriebswichtigen oberirdisch installierten Einrichtungen ein Waldbrandschutzstreifen von mindestens 10 m Breite angelegt werden“ (BSI 2024: 12).

Im weiteren Kriterienkatalog zur Berücksichtigung von Naturgefahren werden Küstenansiedlung (BSI 2024: 12), Erdbeben (BSI 2024: 13), Bergbau, Sand- und Kiesabbau (BSI 2024: 13), Bergrutsche, Muren, Wildbäche und Lawinen (BSI 2024: 13) und Wind (BSI 2024: 13) berücksichtigt.

Vergleichbar mit den Naturgefahren, welche das BSI als Kriterien zur Standortwahl von Rechenzentren aufführt, verknüpft auch das Forschungsinstitut XDI (Cross Dependency Initiative) in einer Studie zu physischen Klimagefahren- und Anpassung von Rechenzentren, Klimawandelfolgen mit den Auswirkungen auf Rechenzentren (XDI 2025: 10; vgl. Tab. 8). Der in der Publikation erstellte Katalog an Klimawandelfolgen in ihren potentiellen Auswirkungen auf Rechenzentren soll in Tab. 8 mit den zum Zeitpunkt der Dissertation veröffentlichten Leitfäden und Handreichungen zur Steuerung von Rechenzentren verglichen werden, welche im Land Hessen veröffentlicht wurden. Dies erfolgt mit dem Ziel, zu identifizieren, inwiefern Klimawandelfolgen im Rechenzentren-Kontext Berücksichtigung finden, bzw. berücksichtigt werden sollen. Betrachtet werden hierbei (a) die Standortkriterien des BSI (BSI 2024), (b) der Leitfaden für Kommunen zur nachhaltigen Ansiedlung von Rechenzentren (HMDI 2025), (c) das als „Kompaktwissen Rechenzentren“ publizierte Dokument zur Handreichung für Kommunen in der Region FrankfurtRheinMain des Regionalverbands FrankfurtRheinMain (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022), sowie (d) der Praxisleitfaden zur Steuerung der Ansiedlung von Rechenzentren im Landkreis Groß-Gerau (Landkreis Groß-Gerau 2023).

Gefährdung	Beispiele für Erstschadensrisiken	Beispiele für Auswirkungen auf Rechenzentren	Berücksichtigung in Leitfäden und Handreichungen
Flusshochwasser	Schwere Schäden an Elektronik, Wänden, Dächern und Stromversorgungssystemen durch Wassereintritt.	Längere Ausfälle, Datenverlust, Dienstunterbrechungen und kostspieliger Austausch von Geräten.	(a), (b), (c), (d)
Starkregen / Oberflächenabfluss	Schäden an bodennaher Elektronik, HVAC und Stromversorgungssystemen durch lokalisierte Überflutung.	Längere Ausfälle, Datenverlust, Dienstunterbrechungen und kostspieliger Austausch von Geräten.	(a), (d)
Küstenüberflutung	Überflutung von Gebäuden und Kabelkanälen, Schäden an Kabeln oder Landestationen, Unterbrechungen oder Schäden an der Stromversorgung, Zugangsprobleme.	Lang andauernde Ausfälle, regionale Infrastrukturbeeinträchtigungen und erhebliche Wiederherstellungskosten.	(a), (d)
(Extremer) Wind	Strukturelle Schäden an Dächern, Wänden und externer Infrastruktur; Trümmereinwurf.	Längere Ausfälle, regionale Netzausfälle und Dienstunterbrechungen.	(a), (d)
Waldbrand	Direkte Flamme, Glut oder Strahlungshitze mit Schäden an Dächern, Wänden und Außenkomponenten (z. B. Kühlanlagen).	Ausfälle der Kühlung oder Stromversorgung, regionale Ausfälle oder Zugangsblockaden durch Evakuierungen; teure Geräte Reparaturen.	(a), (d)

Frost-Tau-Zyklen	Schäden an porösen Materialien (z. B. Ziegel-/Betonwände und Fundamente); minimale elektronische Auswirkungen.	Kurzfristige Unterbrechungen durch strukturelle Reparaturen oder Rohrbrüche, die Kühlung beeinträchtigen.	
Tropischer Wirbelsturm Boden-/Wind	Schwere strukturelle Schäden an Dächern und Wänden; freiliegende Elektronik.	Längere Ausfälle, regionale Netzausfälle und Dienstunterbrechungen.	
Bodenbewegungen, Bergbrüche	Rissbildung von Fundament, Wänden und Böden durch Setzungen; minimale direkte elektronische Schäden.	Wartungsunterbrechungen, potenziell langfristige Kosten für Fundament- und Bauwerksreparaturen.	(a), (b), (d)
Extreme Hitze	Überhitzung von Elektronik bei Ausfall der Kühlung; minimale strukturelle Schäden.	Serverabschaltungen, Datenverlust, Netzbelastung und Dienstunterbrechungen.	

Tabelle 8: Mögliche Auswirkungen extremer Wetterereignisse und Klimagefahren auf die Infrastruktur von Rechenzentren

Quelle: XDI 2025: 10, leicht modifiziert

Bei Tab. 8 ist im Rahmen der Berücksichtigung von Klimawandelfolgen zu beachten, dass, auch wenn Leitfäden und Handreichungen teilweise Folgen nicht explizit nennen, sie teilweise, wie beispielsweise die Handreichung des Regionalverbands, auf die grundlegenden Kriterien des BSI hinweisen, sie somit indirekt berücksichtigen.

Die Studie des XDI weist weitergehend auf die Notwendigkeit hin, dass Eigentümer, Betreiber und Investoren die physischen Klimarisiken verstehen, denen sowohl bestehende als auch geplante Rechenzentren ausgesetzt sind und wissen, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Widerstandsfähigkeit dieser kritischen Anlagen zu stärken (XDI 2025: 6).

Aus den aufgeführten Aspekten folgt, dass auf abstrakter Ebene Klimawandelfolgen verschiedenartige Konsequenzen für Rechenzentren haben können und auch entsprechend in übergeordneten Handreichungen teilweise berücksichtigt werden; zentral sind hierbei die Standortkriterien des BSI. Mögliche Risiken betreffen dabei sowohl die physische Struktur der Gebäude, als auch potentiell die sich in dem Rechenzentrum befindliche Technik und Elektronik. Weitergehend kann aus dieser abstrakten Erkenntnis die erste Forschungslücke definiert werden: Es bedarf konkreter Einzelfalluntersuchungen von Planbeispielen mit Rechenzentrenbezug, um einerseits zu untersuchen, welche Klimawandelfolgen in ihren Aus-

wirkungen auf Rechenzentren in Planverfahren berücksichtigt werden und andererseits zu analysieren, welche Auswirkungen diese Folgen auf das Planverfahren im Konkreten haben.

Neben dem kurzen Überblick über die erste Perspektive, die Auswirkungen des Klimawandels auf Rechenzentren, soll im Folgenden die zweite Perspektive in Form der Auswirkungen von Rechenzentren-Vorhaben auf die Umwelt nähergehend betrachtet werden.

Neben den Auswirkungen des Klimawandels auf RZ-Vorhaben sind weitergehend die Auswirkungen von Rechenzentren auf die Umwelt Gegenstand der Betrachtung. Diese Auswirkungen sind auch im Zusammenhang mit negativen Externalitäten zu verstehen (vgl. Liefner et al. 2023: 153) welche wie bspw. „Luft- und Wasserverschmutzungen durch industrielle Aktivitäten eines Unternehmens“, Kosten für andere Akteure, wie bspw. Gesellschaftliche, hervorrufen können.

Drei größere „Fußabdrücke“ werden in diesem Kontext hervorgehoben (vgl. Al Kez et al. 2022) und sollen kurz dargestellt werden: Der CO₂-, Wasser- und Landfußabdruck.

Rechenzentren zählen mitunter zu den am stärksten wachsenden Energiekonsumenten, was sie in den Kern der Diskussion um Energieeffizienz und CO₂-Emissionen positioniert (Al Kez et al. 2022: 2). RZ und „data transmission networks“ werden teilweise für ca. einen Prozent des weltweiten Energieverbrauchs verantwortlich gemacht (International Energy Agency 2023; Masanet et al. 2021: 984), wobei diese Einschätzung in Relation mit der sich verbessernden Energieeffizienz von moderneren Formen von Rechenzentren gesehen werden muss.

Energieeffizienz kann hierbei durch den PUE (Power Usage Efficiency)-Wert dargestellt werden. Ein PUE von 1.0 kann als ideal angenommen werden, wobei konventionelle RZ einen Wert von in etwa 2.0, Hyperscale-RZ von in etwa 1.2 erreichen (Jones 2018: 165). Während in Deutschland in den zehn Jahren vor 2025 ein positiver Trend zu verzeichnen war und der PUE-Wert durchschnittlich bei 1,46 liegt (BMWK 2025: 8), stagniert der Wert weltweit seit 2018. Dies geht aus einer Umfrage des Uptime-Instituts bezüglich des jährlichen PUE-Werts der jeweils größten Rechenzentren, die von den befragten Unternehmen betrieben werden, hervor (n = 526), der Wert liegt dabei im Bereich von 1,55 bis 1,67 (Uptime Institute 2024: 5, vgl. Abb. 18). Für 1kW Rechenleistung werden somit ca. 0,55 bis 0,59 kW für die Kühl- und Stromversorgung und weitere Gebäudetechnik benötigt (BMWK 2025: 8).

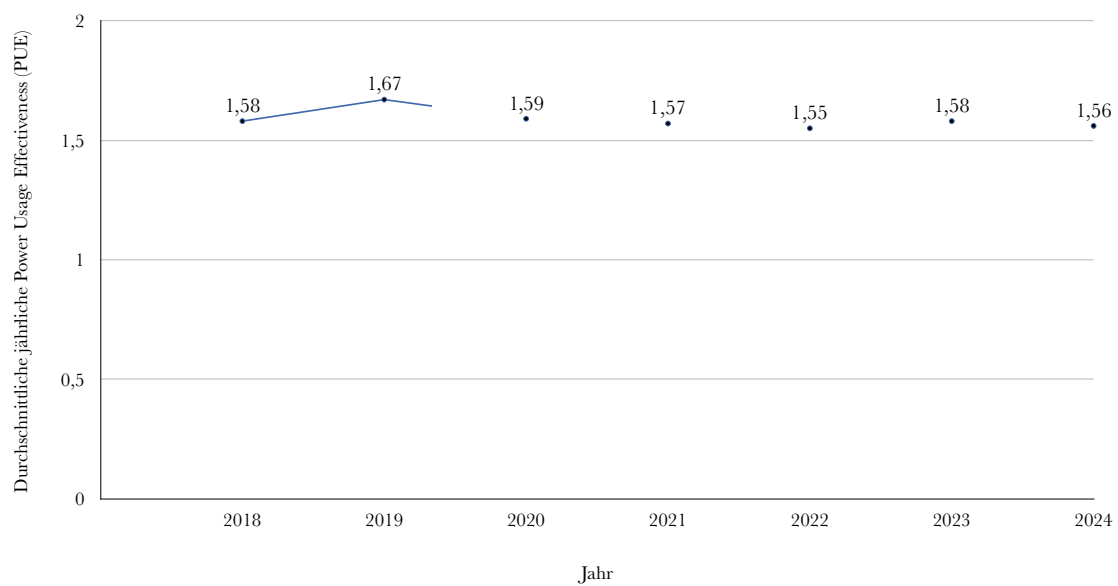


Abbildung 18: Durchschnittliche jährliche Energieeffizienz (PUE) der Rechenzentren weltweit

Quelle: Uptime Institute 2024: 5, leicht modifiziert

Gesetzgeberisch enthält das Energieeffizienzgesetz vom 13.11.2023 Regulationen hinsichtlich der Energieeffizienz von Rechenzentren: Gemäß § 11 Abs. 1 EnEfG sind RZ, „die vor dem 1. Juli 2026 den Betrieb aufnehmen oder aufgenommen haben, so zu errichten und zu betreiben, dass sie 1. ab dem 1. Juli 2027 eine Energieverbrauchseffektivität von kleiner oder gleich 1,5 und 2. ab dem 1. Juli 2030 eine Energieverbrauchseffektivität von kleiner oder gleich 1,3 im Jahresdurchschnitt dauerhaft erreichen“ und gem. § 11 Abs. 2 EnEfG Rechenzentren, die ab dem 1. Juli 2026 den Betrieb aufnehmen, „sind so zu errichten und zu betreiben, dass sie 1. eine Energieverbrauchseffektivität von kleiner oder gleich 1,2 erreichen (...)“. Es ist zu erwarten, dass diese Gesetzgebung zu einer deutlichen Absenkung der durchschnittlichen PUE-Werte führen wird, was allerdings lt. BMWK nur unter der Annahme gilt, dass weiterhin neue Rechenzentren in Betrieb gehen, die gleichzeitig über eine hohe Leistungskapazität verfügen (BMKW 2025: 8).

Eine Studie von Masanet et al. kalkuliert hierbei, dass der Stromverbrauch eines typischen Servers seit 2010 um den Faktor 4 gesunken ist, was v. a. auf die Verbesserung der Prozesseffizienz und die Verringerung der Leerlaufleistung zurückzuführen ist (Masanet et al. 2021: 984). Eine Kombination aus gesteigerter Servereffizienz und größerer Servervirtualisierung (die den für jede Recheninstanz erforderlichen Serverstrom reduziert) hat, so die Autoren, eine Versechsfachung der Recheninstanzen bei einem nur 25%igen Anstieg des globalen Server-Energieverbrauchs ermöglicht, während die Kombination aus gesteigerter

Speicherlaufwerkseffizienz und -dichte in einer 25-fachen Steigerung der Speicherkapazität bei einem nur dreifachen Anstieg des globalen Speicher-Energieverbrauchs resultiert (Masanet et al. 2021: 985).

Zu einem hohen Energiebedarf tragen dabei die Serveranlagen selbst, aber auch die Energieinfrastruktur, welche die Server und die Kühlsysteme unterstützt, sowie Redundanzstrukturen (Rechenzentren müssen „24/7“ am Laufen sein) in Form von Dieselgeneratoren als Back-Up Systeme, bei (Ewim et al. 2023: 3). Neben diesen direkten Emissionen kommt es weitergehend zu indirekten Emissionen in Form der Emissionen der Energiequelle, aus denen Rechenzentren ihre Energie beziehen, des Baus des Rechenzentrums, als auch durch sog. Supply-Chain-Emissionen - i. F. v. Herstellung und Zusammensetzung der finalen Produkte, welche die Anlagen des Rechenzentrums formen (Ewim et al. 2023: 5). Zentral ist hierbei entsprechend die Erkenntnis, dass Rechenzentren zwar von Natur aus energieintensiv sind, dass aber die Art und Weise, wie diese Energie beschafft, genutzt und verwaltet wird, ihre Umweltauswirkungen drastisch verändern kann (Ewim et al. 2023: 6).

In Zusammenhang mit der Betrachtung der Energieeffizienz von Rechenzentren ist weitergehend der Faktor der Abwärme relevant zu betrachten. Abwärme entsteht hierbei als „Abfallprodukt durch die Kühlung der Rechner“ (Mainova 2024) und ist mitunter unter der Frage einer dadurch zusätzlich entstehenden Hitzebelastung auf die umliegende Wohnbebauung zu betrachten (Diller et al. 2023). Die Nutzung dieser Abwärme wird indes als vielversprechender Weg gesehen, die Energieeffizienz von RZ zu steigern und mitunter Umweltauswirkungen zu mitigieren (Yuan et al. 2023: 14). Eine Fallstudie von Montagud-Montalvá et al. (2023) welche die Nutzung von RZ-Abwärme zur Dekarbonisierung der Universität von Valencia untersucht, zeigt mitunter, dass ein System aus Wärmepumpen die sowohl Wärme als auch Kälte gleichzeitig oder getrennt liefern können und u. a. ein thermisches Energiespeichersystem um Ungleichgewichte auszugleichen, es ermöglichen kann, Server des RZ zu kühlen, den Bedarf an Heizung und Warmwasser mit Restwärme zu decken und das bisher verwendete Erdgaskesselsystem zu ersetzen (Montagud-Montalvá et al. 2023: 10). Weitergehende Auswirkungen auf die Energieeffizienz durch die Nutzung von Abwärme aus RZ untersuchen auch Wahlroos et al. (2017) und ermittelten in einer Fallstudie in Espoo, Finnland, dass die Integration hoher Anteile von Abwärme (20-60 MW) in das Fernwärmesystem zu Betriebskosteneinsparungen von 0,6-7,3% führen könnte (ebd.: 1228).

Li et al. (2020) untersuchen als kurz- und langfristige thermische Energiespeicher für die Abwärme eines Rechenzentrums die Integration eines Wassertanks und eines thermischen Bohrlochspeichersystems (BTES) in einem „campus district heating system“ in Norwegen (ebd.: 1). Während die Integration eines Wassertanks beim sog. „peak shaving“ die Spitzenlast um 31% reduzieren konnte und mit einer Amortisationszeit von 12 Jahren die finanziell attraktivste Einzeloption darstellt, bietet er kaum ökologische Vorteile, da durch den Wasserspeicher Wärme saisonal nicht verschoben werden kann und somit die CO₂ Emissionen nicht nennenswert sinken (Li et al. 2020: 14). Im Vergleich dazu löst der BTES das „mismatch-problem“ indem es überschüssige Abwärme aus dem Sommer für den Winter speichert, wodurch die Abwärmenutzung in der Studie von 77% auf 96% ansteigt (ebd.). Gleichzeitig verzeichnet das Fallbeispiel eine Reduktion jährlicher CO₂ Emissionen um etwa 8%, weist allerdings hohe Anfangsinvestitionen in Form des Bohrfelds und der Investition in zusätzliche Wärmepumpen auf, was zu einer relativ langen Amortisationszeit von mindestens 17 Jahren führt (ebd.). Eine Kombination beider Speichertechnologien stellte das im Vergleich komplexeste System mit den höchsten Anfangsinvestitionen dar (ebd.). Im Rahmen der Fallstudie erzielte das System allerdings nicht die beste Leistung bezüglich Energieeinsparung und CO₂-Emissionsreduzierung und wies zusätzlich mit 19 Jahren die längste Amortisationszeit auf (ebd.).

Auch in den Leitfäden zur planerischen Steuerung von Rechenzentren illustriert die entsprechende Nutzung von Abwärme einen zentralen Aspekt (Regionalverband Frankfurt-RheinMain 2022: 17): „Will man die Abwärme eines RZ nutzen, muss unterschieden werden, ob diese in ein bestehendes Nahwärmenetz eingespeist werden kann, ob ein bestehender Baubestand ohne bisheriges Wärmenetz versorgt werden soll oder das RZ im Rahmen einer neuen Quartiersentwicklung die Neubauten mit Wärme versorgen soll. Weiterhin stellt die Versorgung einzelner Großabnehmer von Wärme wie Industriebauten, Schwimmbäder oder Verwaltungs- und Bürobauten große Potenziale dar.“ (Landkreis Groß-Gerau 2023: 22). Darüber hinaus wird das Potential zur Realisierung der Abwärmenutzung im Rahmen neuer Quartiersentwicklungen „am einfachsten“ gesehen, „weil man die notwendige Technik für eine gerichtete Abwärmenutzung entsprechend vorrüsten kann“ (Landkreis Groß-Gerau 2023: 22).

Die Nutzung der Abwärme wird weitergehend durch das Energieeffizienzgesetz normiert, in welchem u. a. zum einen gem. § 16 Abs. 1 EnEfG festgesetzt wird, dass Unternehmen die in ihnen entstehende Abwärme nach Stand der Technik zu vermeiden und anfallende Ab-

wärme auf den Anteil der technisch unvermeidbaren Abwärme zu reduzieren haben, insofern dies möglich und zumutbar ist und zum anderen gem. § 16 Abs. 2 EnEfG die anfallende Abwärme durch Maßnahmen und Techniken zur Energieeinsparung durch Abwärmennutzung wiederverwendbar zu gestalten ist, ebenfalls insofern dies möglich und zumutbar ist.

Auch der Wasserverbrauch von Rechenzentren ist in Betrachtung der Auswirkungen auf die Umwelt eine zu beachtende Größe: „Während der CO₂-Fußabdruck als Indikator für Nachhaltigkeit auch im Bereich Digitalisierung mittlerweile ins Bewusstsein gerückt ist, wird der digitale Wasserfußabdruck bisher weitgehend übersehen – obwohl der Betrieb von Rechenzentren große Mengen Wasser erfordert“ (Heinrich-Böll-Stiftung et al. 2025: 34). Dieser ergibt sich weitergehend aus verschiedenen Aspekten. Heinrich-Böll-Stiftung et al. (2025: 34) beschreiben drei Aspekte: „[Erstens] das Wasser, das zur Herstellung von Geräten nötig ist, zweitens das Wasser, mit dem Strom für den Betrieb der digitalen Infrastruktur erzeugt wird, und drittens das Wasser, das in Rechenzentren zur Kühlung dient, um eine optimale Betriebstemperatur der Hardware sicherzustellen. Pro Tag verbraucht ein durchschnittliches Rechenzentrum in den USA mehr als 1 Million Liter Wasser – so viel wie drei durchschnittlich große Krankenhäuser zusammen“ (Heinrich-Böll-Stiftung et al. 2025: 34). Siddik et al. (2021: 7) definieren weitergehend drei Komponenten, aus denen sich der Wasserverbrauch eines Rechenzentrums zusammensetzt:

- (1) das vom Rechenzentrum direkt verbrauchte Wasser für Kühlung und andere Zwecke,
- (2) das indirekt durch die Stromerzeugung verbrauchte Wasser,
- (3) das indirekt durch den Stromverbrauch der Wasser- und Abwasserversorgungsunternehmen des Rechenzentrums verbrauchte Wasser.

Im Lichte potentiell hohen Wasserverbrauchs wird eine Wasserversorgung für die Standortentscheidung eines RZ allerdings nicht als zwingende Voraussetzung gesehen, „da Rechenzentren auch mit luftgekühlten Systemen arbeiten können“ (Landkreis Groß-Gerau 2023: 16). In der Handreichung des Regionalverbands FrankfurtRheinMain finden sich derweil keine Aussagen zum Wasserverbrauch von RZ, oder zum zugehörigen WUE, dem Maß für effektive Wassernutzung. Konträr dazu erwähnt das Ansiedlungskonzept für RZ im Stadtgebiet Hanau das Resultat eines hohen Trinkwasserverbrauchs in Folge der für den Betrieb der RZ erforderlichen Kühlsysteme insbesondere „in der heißen Jahreszeit“ (Hanau 2021a: 4). Erwähnt wird allerdings, dass die technologische Entwicklung dahingeht, dass Betriebs-

temperaturen steigen und künftig „tendenziell etwas weniger Kühlung notwendig ist“ (Hannau 2021a: 4).

In einer szenariobasierten Prognose des Wasserfußabdrucks betonen Herrera et al. (2025) hierbei dennoch, dass ohne Gegenmaßnahmen der weltweite Wasserverbrauch im Zusammenhang mit Rechenzentren bis Mitte des Jahrhunderts um mehr als das Siebenfache steigen könnte, wobei der größte Teil des Verbrauchs auf den Kühlungsbedarf entfällt. Die AutorInnen identifizieren hierbei verschiedene Möglichkeiten zur Eindämmung des Trends, worunter Verbesserungen der Kühleffizienz, der Einsatz alternativer Technologien und eine Infrastrukturplanung, die die regionale Wasserverfügbarkeit berücksichtigt, fallen (ebd.: 1).

Bei Energie- als auch Wasserverbrauch sind somit zwei Faktoren zu beachten: Der Power Usage Effectiveness (PUE) Faktor, als Verhältnis von Gesamtenergieverbrauch und Energieverbrauch der IT und entsprechend Messwert für die Nachhaltigkeit von RZ (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 22) und „key metric of data center energy efficiency“ (Siddik et al. 2021: 4), als auch die Water Usage Effectiveness (WUE) als Maß für effektive Wassernutzung (Datacenter-Insider 2023; Landkreis Groß-Gerau 2023: 20).

Aufgrund der Größe und Bauart von RZ sind die Punkte Flächenversiegelung (Landkreis Groß-Gerau 2023: 17) und auch städtebauliche Einbettung (Große Bauvolumina, Ästhetik) (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 18) weitere zu berücksichtigende Auswirkungen von RZ-Vorhaben auf die Umwelt.

Eine Studie zu Standort- und regionalökonomischen Wirkungszusammenhängen der RZ in Frankfurt am Main und der Region (iWconsult et al. 2025) kalkuliert hierbei eine Grundstücksflächeninanspruchnahme der Rechenzentren von 627.655 m² (62,77 ha) in Frankfurt am Main, 165.845 m² (16,58 ha) im Landkreis Groß-Gerau und 108.500 m² (10,85 ha) in Offenbach am Main (ebd.: 30; Erhebung für das Jahr 2024).

Aufgrund der geringen Dichte ständiger Arbeitsplätze ist eine Anbindung zum Personenverkehr nicht zwingend notwendig (Landkreis Groß-Gerau 2023: 16), auch sind Auswirkungen durch Emissionen des Straßenverkehrs als eher gering einzustufen.

Während Studien zu einzelnen Facetten, wie den Aspekten Abwärmenutzung- und Speicherung, sowie auch zu Nachhaltigkeitsdimensionen im Zusammenhang mit RZ primär technische Aspekte beleuchten, entsteht eine zweite Forschungslücke in der ganzheitlichen Betrachtung der Auswirkungen von RZ im Zusammenhang mit deren Berücksichtigung in Bauleitplanverfahren.

Folgend aus den dargestellten Grundfacetten, welche die räumliche Entwicklung von Rechenzentren aus Perspektive der Auswirkungen des Klimawandels auf solche Vorhaben, sowie der Perspektive der Auswirkungen von RZ-Vorhaben auf die Umwelt, charakterisieren, spielen entsprechend auch spezifische Standortkriterien- und Faktoren eine Rolle, welche kurz dargestellt werden sollen.

Spezifische Standortkriterien- und Faktoren welche für RZ-Vorhaben relevant sind wurden in den vergangenen Jahren u. a. vom Regionalverband FrankfurtRheinMain (2022) und dem Landkreis Groß-Gerau (2023) für den hessischen Kontext aufbereitet.

Grundsätzlich ist zunächst die Nähe zu Umspannwerken zwecks Ausfallsicherheit und dahingehender Risikominimierung (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 11) und auch die Nähe zu Internet-Knotenpunkten, aufgrund kurzer Latenzzeiten (Landkreis Groß-Gerau 2023: 12) ein Standortfaktor für die Ansiedlung von Rechenzentren. Insbesondere der Frankfurter Internetknoten DE-CIX führt zu einer Ansiedlung von Rechenzentren in seinem räumlichen Umfeld, weshalb gerade im Raum Frankfurt eine Zunahme von Rechenzentren zu verzeichnen ist (Diller et al. 2023: 344).

Darüber hinaus ist auch die Entfernung zu Gefahrenquellen ein Kriterium bei der Standortwahl eines RZ-Betreibers. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der Zunahme von Verdichtungsräumen mit zunehmender Flächenknappheit RZ-Betreiber teilweise auch risikobehaftete Standorte in Kauf nehmen müssen (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 11). Die Standorte müssen ein erhöhtes Emissionspotenzial aufweisen (u. a. bedingt durch die Emissionen von Notstromaggregaten) (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 11). Dabei werden immissionsschutzrechtliche Prüfungen der Notstromdieselanlagen nach Anhang 1 Ziffer 1.1 der 4. BImSchV durchgeführt (Diller et al. 2023: 344).

RZ sind zudem auf Glasfaseranbindung und einen leistungsfähigen Stromanschluss angewiesen, um einen effizienten Transport der Daten von und zu den Servern zu ermöglichen (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 11-12). Aufgrund des hohen Stromverbrauchs der Infrastruktur ist die Bereitstellung von nachgefragten Anschlussleitungen relevant (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 18). Die Herausforderungen beziehen sich grundsätzlich insbesondere auf den Energie- und Ressourcenbedarf der Gebäude des RZ. „Daher sollten wie bei allen Neubauten die Möglichkeiten einer nachhaltigen Gebäudeplanung frühzeitig berücksichtigt werden“ (Landkreis Groß-Gerau 2023: 6). Die Strom-

versorgung ist weitergehend „Vertragsgegenstand zwischen dem RZ-Betreiber und dem Energieversorger“ (Landkreis Groß-Gerau 2023: 41).

Auch eine ausreichende Grundstücksgröße, die für die Ansiedlung eines RZ benötigt wird, ist ein zu berücksichtigender Standortfaktor (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2022: 11).

Während die Anbindung an ein leistungsfähiges Stromnetz in den betrachteten Dokumenten einen wichtigen Standortfaktor darstellt, ist die Wasserversorgung keine zwingende Standortvoraussetzung, „da Rechenzentren auch mit luftgekühlten Systemen betrieben werden können“. (Landkreis Groß-Gerau 2023: 16). Dieser Punkt wird jedoch im Rahmen der Umweltauswirkungen von RZ näher betrachtet.

Der Landkreis Groß-Gerau kategorisiert die Standortfaktoren für RZ in die Facetten Verkehrsinfrastruktur, soziale Infrastruktur, Umweltaspekte/Elementarrisiken, technische Infrastruktur und Grundstück, die in der folgenden Tabelle (Tab. 9) dargestellt sind.

Bereiche	Standortfaktoren
Verkehrsinfrastruktur	• Anbindung und Abstände zu Orten besonderer Gefährdung: • Straßen • Schienen • Flughäfen (Einflugschneisen) • Bahnstrecken mit Güterverkehr • Bahnanschluss / ÖPNV
Soziale Infrastruktur	• Entfernung zu Großstädten • Einbettung in Wohngebiete nach verschiedenen Seiten und Aspekten • Abstand zu Orten besonderer Gefährdung • Nähe zur Industrie, z. B. Chemiewerke • Arbeitsplätze / Fachkräfte
Umweltaspekte / Elementarrisiken	• Hochwasser durch • Überschwemmungsgebiete • Starkregengebiete • Küstenansiedlung • Nähe zu Habitaten und Schutzgebieten bzw. Natur- und Artenschutz • Zuluftschnelsen • Erdbebenzonen • Geologische Untergrundklassen • Wärmesenken • Waldbrandgefahr • Bergbau, Sand- und Kiesabbau • Bergrutsche, Muren, Wildbäche, Lawinen • Wind

Technische Infrastruktur	• Verfügbarkeit von Strom in der erforderlichen Größenordnung • Nähe zu Umspannwerken • Hochspannungsleitungen • Provider-/ Glasfaseranschlüsse • Nähe zum Internetknotenpunkt • Wasserversorgung • EMV (<i>Elektro-Magnetische Verträglichkeit</i>) aktive Quellen • Lauschabwehr
Grundstück	• Grundstücksgröße • Greenfield • Brownfield • Maß der baulichen Nutzung • Bodenbelastung • Kontaminierender Schadstoffausstoß • Zuwegung zum Grundstück • Archäologische Funde

Tabelle 9: Zusammenstellung von Standortfaktoren für Rechenzentren durch den LK Groß-Gerau

Quelle: Landkreis Groß-Gerau 2023: 11, leicht modifiziert

Hierbei ist zu beachten, dass die Standortkriterien umso strenger zu bewerten sind, je höher die Anforderungen an die Verfügbarkeit von Rechenzentren sind (Landkreis Groß-Gerau 2023: 15; bzgl. der Standortkriterien des TÜV Rheinland).

4.3. Forschungsfragen

Resultierend aus den Erkenntnissen des Stands der Forschung, sowie der Betrachtung der übergeordneten Leitfäden und Handreichungen, welche im Land Hessen zur Rechenzentren-Thematik publiziert wurden, sollen im folgenden Unterkapitel die Forschungsfragen dargestellt und beschrieben werden, welche sich aus dem aufgezeigten Forschungslücken ergeben.

Zentrales Element der Untersuchung ist die Betrachtung der doppelten Schutzperspektive auf Rechenzentren als KRITIS-Beispiel. Um diese Perspektive in einen übergeordneten Handlungsrahmen einzuordnen, verfolgt die erste Forschungsfrage zunächst das Ziel, zu identifizieren, welche konkret planerischen Herausforderungen die zunehmende Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben in Hessen begleiten:

F2.1: Welche (planerischen) Herausforderungen begleiten die zunehmende Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben im Land Hessen?

Zur Untersuchung der doppelten Schutzperspektive auf Rechenzentren wurde zunächst der Forschungsbedarf nach Einzelfalluntersuchungen formuliert, um zu untersuchen, welche Klimawandelfolgen in ihren Auswirkungen auf Rechenzentren in Planverfahren berücksichtigt werden und zu analysieren, welche Auswirkungen diese Folgen auf das Planverfahren im Konkreten haben. Die zweite Forschungsfrage lautet daher:

F2.2: Wie werden die Folgen des Klimawandels auf Rechenzentren in Bebauungsplanverfahren mit Rechenzentren-Bezug berücksichtigt?

Die dritte Forschungsfrage adressiert den Forschungsbedarf zur Berücksichtigung von Umweltauswirkungen von Rechenzentren in Bauleitplanverfahren mit Rechenzentrenbezug und betrachtet die zweite der beiden Schutzperspektiven:

F2.3: Wie können die Auswirkungen von Rechenzentren-Vorhaben auf die Umwelt im Rahmen von kommunalen Bauleitplanverfahren berücksichtigt werden?

Darauf aufbauend geht Forschungsfrage 2.4 aus der Untersuchung der grundsätzlichen planerischen Herausforderungen, welche mit der Rechenzentren-Entwicklung in Hessen einhergehen, sowie der Analyse der doppelten Schutzperspektive auf Rechenzentren hervor, und behandelt inwiefern sich sich planerische Handlungserfordernis ergibt:

F2.4 In welchen Aspekten kann ein Handlungsbedarf in der räumlichen Steuerung von Rechenzentren-Vorhaben identifiziert werden?

Die aufgezeigten Forschungsfragen sollen primär durch ein qualitatives Untersuchungsdesign beantwortet werden, welches im folgenden Unterkapitel vorgestellt wird.

4.4. Untersuchungsdesign und Methodik

Das Untersuchungsdesign gliedert sich mit der Durchführung von Experteninterviews und der von Fallstudien in zwei Bereiche, die im Folgenden skizziert werden sollen. Primär zur Untersuchung der Forschungsfragen 2.1 und 2.4 wurden zwei Experteninterviews mit dem Regionalverband FrankfurtRheinMain, sowie der Stadtplanung Frankfurt am Main geführt (vgl. Tab. 10). Beide Interviews wurden mit dem Ziel der Erfassung planerischer Steuerung von Rechenzentren geführt. Zur Strukturierung der Interviews wurden zwei an die ExpertInnen angepasste Leitfäden⁶ erstellt, welche den Verlauf der Interviews strukturiert haben. Unter Einverständnis der ExpertInnen wurden beide Interviews aufgenommen und anschließend transkribiert. Die Auswertung der Interviews erfolgte methodisch durch eine qualitative Inhaltsanalyse. Das Interview mit dem Regionalverband FrankfurtRheinMain erhält für die folgende Untersuchung das Interviewkürzel „R04“, das Interview mit der Stadtplanung Frankfurt am Main das Kürzel „R01“.

Interview-kürzel	Institution	Datum	Dauer
R01	Stadtplanung Frankfurt am Main	13.06.2025	1h 10 min
R04	Regionalverband FrankfurtRheinMain (Abteilung Planung)	18.08.2025	45 min

Tabelle 10: Experteninterviews zur Rechenzentrenentwicklung

Quelle: Eigene Darstellung

Zur Untersuchung der doppelten Schutzperspektive auf Rechenzentren und somit zur Analyse der Forschungsfragen 2.2 und 2.3, wurde ein Fallstudienkonzept entworfen. In diesem wurden zunächst zwei Bauleitplanverfahren identifiziert, welche als zentrales Element ein Rechenzentrenvorhaben inkludieren. Unter Zielstellung, ein Planverfahren außerhalb des räumlichen Kontexts der Metropolregion FrankfurtRheinMain und Eines innerhalb der Metropolregion zu untersuchen, wurde als erstes Beispiel das Bebauungsplanverfahren „Katzenfeld“ in Gießen (Landkreis Gießen) identifiziert. Darauf folgend wurde als Fallbei-

⁶ Die Leitfäden zu den Experteninterviews R01 und R04 sind in den Anhängen 14, bzw. 15 einsehbar.

spiel in der Metropolregion FrankfurtRheinMain das Verfahren „Großbauheim-Kaserne“ in Hanau (Main-Kinzig-Kreis) ausgewählt.

Beide Planverfahren befinden sich hierbei in unterschiedlichen Verfahrensständen, „Katzenfeld“ im Vorentwurf, „Großbauheim-Kaserne“ in der Rechtskraft, was den Vorteil bietet, die Untersuchung der doppelten Schutzperspektive auf die Bebauungspläne ebenfalls auf unterschiedliche Planungsstadien anzuwenden. Um dies methodisch berücksichtigen zu können, wurde sich zur Untersuchung der Fallbeispiele für zwei unterschiedliche Erhebungsarten entschieden.

Zur Untersuchung des Fallbeispiels „Katzenfeld“ in Gießen erfolgte die Analyse der doppelten Schutzperspektive im Rahmen eines qualitativen Workshops. Abbildung 19 visualisiert hierbei das Vorgehen.

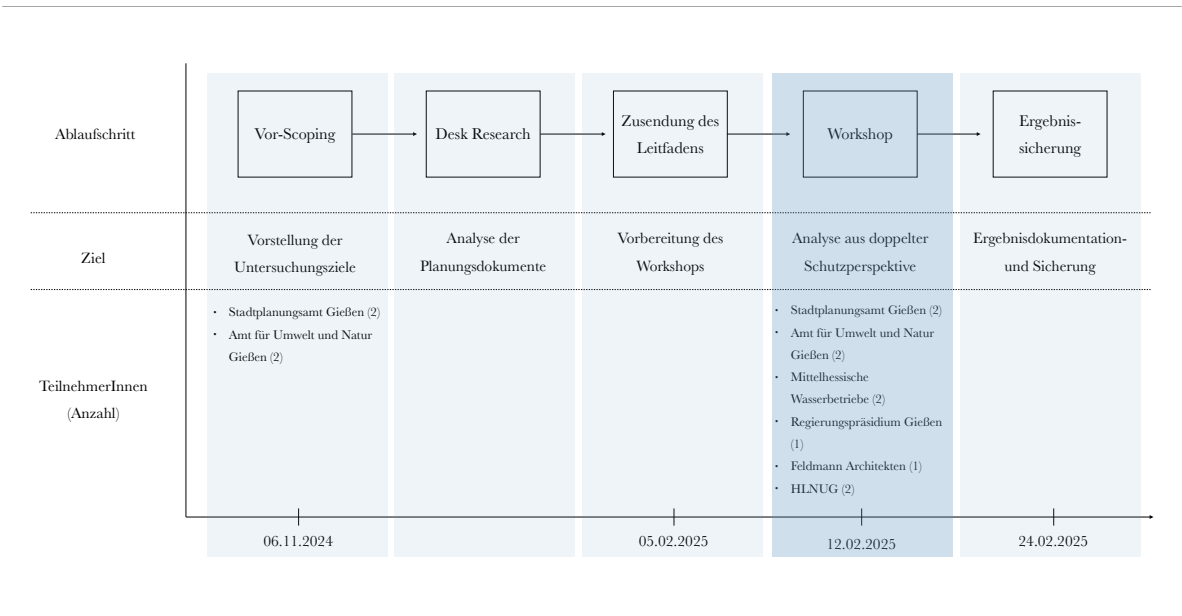


Abbildung 19: Vorgehen im Rahmen der Fallstudie „Katzenfeld“ in Gießen

Quelle: Eigene Darstellung

Die Vorbereitung der Fallstudie erfolgte durch ein Vor-Scoping, in welchem in Kooperation mit dem Stadtplanungsamt Gießen, sowie dem Amt für Umwelt und Natur zum einen die Untersuchungsziele vorgestellt und zum anderen die Grundparameter der Fallstudie abgegrenzt wurden. Die Grundparameter waren primär die wesentlichen Faktoren welche zur Analyse des Fallbeispiels aus doppelter Schutzperspektive in Betracht gezogen wurden. Weitergehend wurden im Vor-Scoping im Vorhinein identifizierte Schlüsselakteure diskutiert, welche zum eigentlichen Workshop eingeladen werden sollten. Diese umfassten neben den angesprochenen Ämtern die mittelhessischen Wasserbetriebe, um den Aspekt Hochwasser-

schutz- und Anpassung berücksichtigen zu können, das Regierungspräsidium Gießen zur Inklusion der regionalplanerischen Perspektive, das Büro Feldmann Architekten als beauftragtes Architekturbüro für das Rechenzentrum sowie das HLNUG zur Integration der Klimaanpassungs-Perspektive.

Es folgte eine Phase des Desk Researchs, in welcher die wesentlichen Planungsdokumente in Form der Bebauungsplan-Begründung, den zugehörigen textlichen Festsetzungen und dem Umweltbericht gesichtet, und einer vorläufigen Betrachtung aus doppelter Schutzperspektive unterzogen wurden. Dies diente primär der inhaltlichen Vorbereitung des Workshops, sowie der inhaltlichen Analyse des Fallbeispiels.

Vor dem eigentlichen Workshop wurde an die relevanten AnsprechpartnerInnen der Leitfaden⁷ versendet, welcher auf Basis der Desk Research entwickelt wurde. Dies diente zum einen der inhaltlichen Vorbereitung der Akteure und zum anderen der Vorbereitung auf den inhaltlichen Ablauf des Workshops.

Der Workshop als Kernelement der empirischen Erhebung des Fallbeispiels fand dreistündig am 12.02.2025 in den Räumlichkeiten des Instituts für Geographie der Justus-Liebig-Universität Gießen statt. Zu Beginn des Termins wurden einerseits die Forschungsziele der Fallstudie hervorgehoben und zum anderen das Planbeispiel zusammenfassend eingeführt. Hierbei konnte jedoch angenommen werden, dass die TeilnehmerInnen bereits in Tiefe mit dem Fallbeispiel vertraut waren. Aufbauend auf dieser Einleitung wurden die jeweiligen Fragen des Leitfadens in zwei im Vorhinein aufgeteilten Kleingruppen diskutiert und die Ergebnisse jeweils als Zwischenergebnis auf Pinnwänden festgehalten. Dies diente zum einen der Ergebnissicherung, aber auch zum anderen der intensiven Diskussion über einzelne Elemente der doppelten Schutzperspektive. Als Begründung, weshalb ein Workshop-Format zur Datenerhebung genutzt wurde, ist primär die Offenheit dieses Formats hervorzuheben. So wurde als Fallbeispiel ein Bebauungsplan, welcher noch keine Rechtskraft trägt, betrachtet. Es konnte also angenommen werden, dass in einzelnen Fällen, wie bspw. in den Vereinbarungen zum städtebaulichen Vertrag, noch keine finalen Details, sondern v. a. das Vorgehen diskutiert werden konnte.

Am Ende des Workshops hatten die Akteure die Gelegenheit, weitere Punkte anzusprechen, die in den Kleingruppendiskussionen noch nicht angesprochen wurden.

⁷ Der Leitfaden ist in Anhang 12 einsehbar.

Zur Ergebnisdokumentation- und Sicherung wurde im Anschluss des Workshops ein Protokoll mit den wesentlichen Diskussionsergebnissen an die TeilnehmerInnen versendet.

Das Format des Workshops wurde im Fallbeispiel Gießen insbesondere aus dem Grund gewählt, als dass sich ein interaktives und offenes Format für ein sich noch im Prozess befindlichen Bebauungsplan und dessen Analyse aus doppelter Schutzperspektive eignet. Durch interaktives Diskutieren in Kleingruppen konnte während des Workshops sichergestellt werden, dass der Prozess der Planaufstellung von allen Beteiligten intensiv hinsichtlich beider Schutzperspektiven diskutiert und reflektiert wurde.

Für die Fallstudie „Großbauheim-Kaserne“ in Hanau wurde ein sich in zeitlicher Abfolge ähnelndes Vorgehen gewählt (vgl. Abb. 20), wobei in diesem Zusammenhang im Gegensatz zum Workshop-Format, ein Experteninterview mit einer kleineren Akteursgruppe durchgeführt wurde. Wie zur Fallstudie in Gießen begründet, bot sich für diese Fallstudie ein weniger offenes Format an, da auch Erkenntnisse aus der Fallstudie in Gießen in einen konkreteren Leitfaden fließen konnten.

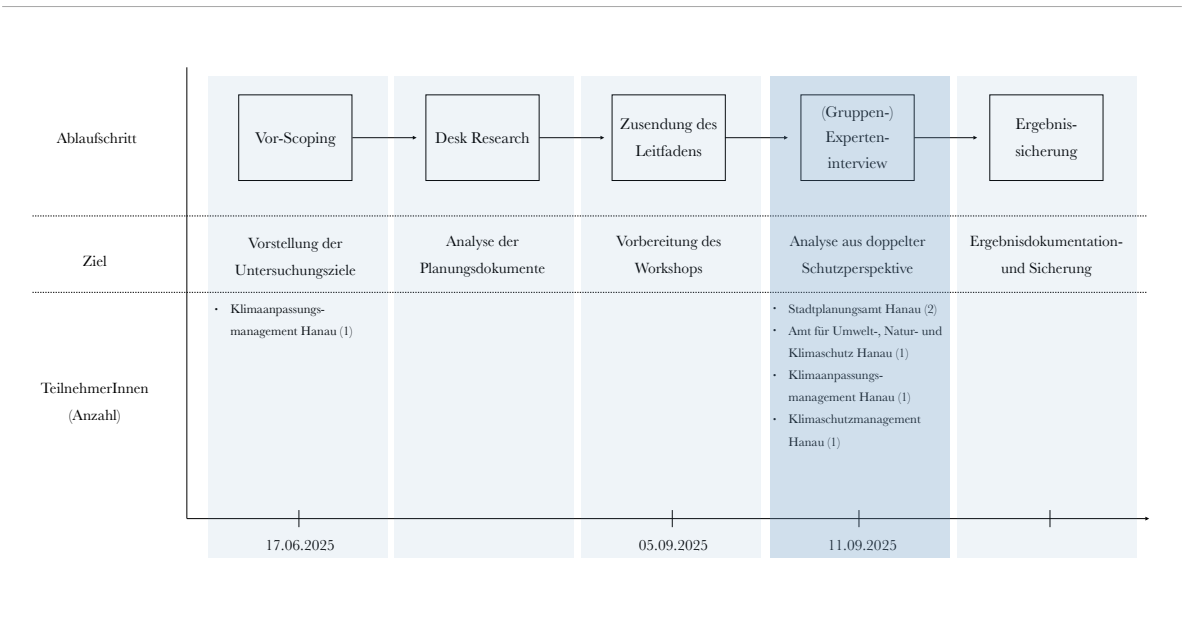


Abbildung 20: Vorgehen im Rahmen der Fallstudie „Großbauheim-Kaserne“ in Hanau

Quelle: Eigene Darstellung

Das Vorgehen war wie angesprochen vergleichbar mit der Gießener Fallstudie: Begonnen wurde durch ein Vor-Scoping mit dem Ziel der Vorstellung der Untersuchungsziele, einer Desk Research Phase zur Analyse der Planungsdokumente, sowie der Zusendung des Leit-

fadens⁸ zur Vorbereitung des Interviews. Letzterer war entsprechend auch zentrales Element der empirischen Erhebung des Fallbeispiels in Form eines Experteninterview mit fünf TeilnehmerInnen aus: dem Stadtplanungsamt Hanau, dem Amt für Umwelt- Natur und Klimaschutz, sowie dem Klimaanpassungs- und dem Klimaschutzmanagement Hanaus.

In unterschriebenem Einverständnis der TeilnehmerInnen wurde das Interview aufgenommen, transkribiert und inhaltsanalytisch ausgewertet. Die Auswertung der Experteninterviews erfolgte wie auch im Falle der Interviewauswertungen, die im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurden, gemäß des Ablaufs der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2024). Eine detaillierte Ausführung des methodischen Vorgehens findet sich, zur Vermeidung von Wiederholungen, entsprechend in Kap. 3.3.

Zusammenfassend lassen sich durch das entwickelte Untersuchungsdesign somit das Fallbeispiel „Katzenfeld“ aus ex-ante- und das Fallbeispiel „Großauheim-Kaserne“ aus ex-post Perspektive analysieren (vgl. Tab. 11).

	Gießen	Hanau
Betrachteter Bebauungsplan	Bebauungsplan „Katzenfeld“ (GI05/23)	Bebauungsplan „Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne“ (Nr. 915.3)
Verfahrensstand	Vorentwurf (Juni 2024)	Rechtskraft (Dezember 2021)
Analyseperspektive	Ex-ante Rechtskraft	Ex-post Rechtskraft
Flächengröße	ca. 18ha	ca. 29ha (Teilplan A)
Geplante RZ-Nennleistung	60MW	180MW

Tabelle 11: Vergleich der betrachteten Fallstudien

Quelle: Eigene Darstellung

4.5. Anwendung der doppelten Schutzperspektive auf das Fallbeispiel „Katzenfeld“ in Gießen

Als erstes Fallbeispiel wird das Planvorhaben „Katzenfeld“ (Bebauungsplan GI05/23) in der mittelhessischen Stadt Gießen durch eine doppelte Schutzperspektive analysiert, der Plan befindet sich im Vorentwurf (19.06.2024) und trägt entsprechend zum derzeitigen Stand keine Rechtskraft.

⁸ Der Leitfaden ist in Anhang 13 einsehbar.

4.5.1. Planungs- und Vorhabenkontext

Der folgende Abschnitt verfolgt das Ziel, den räumlichen Bezug des Fallbeispiels, die Rahmendaten des Planverfahrens, Planungsziele und -zwecke, sowie die Inhalte und Festsetzungen des Bebauungsplan-Vorentwurfs darzustellen.

Das Plangebiet (vgl. Abb. 21) befindet sich nordwestlich der Gießener Innenstadt zwischen der Krofdorfer Straße (Kreisstraße K28), Wilhelm-Leuschner-Straße und Weilburger Grenze (Gießen 2024a: 3) und umfasst ca. 16,25 ha. Etwa 600m östlich des Gebiets verläuft die Lahn, das Plangebiet wird im Osten durch eine Hochwasserschutzanlage, dem Werner-Gleim-Deich, begrenzt (Gießen 2024a: 12). Der Deich ist für ein 100-jähriges Hochwasserereignis ausgelegt (Gießen 2024a: 12). Nördlich der Krofdorfer Straße grenzt weitergehend ein Umspannwerk an, westlich die Bundesstraße B429.

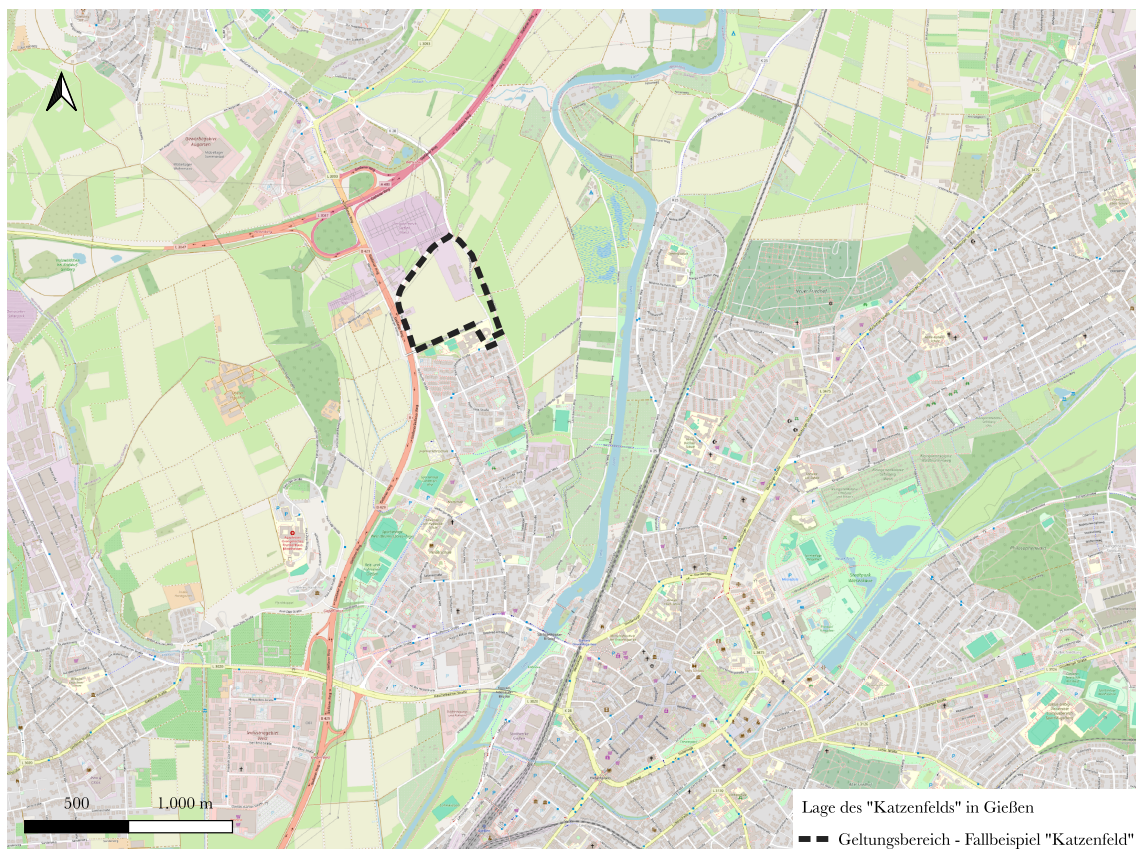


Abbildung 21: Geltungsbereich des Bebauungsplans „Katzenfeld“

Quelle: Eigene Darstellung, Kartengrundlage: OSM

Durch den Bebauungsplan GI 05/23 „Katzenfeld“ beabsichtigt die Stadt Gießen eine „bauliche Entwicklung des Bereiches „Katzenfeld“ zwischen der Krofdorfer Straße (Kreisstraße K28), Wilhelm-Leuschner-Straße und Weilburger Grenze“ (Gießen 2024a: 3). Als Zweck der Planung wird die „Vorbereitung der Nutzung der größten verbliebenen potenziellen Baufläche im Stadtgebiet zur Befriedigung der anhaltend hohen Nachfrage nach Gewerbeflächen und zur Realisierung eines großen Rechenzentrums“ (Gießen 2024a: 6) beschrieben. Planungsrechtlich befindet sich das Plangebiet im Außenbereich, der Bebauungsplan wird im Vollverfahren einschließlich Umweltprüfung nach § 2 Abs. 4 BauGB aufgestellt (Gießen 2024a: 7).

Für den räumlichen Geltungsbereich des Bebauungsplans weist der zum Zeitpunkt der Aufstellung rechtskräftige Regionalplan Mittelhessen 2010 ein Vorranggebiet Siedlung Planung aus, was von einem Vorbehaltsgebiet für besondere Klimafunktionen überlagert wird (Gießen 2024a: 8). Aufgrund dessen, dass der Teilregionalplan Energie von 2016, einen „möglichst einzuhaltende[n] 400-m-Abstand Höchstspannungs-Freileitungen für in neu aufgestellten Bebauungsplänen geplante[n] schutzwürdige[n] Nutzungen wie dem Wohnen“ festlegt, welcher auch den Geltungsbereich des Bebauungsplans „Katzenfeld“ betrifft, wurde am 15.01.2019 ein Zielabweichungsverfahren vom Regionalplan Mittelhessen 2010 durchgeführt, welches am 31.05.2019 genehmigt wurde (Gießen 2024a: 8-9).

Der Flächennutzungsplan im Stand vom 01.03.2006 weist das Plangebiet u. a. „bis auf den südöstlichen Anhang mit dem jüngst eröffneten Familienzentrum und dem Jugendzentrum „Holzpalast“, als gemischte Baufläche (Planung) und Wohnbaufläche (Planung)“ (Gießen 2024a: 9) aus. Es liegt somit für den größten Teil des Geltungsbereichs eine Abweichung durch die festgesetzten Nutzungen des Bebauungsplans vor (Gießen 2024a: 9), der Einleitungsbeschluss für die dadurch notwendig werdende 20. Änderung des FNP's wurde im Frühjahr 2019 durch die Stadtverordnetenversammlung gefasst (Gießen 2024a: 10).

Mit dem Bebauungsplan „Katzenfeld“ sollen die planungsrechtlichen Voraussetzungen für ein Gewerbegebiet geschaffen werden, in dem mindestens 50 % der Nettobauland-Fläche für Gewerbe und maximal 50 % für ein Rechenzentrum vorgesehen sind (Gießen 2024a: 6).

Gemäß der Begründung des Bebauungsplans soll sich die Ansiedlung im Gewerbegebiet vorrangig auf IT-affine Betriebe und nutzungsnahe Dienstleistungen konzentrieren, wobei eine hohe Zahl an Arbeitsplätzen erzielt werden soll (Gießen 2024a: 6). Das Rechenzentrum wird in seiner Höhe auf 30 m über einem hochwassersicheren Baugrund begrenzt,

zum Stadtrand hin abgestaffelt und durch eine maximale Eingrünung landschaftlich integriert (Gießen 2024a: 6). Weitergehend soll eine klimagerechte Stromversorgung und maximale Wärmeabgabe des Rechenzentrums an das städtische Fernwärmenetz vertraglich abgesichert werden, „sofern nicht gesetzlich erforderlich“ (Gießen 2024a: 6).

Die hier kurz angerissenen Planungsziele folgten hierbei dem Einbringen eines Konzeptansatzes der Firma Revikon in Form der angestrebten Ansiedlung eines Rechenzentrums auf einer rd. 5ha großen Teilfläche (Gießen 2024a: 5). Revikon kaufte die zuvor als Ackerfläche genutzten Liegenschaften 2018 und fungiert somit als Entwickler der Fläche sowie Hauptansprechpartner der Stadt (Gießen 2024a: 4).

Planungsrechtlich werden im Großteil der westlichen und südlichen Flächen ein Gewerbegebiet/ GE (gem. § 8 BauNVO i.V.m. §1 Abs. 4 S. 1 Nr. 2, Ans. 6 Nr. 1 und Abs. 9 BauNVO) festgesetzt und im nordöstlichen Teil ein Sondergebiet/ SO „Rechenzentrum“ (gem. (§ 11 Abs. 1 u. 2 BauNVO i.V.m. § 1 Abs. 4 S. 1 Nr. 2, Abs. 6 Nr. 1 und Abs. 9 BauNVO)). Im SO zulässig sind u. a. Gebäude für die Nutzung als Rechenzentrum, Anlagen zur Stromversorgung des Rechenzentrums und dessen Notstromversorgung bis max. 30 MW Nennleistung und Anlagen zur Übergabe von Wärme des Rechenzentrums (Gießen 2024b: 3). Der Bebauungsplan ist in Abbildung 22 dargestellt. Zur besseren Visualisierung ist die Darstellung auf die zeichnerische Grundlage beschränkt, im Anhang 10 ist der vollständige Plan ersichtlich.

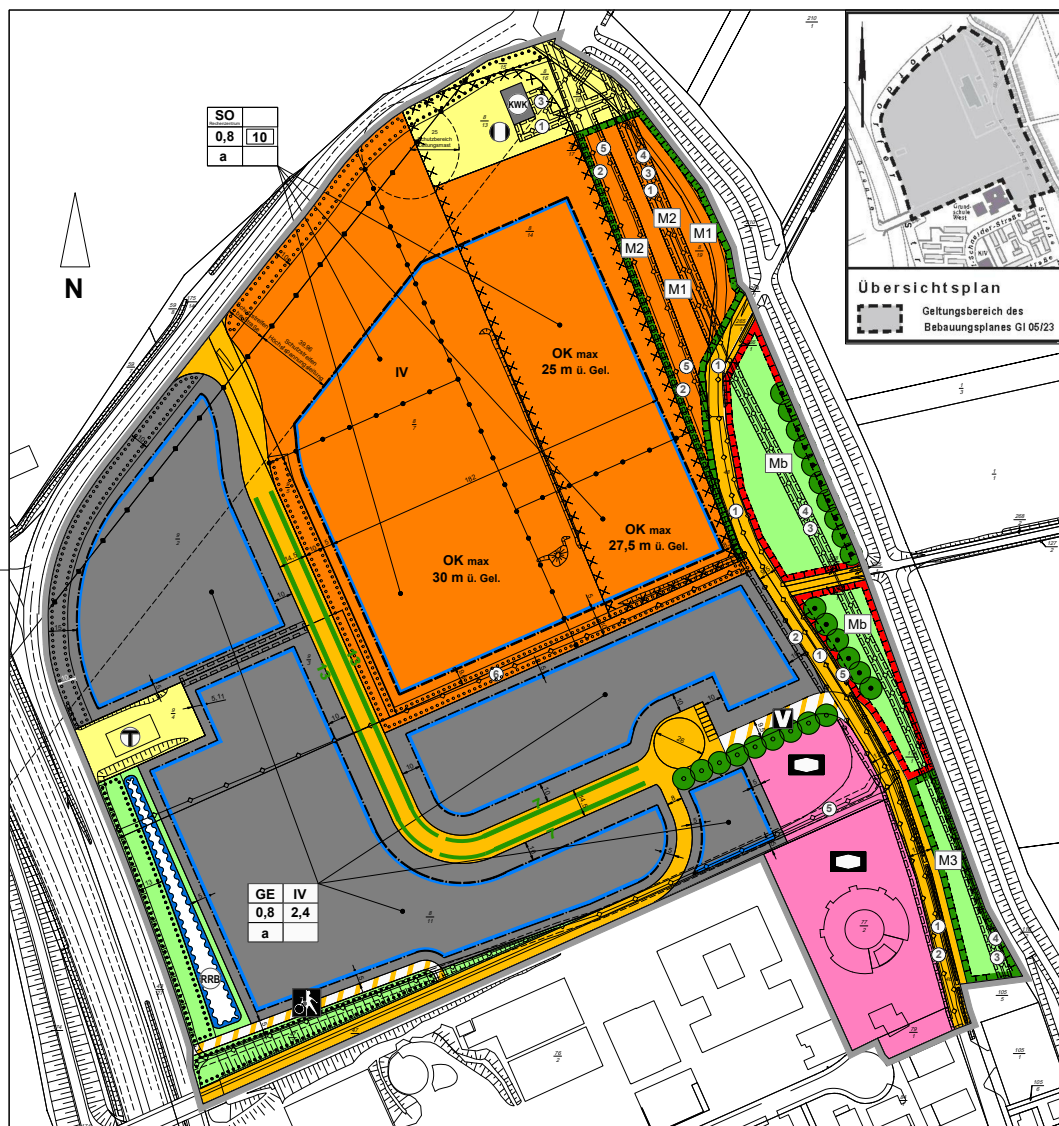


Abbildung 22: Vorentwurf zum Bebauungsplan „Katzefeld“ (GI 05/23)

Quelle: Gießen 2024d, mit Genehmigung der Stadt Gießen

Weitergehend wird im südwestlichen Bereich des Plangebiets ein Regenrückhaltebecken festgesetzt, welches als Erdbecken mit einem Dauerstaubereich anzulegen ist (Gießen 2024b: 6).

Die GFZ im GE beträgt 2,4; welche „ausnahmsweise bis 2,8 überschritten werden, wenn die zulässige Grundflächenzahl von 0,8 sowie alle Begrünungsfestsetzungen für das Baugrundstück eingehalten werden [kann]“ (Gießen 2024b: 3).

4.5.2. Schutzperspektive I: Auswirkungen des Klimawandels auf das Vorhaben

Im Rahmen der Schutzperspektive I werden, fokussiert auf Hochwasser, Starkregen und Hitzeereignisse, zunächst Exposition, sowie getroffene Anpassungsmaßnahmen im Bebauungsplanverfahren dargelegt.

Das Plangebiet befindet sich im Hochwasserrisikogebiet außerhalb eines festgesetzten Überschwemmungsgebiets gem. § 78b WHG (Gießen 2024a: 32). Der das Gebiet östlich begrenzende Hochwasserdeich „Werner-Gleim-Deich“ wurde 2009/2010 fertiggestellt und für ein HQ₁₀₀-Ereignis konzipiert (Gießen 2024a: 32, Staatsanzeiger Hessen 2014: 55).

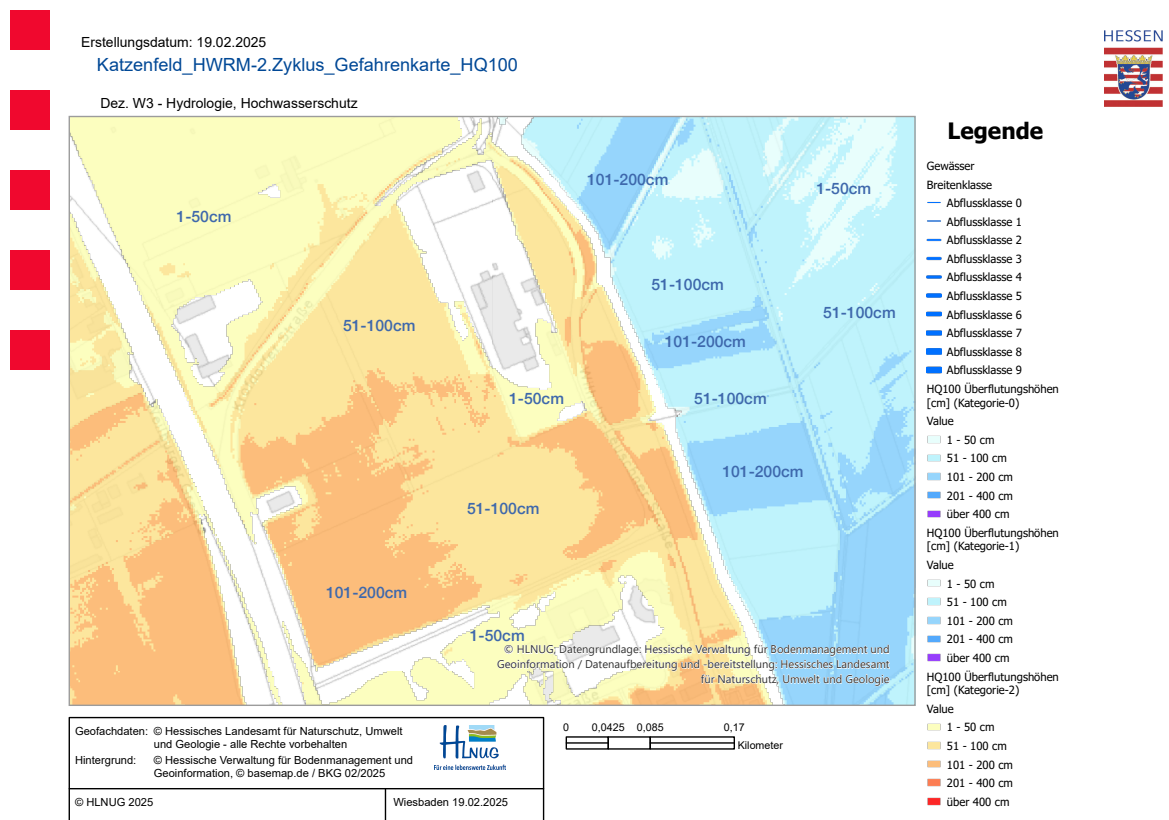


Abbildung 23: Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Gefahrenkarte HQ₁₀₀

Quelle: HLNUG / Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (2025), leicht modifiziert mit Genehmigung des HLNUG/HVBG

Die Fläche wird auf Abb. 23 entsprechend mit HQ_{100} Überflutungshöhen in Kategorie - 2, also als geschützte Fläche hinter Hochwasserschutzmaßnahmen wie u. a. Deiche, dargestellt.

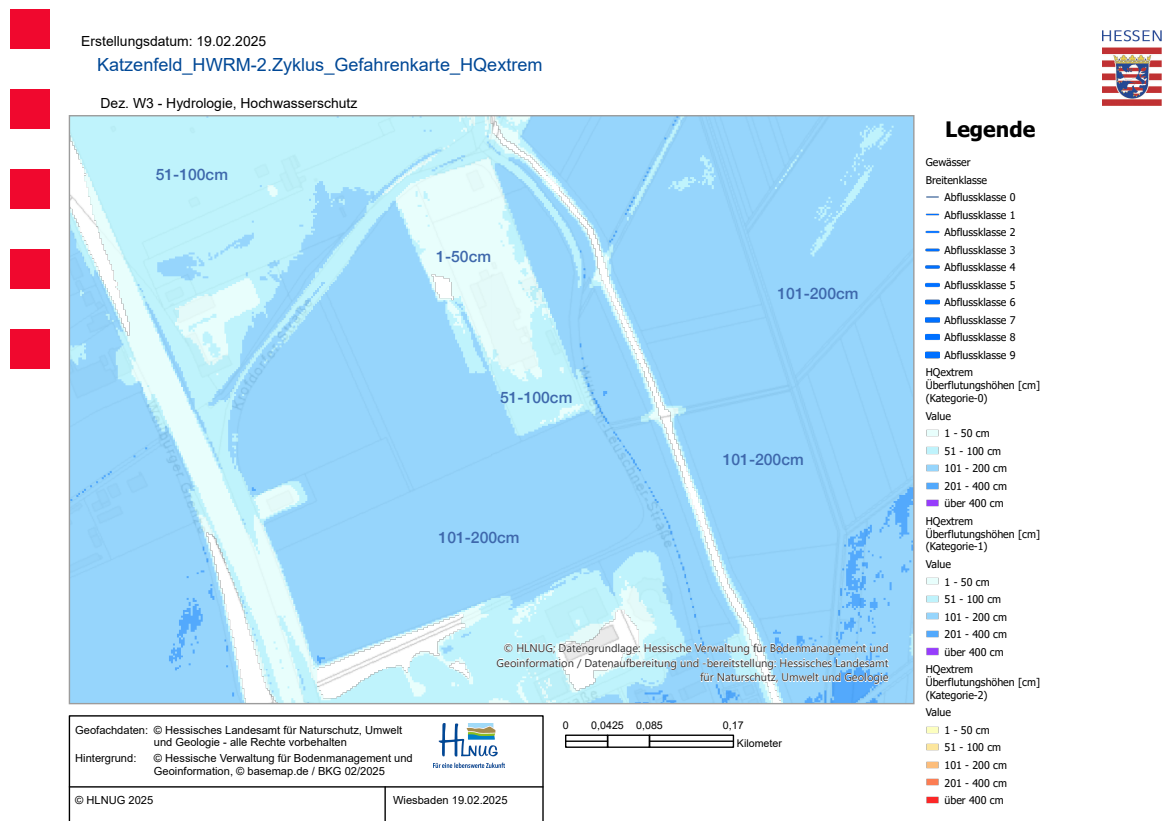


Abbildung 24: Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Gefahrenkarte HQextrem

Quelle: HLNUG / Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (2025), leicht modifiziert mit Genehmigung des HLNUG/HVBG

Überflutungshöhen im HQextrem-Ereignisfall (vgl. Abb. 24) nehmen nach Darstellung aus dem HWRM-Viewer im Plangebiet von Südwesten nach Nordosten von 101-200cm über 51-100cm hin zu 1-50cm ab.

In Berücksichtigung dieser Ausgangslage kommt die Begründung zum Vorentwurf des Bebauungsplans zu dem Schluss, dass nach Vorabstimmung der wasserrechtlichen Anforderungen mit dem BSI und der oberen Wasserbehörde (OWB) hinsichtlich des Planungsziels der Ansiedlung eines Rechenzentrums als KRITIS im Hochwasserrisikogebiet, sowie „der neuen raumordnerischen Vorgaben zum Hochwasserschutz und spezielle[r] Schutz-Vorschriften für Rechenzentren [...] keine grundsätzlichen Bedenken gegen die gesamte Bebauungsplanung und speziell zur Ansiedlung des Rechenzentrums bestehen“ (Gießen 2024a: 32).

Grundsätzlich werden zur Berücksichtigung des Hochwasserrisikos alle Maßnahmen die im Zusammenhang mit dem Rechenzentrenvorhaben stehen, am HQextrem-Fall ausgerichtet (G01: 2). Primär inkludiert dies die geplante Aufschüttung der Rechenzentren-Fläche auf einen Meter über HQextrem als Plateau (G01: 2), um die Fläche auf entsprechende Wassertiefen im Ereigniseintrittsfall anzupassen (ebd.). Angewendet wird dafür der Faktor 1,3 „auf die Differenz des HQ₁₀₀-Wertes und der Bestandshöhe“ (Gießen 2024a: 12).

Betont wird hierbei weitergehend, dass eine hydraulische Simulation des Wasserflusses noch aussteht und entsprechende Details in den noch fortlaufenden Verhandlungen mit dem Investor abzusprechen sind (G01: 2).

In Betrachtung mit Starkregenereignissen und der damit verbundenen Ansicht von Fließpfadkarten, zeigen sich drei Fließpfade, welche das Gebiet nördlich und westlich durchlaufen (vgl. Abb. 25). Gem. FPK zeigen sich keine bestehenden Gebäude innerhalb von Gefährdungsbereichen.

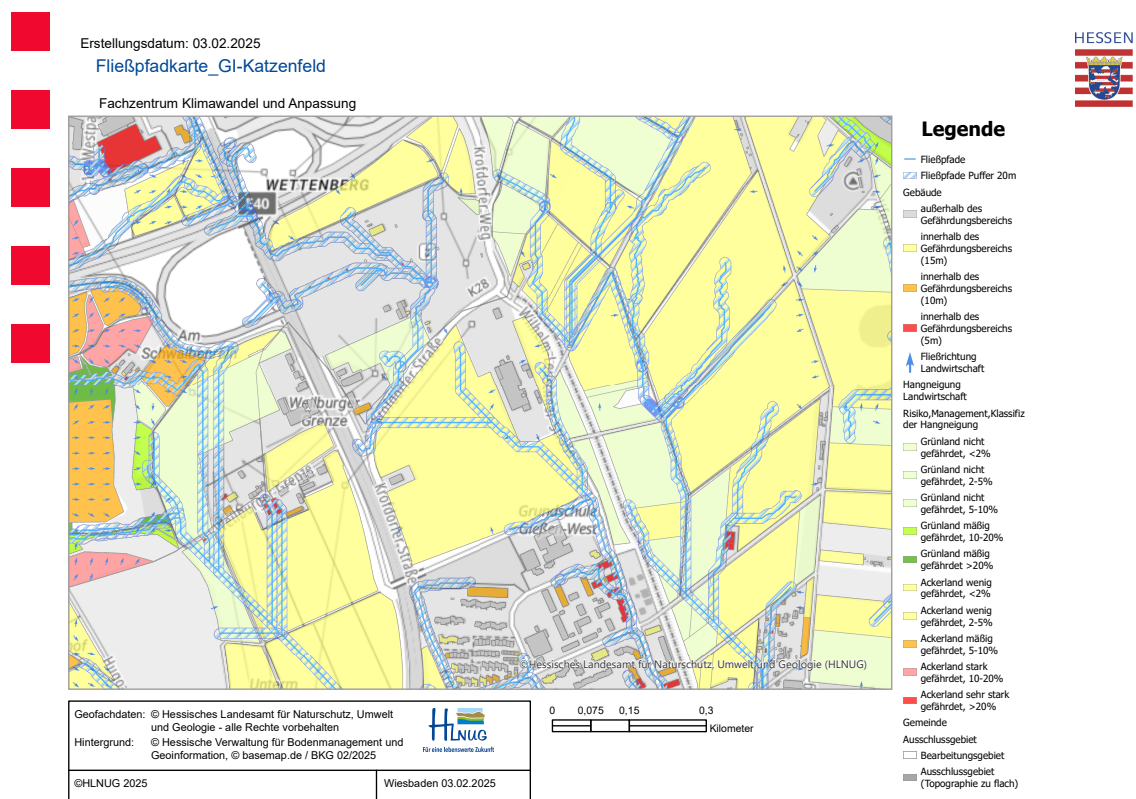


Abbildung 25: Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Fließpfadkarte

Quelle: HLNUG 2025a mit Genehmigung des HLNUG/HVBG

Niederschlagswasser soll im Plangebiet „über neue Kanäle im Trennsystem in den geplanten Erschließungsstraßen zum geplanten Regenrückhaltebecken geführt werden“ (Gießen 2024a: 31). Das Regenrückhaltebecken ist hierbei im Plan-Vorentwurf im Südwesten des Geltungsbereichs festgesetzt.

Abhängig von der angesprochenen hydraulischen Simulation des Wasserabflusses bestünde weitergehend die Möglichkeit einen Notwasserweg im Südosten des Gebiets einzurichten, der anfallendes Wasser aus dem Gebiet ableiten kann.

Für das Gießener Stadtgebiet besteht auf Basis einer Klimaanalyse eine Planungshinweiskarte aus dem Jahr 2014, welche 2022 aktualisiert wurde (vgl. Abb. 26). Die Planungshinweiskarte enthält Informationen bezüglich des Luftaustauschs durch Kalt- und Frischluftzufuhr, zur humanbioklimatischen Belastung im Siedlungsbereich und der bioklimatischen Bedeutung von Grün- und Freiräumen (Gießen 2022). Aus dieser Quelle kann für das Plangebiet Katzenfeld die Erkenntnis gezogen werden, dass keine, bzw. in einer Fläche im Nordosten geringe humanbioklimatische Belastung, sowie eine hohe bioklimatische Bedeutung von Grün- und Freiflächen vorliegt (Gießen 2022).

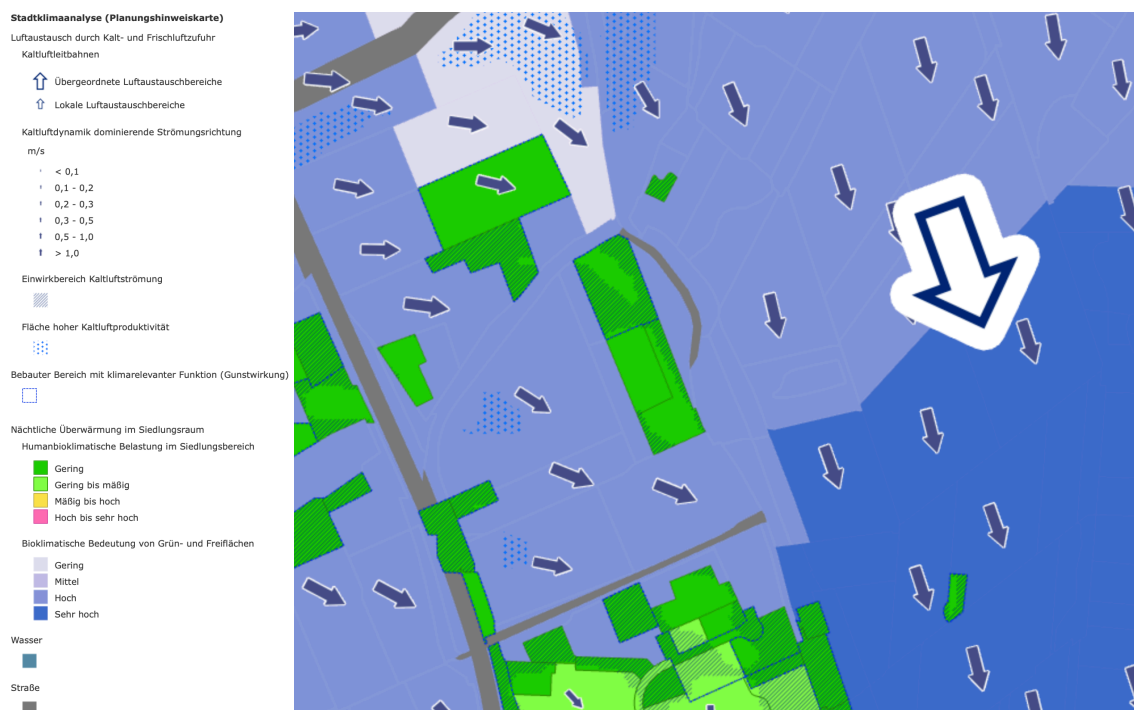


Abbildung 26: Das Plangebiet „Katzenfeld“ - Ausschnitt der Stadtklimaanalyse

Quelle: Gießen 2022

Weitergehend befindet sich ein übergeordneter Luftaustauschbereich östlich des Gebiets im Bereich der Lahnaue, das Plangebiet selbst wird von Nordwesten kommend überströmt (Gießen 2024c: 15).

Satellitendaten, die für den Hitzeviewer Hessen die Datengrundlage bieten, ergeben für das Gebiet „Katzenfeld“ die folgenden Informationen:

- Maximale Landoberflächentemperaturen Sommer 2018: 40°C
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten der Jahre 2001-2020: „sehr warm“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2018: „Dauerheiß“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2019: „Heiß“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2020: „sehr warm“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2021: „sehr warm“

Maßnahmen die im Zusammenhang mit der Hitzebelastung des Gebiets, sowie der bioklimatischen Verträglichkeit stehen, sind grundsätzlich abhängig von einer bioklimatischen Verträglichkeitsuntersuchung, die zum aktuellen Stand der Planung noch in Erarbeitung ist (G01: 3). Auswirkungen könnte das Gutachten zum Beispiel in der Berücksichtigung der Baugrenzen des Vorhabens, in Folge der Analyse der Kaltluftschneisen, haben (G01: 3). Im Allgemeinen wird jedoch betont, das Hitzeschutz u. a. durch technische Maßnahmen des Rechenzentrenbetreibers, wie bspw. der Hitzeisolierung des Gebäudes, erfolgt (G01: 3).

Festsetzungen, die im Zusammenhang mit der bioklimatischen Situation im Plangebiet und auch mit der Anpassung an Hitzeereignissen stehen, betreffen mitunter die Begrünung von Fassaden (G01: 3). Hier wird zum einen planungsrechtlich über § 9 Abs. 1 Nr. 25a BauGB festgesetzt, dass „[f]ensterlose Fassadenflächen ab einer laufenden Wandlänge von 5 m [...] flächig mit einer Fassadenbegrünung zu versehen [sind]. Für die Fassaden am Rechenzentrum sind dafür Rankhilfen vorzusehen“ (Gießen 2024b: 6). Weitgehend wird bauordnungsrechtlich gem. § 91 Abs. 1 Nr. 1 u. 2 HBO festgesetzt, dass „Fassaden von Gebäuden im Sonstigen Sondergebiet Rechenzentrum [...] entweder mittels Begrünung der Fassaden und mithilfe davor befindlicher Bauteile als Rankhilfe in ihrer gesamten Höhe mit einem laubtragenden Bewuchs zu versehen [sind], der gärtnerisch gepflegt, erhalten und bei dem abgängigen Pflanzen binnen Halbjahresfrist erneuert werden“ (Gießen 2024b: 7).

Zu erwähnen ist weitergehend, dass in den festgesetzten Gewerbegebieten, gem. §9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB Flachdächer mit bis zu 10° Dachneigung extensiv zu begrünen sind, diese Festsetzung wird dabei nicht für das SO „Rechenzentrum“ getroffen (Gießen 2024b: 5).

4.5.3. Schutzperspektive II: Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt

In den anschließenden Unterkapiteln wird folgend auf die Betrachtung der ersten Schutzperspektive die zweite Schutzperspektive in Form der Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt analysiert.

Im Zuge des Planverfahrens wird die Stromversorgung als Bestandteil der vertraglichen Vereinbarungen im städtebaulichen Vertrag behandelt (G01: 4). Geplant ist eine vertragliche Absicherung, „einer klimagerechten Stromversorgung und maximalen Wärmeabgabe des Rechenzentrums an das städtische Fernwärmenetz (Gießen 2024a: 6). Die konkreten Details zur Stromversorgung befinden sich derzeit noch in den Vertragsverhandlungen und sind zum Zeitpunkt der Erhebung nicht abschließend geklärt (G01: 4).

Die Planung zum Rechenzentrum weist einen Strombedarf von 60 MW Nennleistung auf (Gießen 2024a: 35) und es soll auf einer Fläche von rund 5 Hektar innerhalb eines „Sonstigen Sondergebiets“ errichtet werden, welches die größte zusammenhängende Teilfläche des Plangebiets darstellt (Gießen 2024a: 36). Die Standortwahl wird dabei insbesondere durch die unmittelbare Nähe zum Umspannwerk Gießen-Nord begründet, das als größtes Umspannwerk im Raum Gießen über ausreichende Kapazitäten verfügt und einen sehr hohen Anteil an Windstrom aus Norddeutschland aufweist (ebd.). Zudem bestehen technische Synergien durch eine im Plangebiet vorhandene Telekom-Einrichtung für leistungsfähigen Datentransport sowie durch den benachbarten Energiestandort der Stadtwerke, über den die Abgabe, Aufbereitung und Einspeisung der Abwärme des Rechenzentrums in das lokale Fernwärmenetz erfolgen soll (Gießen 2024a: 36).

Die Hitzeabstrahlung des Rechenzentrums ist derzeit noch unklar und hängt stark von der konkreten technischen Ausgestaltung des Vorhabens ab (G01: 4). Eine Auflage zur Wärmeeinspeisung ist jedoch geplant (G01: 4). Entsprechend sind sowohl die Stromeinspeisung als auch die Einbindung in das Fernwärmenetz sowie die Qualität der Notstromversorgung Gegenstand des städtebaulichen Vertrags (G01: 4).

Da viele Aspekte - wie die konkrete Abwärmenutzung, die Abstrahlung von Wärme oder technische Details der Energieversorgung - projektspezifisch sind, müssen diese im Einzelfall geprüft und im Rahmen der Verhandlungen mit dem Investor konkretisiert werden (G01: 4).

Darüber hinaus sind Emissionen aus den regelmäßigen Testläufen der Diesel-Notstromaggregate zu berücksichtigen, die sowohl Lärm- als auch Abgasemissionen verursachen können (G01: 4). Allerdings wird von geringen Störungen der angrenzenden Wohnbebauung ausgegangen (G01: 4).

4.6. Anwendung der doppelten Schutzperspektive auf das Fallbeispiel „Großbauheim-Kaserne“ in Hanau

Als zweites Fallbeispiel wird das Konversionsprojekt „Großbauheim-Kaserne“ (Bebauungsplan Nr. 915.3 „Gewerbegebiet Großbauheim-Kaserne“) in der südhessischen Stadt Hanau aus einer doppelten Schutzperspektive heraus analysiert.

Im Folgenden werden in Kapitel 8.6.1 zunächst die Grundlagen der Planung insbesondere in Hinblick auf den räumlichen Bezug, die Rahmendaten, Planungsziele- und Zwecke., sowie Inhalte und Festsetzungen des Bebauungsplans dargestellt.

4.6.1. Planungs- und Vorhabenkontext

Der Standort Großbauheim-Kaserne befindet sich im Süden der Stadt Hanau, im Stadtteil Großbauheim. Westlich angrenzend verläuft die Depotstraße, nord- nordöstlich die Bahnstrecke Hanau-Aschaffenburg, südlich befinden sich weitere Brachflächen des ehemaligen Kasernengeländes und landwirtschaftliche Flächen und östlich grenzt eine Waldfläche an, die dem FFH-Gebiet „Schiffliche bei Großbauheim“ angehört (vgl. Hanau 2021b: 12).

Das Gebiet, welches im Rahmen der Analyse betrachtet wird (Teilplan A), umfasst ca. 29 Hektar (Hanau 2021b: 9).

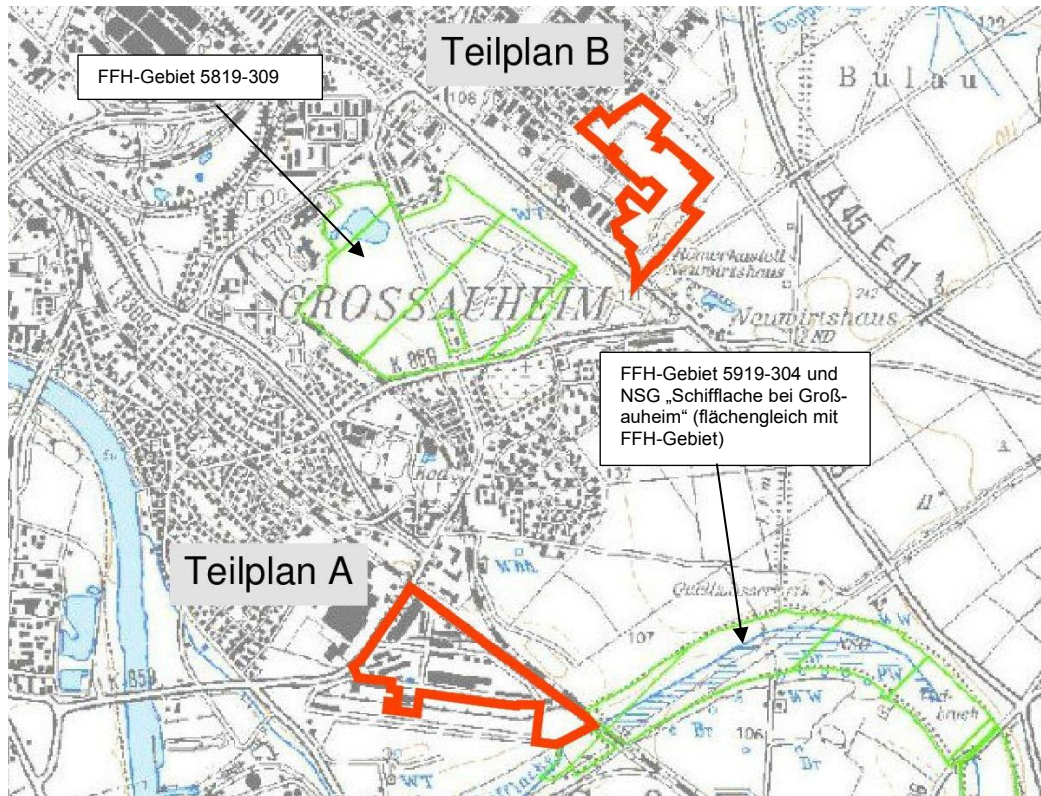


Abbildung 27: Überblick über die Teilpläne des Bebauungsplans „Großauheim-Kaserne“, sowie umgebender FFH- und Naturschutzgebiete

Quelle: Hanau 2021b: 15 mit Genehmigung der Stadt Hanau

Der Bebauungsplan Nr. 915.3 „Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne“ wurde durch die Stadt Hanau als Angebotsbebauungsplan im Regelverfahren nach BauGB mit Umweltprüfung erstellt (Stadt Hanau 2021b: 6). Er besteht aus zwei Teilplänen (Teilplan A und B, vgl. Abb. 27): Teilplan A umfasst das zukünftige Gewerbegebiet, „sowie zwei Flächen für Maßnahmen, die als Ausgleich für die zu erwartenden Eingriffe in Natur und Landschaft festgesetzt werden“. Teilplan B umfasst externe Ausgleichsflächen (Hanau 2021b). Die Analyse des Fallbeispiels wird sich aufgrund des Bezugs zur Rechenzentrenansiedlung weitergehend auf Teilplan A fokussieren.

Planungsanlass ist nach dem Abzug der US-Streitkräfte 2008, die Zuführung des Bereichs zu einer zivilen Nutzung (ebd.). Als Planungsziel verfolgt die Stadt Hanau, die vor Planfeststellung brachliegende Fläche als Gewerbegebiet zu entwickeln und die Fläche einer Nutzung durch Rechenzentren sowie eines Blockheizkraftwerks nutzbar zu machen (ebd.). Der Bebauungsplan ist weitergehend seit dem 20.12.2021 rechtskräftig.

Das Planverfahren ist übergeordnet Teil des Ansiedlungskonzepts für Rechenzentren im Stadtgebiet von Hanau, welches gemäß § 1 Abs. 6 Nr. 11 BauGB bei der Aufstellung von Bebauungsplänen zu berücksichtigen ist. Die Stadt Hanau verfolgt durch das Ansiedlungskonzept das Ziel, im Kontext der steigenden Nachfrage nach RZ-Standorten, das Potential von Standorten „zu heben und aktiv zu begleiten“ (Hanau 2021a: 3) und im Detail „geeignete Flächen für die Ansiedlung von Rechenzentren zu identifizieren und diese proaktiv zu vermarkten“ (ebd.: 4). Zwei übergeordnete Ziele des Ansiedlungskonzepts sollen hier noch erwähnt werden: Zum einen der Versuch, „diese Anfragen dahin zu lenken, wo wir ansonsten Entwicklungshemmnisse haben“ (R02: 6), angesprochen werden hier z. B. Brownfield-Entwicklungen (ebd.). Zum anderen, damit verbunden, das Freihalten weiterer Gewerbegebiete für andere Nutzungen, um den Verdrängungseffekt, welchen Rechenzentren auf andere Gewerbe haben, zu mitigieren (R02: 8).

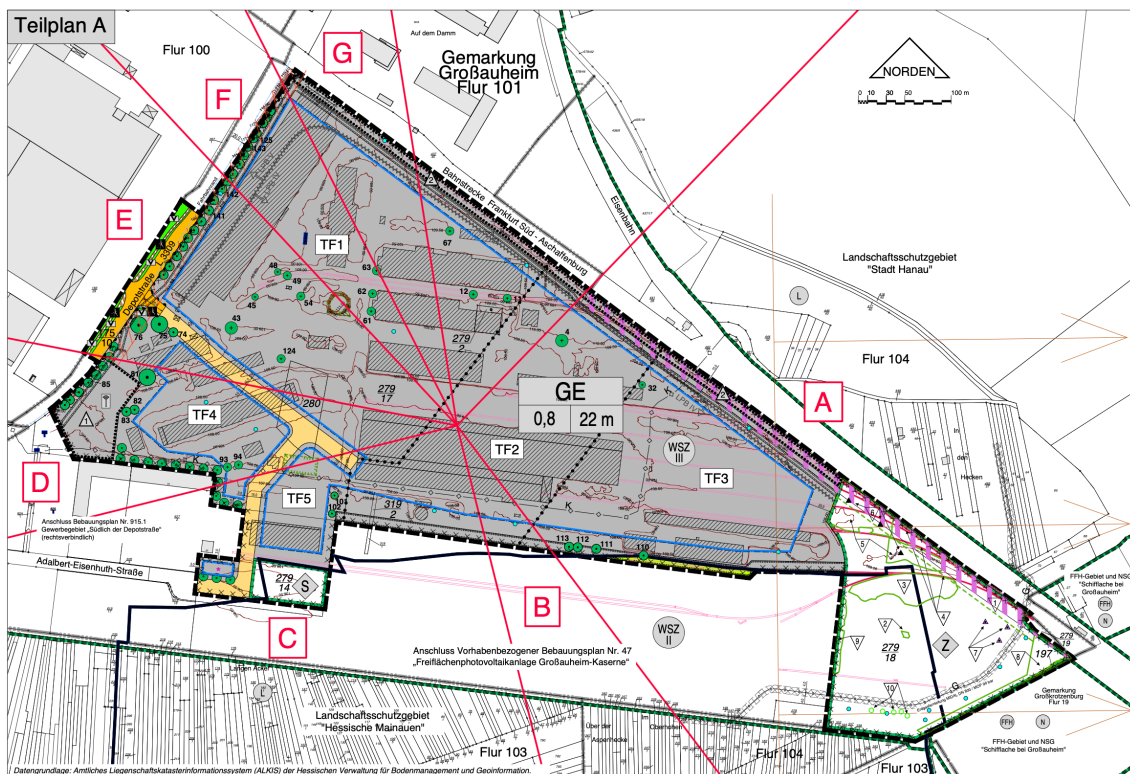
Die Planung im Zusammenhang mit der Großauheim-Kaserne wird im Rahmen des Ansiedlungskonzepts unter Bereichen, „in denen bereits Plan- oder Genehmigungsverfahren im Gang sind“ (ebd.) aufgeführt. Beschrieben werden im Rahmen des Konzepts weitergehend die Einleitung des Bebauungsplanverfahrens, sowie die Verhandlung eines städtebaulichen Vertrags mit P3, der „u. a. ehrgeizige Nachhaltigkeitsziele orientiert am Blauen Engel für Rechenzentren festlegt“ (ebd.: 5). P3 ist in diesem Zusammenhang der Investor, welcher zu Ende des Jahres 2021 mit data4 einen Betreiber des Rechenzentrums gefunden hat (R02: 15). Des weiteren wird der Standort im Rahmen des Konzepts dahingehend bewertet, als dass die Nutzung durch eine gewerbliche Nutzung mit geringer Verkehrsbelastung den städtebaulichen Zielen der Stadt entspricht und die Versorgung durch den Bau eines neuen Umspannwerks auf dem Standort sichergestellt ist (ebd.: 5). Das Ansiedlungskonzept für Rechenzentren ist hierbei parallel zum Bauleitplanverfahren „Großauheim-Kaserne“ entstanden (R02: 6).

Als zusätzliche Gunstwirkung des expliziten Standorts „Großauheim-Kaserne“ erweist sich die bereits bestehende und räumlich günstig verlaufende Fernwärmeinfrastruktur der Stadt Hanau, die im Zuge des Auslaufens des bisherigen Versorgungsmodells aus Quelle der Staudinger Kraftwerke eine vergleichsweise unkomplizierte Integration neuer Kraftwerkstechnologien und die direkte Abführung von Abwärme ermöglicht, ohne dass eine vollständig neue Netzinfrastuktur aufgebaut werden musste (R02: 161).

Nach Rechtskraft des Bebauungsplans befindet sich der Standort derzeit in der Flächenentwicklung bzw. einzelne Infrastruktureinrichtungen, wie die ersten RZ-Blöcke, die Fernwärmezentrale und das Umspannwerk, im Bau (R02: 33).

Der regionale Flächennutzungsplan (RegFNP) 2010 stellt Teilgebiet A vollständig als „Gewerbliche Baufläche - geplant“ dar (Hanau 2021b: 6). Zu berücksichtigen ist, dass im Teilplan A ein Änderungsverfahren zum RegFNP mit dem Ziel durchgeführt wurde, „die gewerbliche Baufläche auf die Baugebietsfläche des Bebauungsplanes zu begrenzen und die im Südosten befindliche gewerbliche Baufläche nicht mehr als solche darzustellen. Ca. 1,7 ha der im Südosten des Plangeltungsbereiches geplanten Ausgleichsfläche im Teilplan A wurden im Regionalplan Südhessen/Regionaler Flächennutzungsplan 2010 als „Ökologisch bedeutsame Flächennutzung mit Flächen für Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und zur Entwicklung von Boden, Natur und Landschaft“ dargestellt“ (Hanau 2021b: 7-8). Das Plangebiet würde gemäß der Begründung zum Bebauungsplan als aus dem RegFNP entwickelt angesehen und ist als Außenbereich nach § 35 BauGB anzusehen (Hanau 2021b: 8).

Im Teilbereich A wird ein Gewerbegebiet gemäß § 8 BauNVO festgesetzt (Hanau 2021c: 2). Als Maß baulicher Nutzung wird als GRZ 0,8 (§ 16 BauNVO i.V.m. § 19 BauNVO), als GFZ 1,6 (§ 16 BauNVO i.V.m. § 20 BauNVO) festgesetzt (Hanau 2021c: 2). Die zulässige Gebäudehöhe (§ 18 BauNVO) beträgt „als Höchstgrenze gemäß zeichnerischer Festsetzung maximal 22m (...) jeweils gemessen in der Gebäudemitte“ (Hanau 2021c: 3). Weitergehend ist festgesetzt, dass die maximale Gebäudehöhe durch Schornsteine um bis zu 10m überschritten werden darf, „wenn ihre Grundfläche insgesamt nicht mehr als 5% der Gebäudegrundfläche ausmacht“ (Hanau 2021c: 4). Weitergehend darf die festgesetzte Höhe der baulichen Anlagen bei den Gebäuden „durch technische Aufbauten um maximal 3m auf höchstens 10% der Dachfläche überschritten werden, wenn die technischen Aufbauten einen Mindestabstand von 3 m zur jeweilig nächsten Gebäudekante einhalten“ (Hanau 2021c: 4). Die Bauweise (§ 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB i.V.m. § 22 BauNVO) wird als abweichend festgesetzt, „Gebäude sind mit seitlichem Grenzabstand zu errichten. Gebäudelängen von über 50m sind zulässig“ (Hanau 2021c: 4). Der Bebauungsplan „Großbauheim-Kaserne“ ist auf der folgenden Abbildung 28 ersichtlich. Zur besseren Visualisierung ist die Darstellung auf die zeichnerische Grundlage des Teilplans A beschränkt, der vollständige Plan ist im Anhang 13 ersichtlich.



Erstellungsdatum: 01.09.2025

HWRM_Gebietskulisse "Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne"

Dez. W3 - Hydrologie, Hochwasserschutz

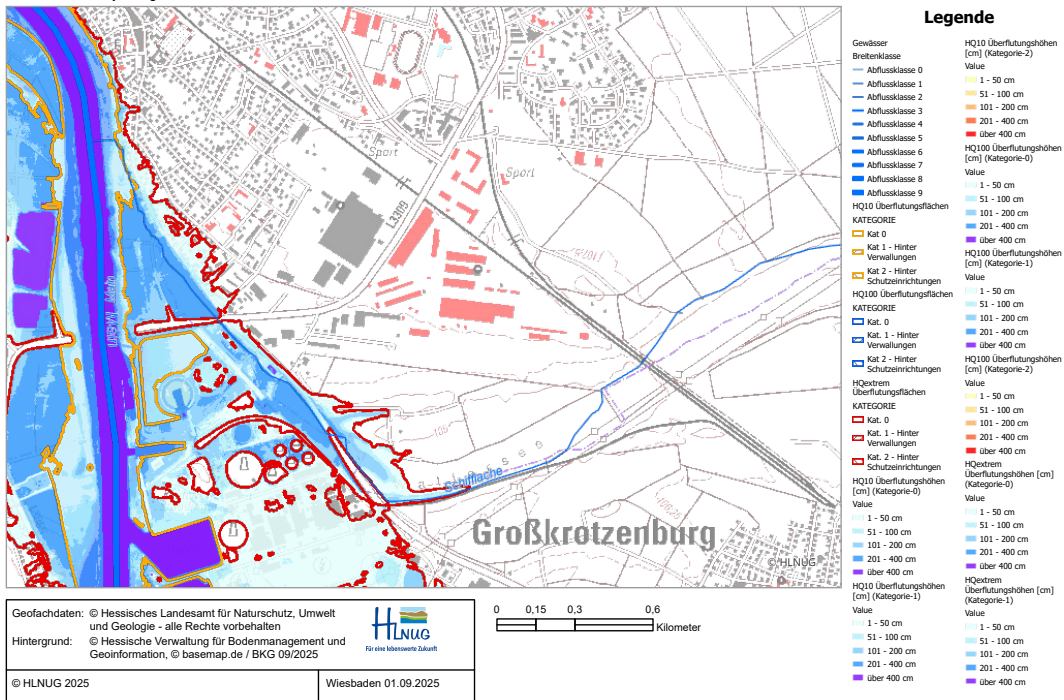


Abbildung 29 : Hochwasser-Überflutungsflächen in der Gebietskulisse Großauheim-Kaserne

Quelle: HLNUG / Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (2025) mit Genehmigung des HLNUG/HVBG

Hanau befindet sich in der Betrachtung des Starkregenvierers Hessen in einem sog. Ausschlussgebiet. Diese inkludieren Kommunen, „deren Topographie zu flach sind, um Fließpfade realistisch darstellen zu können“ (HLNUG 2025a). Die Stadt Hanau hat in diesem Zusammenhang Starkregengefahrenkarten beauftragt, die in zukünftigen Planverfahren herangezogen werden sollen (R02: 57), Starkregen als solches wurde im Rahmen des Planverfahrens „Großauheim-Kaserne“ nicht berücksichtigt (R02: 52; R02: 54).

Betont wird im Kontext des Planverfahrens grundsätzlich allerdings die Betreiberpflicht zur Starkregenvorsorge (R02: 56; R02: 59) und auch die Nichtverfügbarkeit von Daten bzgl. Starkregenereignissen zum Zeitpunkt des Verfahrens (R02: 57).

Textlich festgesetzt werden im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Niederschlagsversickerung (gem. § 9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB) die Aspekte, dass das auf Dachflächen anfallende Niederschlagswasser zur Versickerung zu bringen ist, sowie dass private Erschließungsflächen und „Private Erschließungsflächen - mit Ausnahme der zeichnerisch festgesetzten privaten Straßenverkehrsfläche - und sonstige befestigte Grundstücksfreiflächen [...] so herzu-

stellen [sind], dass anfallendes Regenwasser ebenfalls versickern kann, soweit wasserwirtschaftliche Belange nicht dagegen sprechen“ (Hanau 2021c: 13; R02: 55).

Berücksichtigung findet der Aspekt Hitzebelastung u. a. in Ausführungen zu allgemeinen Klimadaten im Rahmen des Umweltberichts (Hanau 2021d: 40ff.), in welcher das Gebiet als geprägt durch relativ hohe Temperaturen beschrieben wird. Im Zuge dessen wird eingeordnet, dass „aus der Verteilung der Sommertage [...] ersichtlich [ist], dass das Plangebiet in einer der wärmsten Regionen Deutschlands mit häufig vorkommenden Hitzestress liegt“ (Hanau 2021d: 42). Die aktuelle Bedeutung des Schutzgutes Klima wird hierbei als „mäßig“ (Hanau 2021d: 43) beschrieben.

Auch Daten des Hitzeviewers Hessen (HLNUG 2025b) zeigen das Plangebiet in Arealen mit hohem Hitzestress, wobei folgende Informationen herangezogen werden können:

- Maximale Landoberflächentemperaturen Sommer 2018: 38°C - 39°C
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten der Jahre 2001-2020: „Dauerheiß“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2018: „Dauerheiß“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2019: „Dauerheiß“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2020: „Dauerheiß“
- Mittlere Hitzebelastung in den Sommermonaten des Jahres 2021: „Dauerheiß“

Städtische Analysen bestehen für das Stadtgebiet in Form der Stadtklimaanalyse aus dem Jahr 1992. 2025, also nach Rechtskraft des hier betrachteten Bebauungsplans, wurde eine neue Stadtklimaanalyse erstellt.

Im Rahmen des Planverfahrens wurde in Berücksichtigung der Stadtklimaanalyse 1992 ein Gutachten zu Auswirkungen auf das Lokalklima durch das Planvorhaben erstellt (Hanau 2021e, im Folgenden bezeichnet als „Klimagutachten“). Das Gutachten ist dabei auch Bestandteil des Umweltberichts (Hanau 2021d: 92ff.). Das Plangebiet, so das Klimagutachten, zählt zum thermischen Belastungsraum (ebd.: 21). Weitergehend liegen überwiegend Flächen mittlerer Abkühlung vor und südlich angrenzend befindet sich ein Kaltluftentstehungsgebiet (ebd.). Des weiteren wird beschrieben, dass „die nordöstlich gelegenen Waldflächen [...] als Flächen mit klimatischer Ausgleichsfunktion [dienen] wohingegen die nordwestlich angrenzenden Gewerbegebiete als Flächen mit klimatisch geringer bis neutraler Ausgleichsfunktion gekennzeichnet sind (ebd.).

Neben der Darstellung der Ist-Situation verfolgt das Klimagutachten das Ziel zu untersuchen, „ob durch die Umnutzung der Fläche erhebliche Veränderungen der örtlichen klein-klimatischen Situation, insbesondere auf die Kaltluftentstehung, den Kaltluftabfluss und die Durchlüftung verbunden sind“ (Hanau 2021e: 4). Diese Aspekte, welche zur Schutzperspektive II, in Form der Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt zählen, werden entsprechend in Kap. 4.6.3 betrachtet.

Grundsätzlich werden Anpassungsmaßnahmen, die im Zusammenhang mit den Auswirkungen von Hitzebelastung stehen, im Bebauungsplan festgesetzt (R02: 80). Dies inkludiert Maßnahmen zur Dachbegrünung (§9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB). Dabei gilt, dass sämtliche Dachflächen von Haupt- und Nebenanlagen, „mit Ausnahme der Flächen für Belichtungen, für Anlagen zur Nutzung von solarer Strahlungsenergie oder für technische Aufbauten und Anlagen [...] vollständig mindestens extensiv zu begrünen“ sind (Hanau 2021c: 13), sowie als Empfehlung die Gestaltung von „Gebäudefassaden sowie die Oberflächen von Zufahrten zu Stellplätzen und zu Nebenanlagen sowie die Oberflächen der privaten Straßenverkehrsfläche mit hellen Materialien bzw. hellen Belägen“ (Hanau 2021c: 23).

4.6.3. Schutzperspektive II: Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt

Im Rahmen der Schutzperspektive II werden die Auswirkungen des Vorhabens „Großauheim-Kaserne“ auf die Umwelt betrachtet. Berücksichtigt werden die veröffentlichten Plandokumente, sowie die Erkenntnisse des Experteninterviews.

Aus der Quelle der Stadtklimaanalyse Hanau (Erstellung 1992) geht hervor, dass das Untersuchungsgebiet zum thermischen Belastungsraum zählt, überwiegend Flächen mittlerer Abkühlung vorliegen und sich südlich des Gebiets ein Kaltluftentstehungsgebiet anschließt (Hanau 2021e: 21). Die Fläche wird im Rahmen der Planungshinweise der Analyse als Fläche gekennzeichnet, „innerhalb derer Emissionen vermindert werden sollen“ (Hanau 2021e: 22). Außerdem werden Empfehlungen ausgesprochen, den „Luftaustausch zu verbessern, Immissionsschutzpflanzungen vorzunehmen und die Versiegelung der Flächen zu reduzieren“ (Hanau 2021e: S. 22).

Das Klimagutachten betrachtet in der Begutachtung hierbei zwei Planfälle: Zum einen den Neubau eines Gewerbegebiets (Planfall 1), zum anderen den Neubau eines Rechenzentrum-Campus (Hanau 2021e: 11).

Im Rahmen des Klimagutachtens wurde als Auswirkungsanalyse auf das Lokalklima eine mesoskalige Simulation der nächtlichen Situation mit nordöstlicher Anströmung vorgenommen (Hanau 2021e: 26). Erkenntnisse daraus sind zunächst, dass das Plangebiet im jetzigen Zustand gut abkühlt, im angrenzenden Waldbestand wird sie im Vergleich zum Plangebiet und den angrenzenden Freiflächen als geringer beschrieben (Hanau 2021e: 27). Des Weiteren wird hervorgehoben, dass das Plangebiet in seiner derzeitigen Nutzung als Kaserne „weder eine Luftleitbahn noch ein Kaltluftentstehungsgebiet“ darstellt (Hanau 2021e: 27).

Das Klimagutachten kommt weitergehend zu dem Resultat, dass in Planfall 1 „die Realisierung eines Gewerbegebietes [...] durch größere Verbauung zu einer Verringerung des Kaltluftvolumenstroms und der Windgeschwindigkeit im Plangebiet selbst sowie in Lee der Planung [führt]“ (Hanau 2021e: 57). In Betrachtung des Planfalls 2 kommt die Analyse zu dem Schluss, dass „die Realisierung eines Rechenzentrum-Campus durch größere Verbauung und Wärmeemissionen zu einer Verringerung des Kaltluftvolumenstroms und der Windgeschwindigkeit im Plangebiet selbst sowie in Lee der Planung [führt]“. Weitergehend erfolgt die folgende Zusammenfassung:

„Die Erhöhung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur beträgt bei einer wind-schwachen Schönwetterlage punktuell maximal 4,1 K. Dieser Wert wird bei maximalem Stromverbrauch und 100 % Auslastung der Notstromaggregate erreicht. Die Auswirkungen des Rechenzentrum-Campus auf die nächtliche Lufttemperatur bleiben jedoch in den mesoskaligen Simulationsergebnissen auf das Plangebiet selbst sowie den angrenzenden Nahbereich (Radius < 100 m) begrenzt. Auswirkungen auf die benachbarten FFH-Gebiete während windschwacher, wolkenarmer Nächte mit Kaltluftabfluss aus Nord bis Nordnordost sind nicht zu erwarten. Da die warme Abluft leichter ist als die Umgebungsluft, steigt diese auf. Dies führt zu einem bodennahen Ansaugen von Umgebungsluft. Es kommt zu einer Zunahme der Strömung insbesondere nördlich und südlich des Rechenzentrum-Campus. Eine geringe bis mäßige Abnahme der Volumenstrom-dichte ist in Lee des Plangebiets zu erwarten.“ (Hanau 2021e: 57)

Das Gutachten zieht das Fazit, dass sich das Plangebiet aufgrund der „bauliche[n] Vorbelastung und [der] Nähe zum Kraftwerk Staudinger als Gewerbegebiet, bzw. als Rechenzentren-Campus [eignet]“ (Hanau 2021e: 58). Hinsichtlich der Klimaauswirkungen wird betont, dass sich die größte Auswirkung auf die Lufttemperatur auf dem Plangebiet selbst einstellt und durch beide Planvarianten keine Durchlüftung in Hanau beeinflusst wird (Hanau 2021e: 58). Es wird darauf hingewiesen, dass versiegelte Flächen möglichst durch Vegetation verschattet werden, oder helle Oberflächen aufweisen sollen (Hanau 2021e: 59).

Die Aspekte Stromversorgung- und Verbrauch werden bereits im übergeordneten Ansiedlungskonzept der Stadt Hanau als Herausforderungen beschrieben (Hanau 2021a: 3-4). So wird hierbei zum einen dargelegt, dass die Realisierung von Rechenzentren „von der Bereitstellung der Anschlusskapazität für die Stromversorgung maßgeblich bestimmt“ wird (ebd.: 3), sowie der hohe Stromverbrauch einen „Zielkonflikt zu dem Ziel der Klimaneutralität bis 2040“ darstellt (ebd.: 4). Aus u. a. diesen Kontextbedingungen schlussfolgert das Konzept, dass „geeignete Standorte zu identifizieren und alle Spielräume auszuschöpfen [sind], um eine ressourcenschonende und klimaverträgliche sowie städtebaulich verträgliche Steuerung der Gesamtentwicklung der Branche in Hanau zu gewährleisten“ (ebd.: 4).

Auch im Kontext der Großauheim-Kaserne wird das Angebot an Strom als limitierender Faktor beschrieben (R02: 36). In diesem Zusammenhang kann „ein örtlicher Versorger die grundsätzliche Verfügbarkeit bis zu einer Strommenge von 180 MW bestätigen“ (Hanau 2021b: 23).

Limitationen, die im Zusammenhang mit zur Verfügung stehender Strommenge stehen, sind eng mit dem technologischen Fortschritt der Rechenzentrenbranche verbunden, insbesondere der Miniaturisierung bzw. Verdichtung im technologischen Bereich (R02: 35). Diese ermöglicht es, räumlich potentiell mehr Rechenleistung unterzubringen, als ursprünglich vorgesehen war, was mit einem exponentiell steigenden Energiebedarf einhergeht. Es wird im konkreten Planverfahren als bereits absehbar beschrieben, dass die ursprünglich kalkulierte Stromversorgung von 180 MW für die geplanten fünf Blöcke nicht ausreichen wird (R02: 35). Als Reaktion darauf beginnen Rechenzentrumsbetreiber eigene Kraftwerke auf dem Gelände (On-Site Power Generation) errichten zu wollen, um sich nicht von der kommunalen Stromversorgung abhängig zu machen (R02: 35). Ein dahingehender Abstimmungsbedarf ist entsprechend dieser technologischen Entwicklungen fortlaufend (R02: 40).

In diesem Kontext sind Vereinbarungen zur Energieeffizienz ein wesentlicher Faktor. Energieeffizienz wird durch das Energieeffizienzgesetz (EnEfG) vom 13. November 2023 als „das Verhältnis des Ertrags an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zum Energieeinsatz“ (§ 3 Nr. 14 EnEfG) definiert. Zur Festlegung der Energieeffizienz wurden in Anlage N zum städtebaulichen Vertrag zum B-Plan „Großauheim-Kaserne“ Standards festgelegt (Hanau 2021g: 1). Vertraglich vereinbart wurde hierbei, dass die „im Plangebiet entstehenden Rechenzentren [...] mindestens die Energieeffizienzkennzahlen erreichen [müssen], die sich aus den im Zeitpunkt des Bauantrags geltenden Anforderungen des Umweltzeichens „Blauer Engel für Colocations- Rechenzentren“, DE UZ 214, ergeben“ (Hanau 2021g: 1). Weitergehend ist zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses eine PUE von 1,3 zu erreichen (Hanau 2021g: 1).

Eine weitere wesentliche Komponente des städtebaulichen Vertrages ist neben dem Aspekt, dass bei „Inbetriebnahme des ersten Rechenzentrums im Plangebiet [...] 100% der verbrauchten elektrischen Energie aus erneuerbaren Energien zu beziehen [sind], der Aspekt, dass 50% des Strombedarfs des Betreibers „aus Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien der Region (z. B. Photovoltaikanlagen), d.h. max. 70 km Umkreis um das Stadtgebiet von Hanau, oder aus Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung im Stadtgebiet Hanau zu beziehen“ sind (Hanau 2021g: 1, R02: 44). In diesem Zusammenhang wird weitergehend, aufgrund der Vereinbarungen zu Nachhaltigkeitsthemen, hervorgehoben, dass diese Vereinbarungen auch für potentielle Betreiber und deren Erfüllung von ESG-Kriterien von Vorteil sein können (R02: 128).

Auch die Nutzung der im Betrieb der Rechenzentrenanlagen anfallenden Abwärme wird durch den städtebaulichen Vertrag in Anlage N festgelegt. Diese ist entsprechend der vertraglichen Vereinbarungen „vorrangig durch Rekuperation oder ähnliche Prozesse im Vorhaben oder im Plangebiet zu nutzen“ (Hanau 2021g: 2), weitergehend sind die im Plangebiet entstehenden „Büro- und Nebenflächen [...] mit Abwärme aus den Rechenzentren zu beheizen“ (ebd.: 3). Insoweit diese Nutzung nicht möglich ist, verpflichtet sich der Betreiber, „eine Nutzung der durch technische Prozesse entstehenden Abwärme - im jeweils anfallenden Temperaturniveau - durch der Versorgung der Allgemeinheit dienenden Wärmeversorgungsnetze zu ermöglichen. Der Betreiber des Rechenzentrums wird dazu mit dem Betreiber eines örtlichen Wärmeversorgungsnetzes entsprechende Vereinbarungen treffen, wenn dieser das verlangt. Voraussetzung ist die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Nutzung der Abwärme sowie die Vereinbarkeit mit dem Planungsprozess für Rechen-

zentren, die geprüft und einvernehmlich festgelegt wird“ (Hanau 2021g: 3). Zum derzeitigen Stand des Verfahrens wird über die konkrete Abwärmenutzung noch zwischen dem Betreiber und den Hanauer Stadtwerken verhandelt (R02: 98).

Die Nutzung der Abwärme ist hierbei sowohl mit Herausforderungen, als auch mit Potentialen verbunden.

Zu Herausforderungen zählen mitunter hohe technologische Investitionen, um die anfallende Abwärme nutzbar zu machen (R02: 83). Aufgrund der grundsätzlich niedrig temperierten Abwärme (R02: 103) wird im Kontext der Großauheim-Kaserne die Beschaffung einer Wärmepumpe als eine solche Investition als Diskussionspunkt beschrieben (R02: 104). Der Diskussionspunkt ist hierbei mit der Unklarheit darüber verbunden, „was, wieviel, wann [...] geliefert wird an Wärme“ (R02: 108). Ungeklärt ist hierbei die Schnittstelle, bis zu welchem Punkt der Investor, bzw. die Stadt für die Kosten aufkommen muss (R02: 108).

Des weiteren wird Abwärme primär in der winterlichen Heizperiode genutzt, was dazu führt, dass im Sommer die Nachfrage als nicht groß beschrieben wird (R02: 80).

Dennoch bietet die Nutzung der Abwärme zum einen zur Dekarbonisierung der Fernwärme (R02: 85-86), zum anderen grundsätzlich zur Deckung des Fernwärmebedarfs (R02: 94) Potentiale. Es wird hierbei eingeschätzt, dass durch die Rechenzentren in der Großauheim-Kaserne, der Fernwärmebedarf der Stadt Hanau zukünftig gedeckt werden kann (R02: 94). Zusätzlich wird allerdings weitergehend betont, dass nur ein Anteil der Abwärme des Vorhabens dazu benötigt wird, den Fernwärmebedarf zu decken, somit ein Restbestandteil an die Umwelt abgegeben wird (R02: 80, R02: 92). Dies ist auch zusammenhängend mit weiteren Rechenzentrenvorhaben im Stadtgebiet Hanaus zu sehen, in deren Fällen neue Lösungen für die jeweilige Abwärmenutzung entwickelt werden müssen (R02: 94).

Neben der emittierten Abwärme sind auch die Emissionen der mit Rechenzentren verbundenen Notstromaggregate im Zusammenhang mit CO₂ - und Lärmemissionen relevante Auswirkungen von Rechenzentrenvorhaben auf die Umwelt.

Im Rahmen des Umweltberichts wird hierbei im Planfall 2 (realistisches Szenario mit Rechenzentrum-Campus, Heizkraftwerk, Freiluftschaltanlage) mit 116 Notstromdieselmotoranlagen gerechnet, welche in die Bewertung der Auswirkungen auf Schutzgüter berücksichtigt wurden (Hanau 2021d: 11).

Die Diskussion über Notstromaggregate im Kontext des Planvorhabens verdeutlicht ein Spannungsfeld zwischen gesetzlichen Mindeststandards und planerischen Anforderungen an die Luftqualität, den Lärmschutz und die Begrenzung von Emissionen. Obwohl solche Anlagen nach der 44. BImSchV privilegiert sind, da sie nur für seltene und kurze Netzausfälle vorgesehen sind, besteht die Möglichkeit, dass sie faktisch über längere Zeiträume (tlws. 2-3 Wochen im Jahr) betrieben werden (R02: 115). Damit entwickeln sie eine erhebliche Relevanz für Luftschadstoff- und Lärmemissionen - zumal ihre aggregierte Leistung mit der eines Kraftwerks vergleichbar sein kann (R02: 120), dies betrifft gerade sensible Standorte, welche von diesen potentiellen Auswirkungen betroffen sein können (R02: 117).

Es ergibt sich somit ein „Delta“ (R02: 116) aus dem, was Betreiber brauchen, um eine BImSch-Genehmigung zu erhalten und den Standards, die sich eine Kommune wünscht - bspw. im Zusammenhang mit lufthygienischen Aspekten (R02: 116). Gerade für Verhandlungen vor dem Hintergrund des städtebaulichen Vertrags wäre die Verwendung der neuesten Standards in diesem Kontext als relevant zu beachten (R02: 116).

Insgesamt zeigt sich, dass Notstromaggregate zwar formell als „Ausnahmebetrieb“ gelten, aufgrund ihrer Dimension und möglichen Laufzeiten aber faktisch als relevante Emittenten mit substantiellen Auswirkungen auf Luftqualität und Lärmschutz einzuordnen sind.

Das Ansiedlungskonzept für Rechenzentren im Stadtgebiet Hanau (Hanau 2021a) spricht insbesondere im Kontext der Kühlsysteme, welche für den Betrieb der Rechenzentren erforderlich sind, von Folgen in Form eines entweder „hohen Trinkwasserverbrauch[s] insbesondere in der heißen Jahreszeit [...] oder [...] Kühlflüssigkeiten, die bei Austritt klimaschädliche Wirkungen haben können“ (ebd.: 4). Sie ordnet weitergehend ein, dass die technologische Entwicklung dahingeht, „dass die Betriebstemperaturen steigen und zukünftig tendenziell etwas weniger Kühlung nötig ist“ (Hanau 2021a: 4).

Im Kontext des Planverfahrens Großauheim-Kaserne, insbesondere in den Verhandlungen zum städtebaulichen Vertrag, wurden hierbei zu Beginn des Verfahrens WUE („water usage effectiveness“)-Werte diskutiert, welche aufgrund des Wechsels von adiabater Kühlung zur Kühlung mit Kältemaschinen weggefallen sind (R02: 142).

Des weiteren wurde die Wasserversorgungslage im räumlichen Kontext Hanaus nicht problematisiert (R02: 143), was mit der Mainterrassenposition, sowie der Nutzbarkeit mehrerer gut ergiebiger Grundwasserleiter begründet wird (R02: 147). Auch die Lage in Zone III des Trinkwasserschutzgebiets wirkte sich nicht auf den Verbrauch, sondern primär auf die

Schutzmaßnahmen in der Gebietskulisse aus (R02: 147). Eine, in der Begründung beschriebene, Verlegung einer Wassertransportleitung, „sofern für eine umfangreiche Rechenzentrennutzung ein höherer Wasserbedarf notwendig wird“ (Hanau 2021b: 53) wurde ebenfalls nicht notwendig (R02: 149).

4.7. Vergleich und Diskussion

Zu Beginn der Diskussion muss zunächst der unterschiedliche Verfahrensstand beider Fallbeispiele betont werden. Während die Planungen zum Gießener Gebiet „Katzenfeld“ einen Zwischenstand zum Vorentwurf des Bebauungsplans darstellen, konnte im Hanauer Gebiet „Großauheim-Kaserne“ ein abgeschlossenes Bebauungsplanverfahren betrachtet werden. Dennoch bieten beide Planverfahren individuelle Einblicke in die Planungen von Rechenzentren und bieten dabei Anwendungspotential, die Verfahren aus einer doppelten Schutzperspektive zu analysieren. Diese Perspektive ermöglicht eine systematische Analyse zum einen der Klimawandelfolgen, die das Planverfahren betreffen und im Verfahren zu berücksichtigen sind, sowie zum anderen der Auswirkungen des Planvorhabens auf die Umwelt.

Die Ergebnisdiskussion gliedert sich im Folgenden in die thematischen Bereiche, in welchen sich die Forschungsfragen dieses Kapitels verorten: Den Aspekt der planerischen Herausforderungen vor dem Hintergrund der Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben in Hessen, den beiden Schutzperspektiven auf die beiden Fallbeispiele in Gießen und Hanau, sowie der planerischen Handlungserfordernis herausgehend aus den Erkenntnissen der Fallstudienanalyse, sowie der durchgeführten Experteninterviews.

F2.1: Welche (planerischen) Herausforderungen begleiten die zunehmende Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben im Land Hessen?

Zur Diskussion der Forschungsfrage 2.1 soll zunächst kurz auf den zweiten Teil der Frage, das Charakteristikum zunehmender Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben, eingegangen werden. Herangezogen kann hierbei eine Studie der iW-Consult und Detecon, welche eine erhebliche Nachfragenzunahme nach RZ-Flächen identifiziert und diese Nachfrage nach der Gesamtfläche, die für Rechenzentrumstandorte in der Metropolregion bean-

spricht wird auf eine Zunahme bis 2030 von 137%, von derzeit „knapp 113 Hektar auf knapp 268 Hektar“ quantifiziert (iWconsult et al. 2025: 32). Die Studie beschreibt hierbei „[den] Digitalisierungstrend, die verstärkte Nutzung von Cloud-Services, die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf die Arbeitswelt, [den] Anstieg von Onlinehandel, die zunehmende Bedeutung von Virtual Reality und Künstlicher Intelligenz [...]“ (iWconsult et al. 2025: 33) als Trends vor dem Hintergrund dieses Anstiegs. Die Metropolregion ist somit bereits im Status quo als zentraler Standort der Rechenzentrenbranche in Deutschland zu charakterisieren (vgl. Kap. 4.1), fortführend verzeichnet sich auch ein in Zukunft bestehendes Wachstum der Branche in der Region.

Mit Flächen- und Strombedarf stehen dabei zwei zentrale Aspekte im Kern der Herausforderungen, welche mit der zunehmenden Entwicklung von Rechenzentren-Vorhaben im Land Hessen einhergehen.

Zunächst soll hier der Flächenbedarf welcher mit Rechenzentrenvorhaben einhergeht (R01: 32, R04: 6), betrachtet werden. Dieser ist zum einen in Entwicklungen im Bestand und zum anderen in Neuplanungen aufzugliedern.

Entwicklungen im Bestand sind damit verbunden, dass Rechenzentren planungsrechtlich Gewerbegebiete darstellen (R04: 10). Genehmigungen erfolgen in diesem Zusammenhang v. a. über eine immissionschutzrechtliche Prüfung, wobei Rechenzentren „anhand ihrer Unternehmenscharakteristik als gering emittierende Vorhaben klassifiziert“ werden (Diller et al. 2023: 4). Der Charakteristik entsprechend sind Rechenzentren wie erwähnt in allen gewerblich genutzten Gebieten (§§ 6-9 BauNVO) in der Form von Gewerbegebieten (GE), Industriegebieten (GI), Mischgebieten (MI), Kerngebieten (MK), sowie urbanen Gebieten zulässig (Diller et al. 2023: 4). Weitergehend werden Rechenzentrenvorhaben nicht in der Positivliste der Anlage 1 zum Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG) genannt, sind somit nicht UVP-pflichtig (ebd.). Nach hessischer Bauordnung (HBO) werden sie nach § 65 „in einem vereinfachten Baugenehmigungsverfahren zusammen mit der immissionschutzrechtlichen Prüfung der Notstromdieselmotoranlagen i. S. v. Anlage 1 Ziffer 1.1 der 4. BImSchV beurteilt“ (ebd.).

Diese Ansiedlungskulisse im Bestand zeigt sich beispielsweise in der Stadt Frankfurt (R04: 10), in welcher seit den 2010er-Jahren Ansiedlungen primär innerhalb der bestehenden Industrie- und Gewerbeflächenkulisse stattfanden (R01: 6). In Folge dessen wird die Herausforderung skizziert, dass vermehrte Ansiedlungsfragen mit einer Befürchtung der Verdrän-

gung anderer Industrie- und Gewerbebetriebe einhergeht (R01: 6). Im Detail wird dies durch die Stadt Frankfurt dahingehend beschrieben, als dass Rechenzentren „stark bodenpreiswirksam sind und damit eine direkte Flächenkonkurrenz insbesondere für produzierendes Handwerk, Gewerbe und Industrie auslösen“ (Stadt Frankfurt 2020a: 6). Auch das zu Beginn des Kapitels angesprochene Ansiedlungskonzept für Rechenzentren im Stadtgebiet von Hanau weist auf den Preisdruck auf den Gewerbeflächenmarkt hin, welcher „zur Verdrängung von klassischen Gewerbebetrieben führen [kann], die nicht mit den Rechenzentren konkurrieren können“ (Hanau 2021a: 4). Insbesondere bei kleineren Kommunen kann hierbei der mögliche Verdrängungseffekt von Rechenzentren auf Unternehmen anderer Klassifizierungen konträr zur angestrebten wirtschaftlichen Vielfalt stehen, gerade auch wenn sie durch den hohen Flächenanspruch sehr große Anteile der verfügbaren Gewerbeflächen einnehmen (R01: 26).

Im Frankfurter Kontext wurde dem mit einer Aktualisierung des städtebaulichen Entwicklungskonzeptes, dem Gewerbeflächenentwicklungsprogramm, insbesondere in Form der Zielstellung einer räumlichen Clusterung von Rechenzentren, begegnet (R01: 6). Konkret werden hierbei im Rahmen der Definition von Standorttypologien „Eignungsgebiete für unternehmensunabhängige Rechenzentren“ festgelegt und abhängig von den betrachteten Typologien teilweise ausgeschlossen (Stadt Frankfurt 2022b: 1). In Zusammenhang mit einer Transition hin zu nachhaltigeren Rechenzentren beschreiben Soares et al. (2024: 8) das Frankfurter und auch das nationale Vorgehen als graduelle Reform: Punktuelle Anpassungen (auf kommunaler und nationaler Ebene), die die Umweltstandards für neue Rechenzentren schrittweise verschärfen und gleichzeitig deren Wachstumsrate verringern.

Neben den Herausforderungen, die im Hinblick auf den hohen Flächenverbrauch von Rechenzentren zu berücksichtigen sind, stellt auch der Energie- und Strombedarf von Rechenzentren eine zentrale Herausforderung dar (R01: 32, R04: 6). Dieser ist entsprechend der in Kap 4.1 dargestellten Marktdynamik eng mit steigender Digitalisierung verbunden und auch dem Anstieg an KI-Anwendungen (R04: 44). Eine leistungsstarke Stromquellenanbindung ist, wie die notwendigen Flächen für die Baukörper, ebenfalls ein signifikanter Standortfaktor.

Limitation in erstem Sinne ist hierbei die Endlichkeit von Stromkapazitäten, wie beispielsweise in Frankfurt, wo durch Rechenzentren-Betreiber teilweise auf On-Site Power Generation als Alternative zum Warten auf den Ausbau des Stromnetzes gesetzt wird (R01: 10).

Neben den Herausforderungen des Flächen- und Strombedarfs bestehen weitere Herausforderungen, die im Folgenden unter Anwendung der doppelten Schutzperspektive am konkreten Beispiel der beiden Planverfahren in Gießen und Hanau diskutiert werden. Begonnen wird hier mit einer Betrachtung der ersten Perspektive, der Auswirkungen des Klimawandels auf Vorhaben mit Rechenzentren-Bezug und ihre entsprechende Berücksichtigung in den Fallbeispielen.

F2.2: Wie werden die Folgen des Klimawandels auf Rechenzentren in Bebauungsplanverfahren mit Rechenzentren-Bezug berücksichtigt?

Im übergeordneten Kriterienkatalog des BSI zur Standortwahl von Rechenzentren werden zunächst Hochwasser- und Starkregenereignisse in ihren potentiellen Auswirkungen auf Rechenzentren beschrieben. Nähergehend wird dargelegt, dass Rechenzentren „mit allen für den Betrieb erforderlichen Einrichtungen inkl. der Zuwegungen mindestens 2m oberhalb des höchsten Hochwassers seit 1960 (HHW1960) liegen [müssen]“ (BSI 2024: 11), bei mehreren Gewässern gilt der höchste Wert (ebd.). Weitergehend ist zu prüfen, ob sich der Standort in einem trockengefallenen Flussbett befindet, in welchen Grundwasser bei Hochwasser ansteigen und durch Undichtigkeiten in Kellerwänden und -böden eindringen kann (ebd.), laut BSI ist diesem Risiko durch geeignete bauliche Maßnahmen zu begegnen (BSI 2024: 11). Weitergehend wird durch das BSI auf Starkregenereignisse, und ihren möglichen Auswirkungen auf Überlastungen des örtlichen Abwassersystems hingewiesen (BSI 2024: 12). Ein „höchstverfügbares RZ“ ist demnach laut BSI so herzurichten, „dass alle betriebswichtigen Einrichtungen (z. B. NEA inklusive Frischluftversorgung, USV³⁵, Klimatisierung, Energieversorgung) bis zu einer Überflutung der Rückstauenebene um bis zu 1 m störungsfrei arbeiten“ (BSI 2024: 12).

Hochwasser wird zunächst grundsätzlich bei beiden Verfahren, dem Gebiet „Katzenfeld“ und der „Großauheim-Kaserne“ betrachtet. Im ersten Fall führt die Lage in einem HQ_{extrem}-Gebiet zur Anpassung der Rechenzentren-Planung auf jene Eintrittswahrscheinlichkeit, im zweiten Fall befindet sich das Plangebiet in keiner Hochwasser-Risikokulisse.

Starkregen wird primär im Fallbeispiel „Katzenfeld“ betrachtet. Hier führen Fließpfadkarten zu Integration eines Regenrückhaltebeckens, weitere Anpassungen sind abhängig von

der hydraulischen Simulation des Wasserabflusses. Im Fallbeispiel „Großauheim-Kaserne“ finden Starkregenereignisse aufgrund mangelnder Datenlage keine Berücksichtigung.

Während Hitze in beiden Fallbeispielen betrachtet wird, ist eine damit zusammenhängende bioklimatische Verträglichkeitsuntersuchung im Falle Gießens noch on-going, in Hanau wurde im Rahmen des Klimagutachtens abgewogen, dass das RZ keine signifikante Auswirkungen auf das Siedlungsklima hat.

Zur Gegenüberstellung der angesprochenen Facetten erfolgt in Tabelle 12 ein Vergleich beider Fallstudien hinsichtlich der ersten Schutzperspektive. Dabei wird dargestellt, welcher Aspekt (Hochwasser, Starkregen und Hitze) konkret betrachtet wurde, welche Voraussetzungen vor allem inhaltlicher Natur bestehen, um Schutzperspektive I zu analysieren, und wie die jeweiligen Aspekte im Rahmen beider Verfahren zum Zeitpunkt der empirischen Erhebung berücksichtigt wurden. Die Voraussetzungen zur Analyse der ersten Schutzperspektive umfassen einerseits die Datenquellen, die im Rahmen der Fallstudie verwendet wurden, bspw. die landesweite Klimaanalyse, und andererseits die Dokumente, die Bestandteile des Planungsverfahrens sind, wie das Hanauer Klimagutachten (Hanau 2021e) zum Planverfahren.

Perspektive und Fallbeispiel	Betrachteter Aspekt	Voraussetzungen zur Analyse der Schutzperspektive I	Berücksichtigung im B-Plan Verfahren z. Zt. der Erhebung
Ex-ante Perspektive auf das Fallbeispiel Katzenfeld (Vor-Entwurf)	Hochwasser	Hochwasserrisiko- und Gefahrenkarten	- Lage im ÜSG gem. § 78b WHG - Aufschüttung des RZ-Areals auf 1 m über HQ_{extrem} - Details sind Bestandteil der Verhandlungen mit dem Investor
	Starkregen	Fließpfad- bzw. Starkregengefahrenkarten	- Dimensionierung des RRB und von Versickerungsbecken - Pot. Einrichtung eines Notwasserwegs
		- Analyse der Daten aus Quelle der landesweiten Klimaanalyse und des Hitzeviewers Hessen - Planungshinweiskarte Klima	Pot. Berücksichtigung von Kaltluftschneisen im Rahmen der Baugrenzen (abh. von bioklimatischer Verträglichkeitsuntersuchung)

Ex-post Perspektive auf das Fallbeispiel Großauheim-Kaserne (Rechtskraft)	Hitze	● Bioklimatische Verträglichkeitsuntersuchung (im Fallbeispiel zum Zeitpunkt der Erhebung on-going)	• Fassadenbegrünung (§ 9 Abs. 1 Nr. 25a BauGB) • Technischer Hitzeschutz als Aufgabe der RZ-Betreiber
	Hochwasser	● Hochwasserrisiko- und Gefahrenkarten	• Lage außerhalb von HW-Gebieten
	Starkregen	● Fließpfad- bzw. Starkregengefahrenkarten (im Fallbeispiel nicht vorhanden)	• Betonung des Betreiberschutzes hins. Starkregen • Infiltrationsmaßnahmen durch § 9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB
	Hitze	● Analyse der Daten aus Quelle der landesweiten Klimaanalyse und des Hitzeviewers Hessen ● Klimagutachten auf Basis der Stadtklimaanalyse	• Größte Auswirkung auf die Lufttemperatur im Plangebiet selbst, keine Beeinflussung der Durchlüftung in Hanau • Dachbegrünung durch §9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB • Fassadengestaltung mit hellen Materialien / Belägen

Tabelle 12: Vergleichender Überblick zur Anwendung der ersten Schutzperspektive

Quelle: Eigene Darstellung

Anmerkung: ● = Voraussetzung ist beobacht-/analysierbar, ● = Voraussetzung ist teilweise beobacht-/analysierbar, ● = Voraussetzung ist nicht beobacht-/analysierbar

Die vergleichende Aufstellung zeigt, dass bereits zu Beginn des Verfahrens, bzw. zum Zeitpunkt des Vor-Entwurfs des Bebauungsplans eine Integration von Datenquellen zur Betrachtung der Aspekte Hochwasser, Starkregen und Hitze eine Analyse der ersten Schutzperspektive ermöglicht. Als Hindernis ist hierbei allerdings die fehlende Möglichkeit Fließpfad- bzw. Starkregengefahrenkarten im Kontext des Hanauer Fallbeispiels einzubeziehen, hervorzuheben.

Im Folgenden wird nun die zweite Schutzperspektive, im Sinne der Auswirkungen der Rechenzentren-Vorhaben auf die Umwelt und die entsprechende Berücksichtigung in den beiden Fallbeispielen diskutiert.

F2.3: Wie können die Auswirkungen von Rechenzentren-Vorhaben auf die Umwelt im Rahmen von kommunalen Bauleitplanverfahren berücksichtigt werden?

Ein zentrales Element der Berücksichtigung von Umweltauswirkungen der Rechenzentren-Infrastruktur stellt im Zeitpunkt zu welchem beide Fallbeispiele betrachtet wurden („Großauheim-Kaserne“: Rechtskraft 2021; „Katzenfeld“: Vorentwurf 2024) der städtebauliche Vertrag dar. Bei ersterem ist es insbesondere Anlage N zu Nachhaltigkeitsanforderungen an den Betreiber (Hanau 2021g).

Zunächst wurde, im Hanauer Fallbeispiel, vertraglich vereinbart, dass 100% der „verbrauchten elektrischen Energie aus erneuerbaren Energien zu beziehen [ist]“ (Hanau 2021g: 1) und der Betreiber „50 % seines Strombedarfs aus Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien der Region (z. B. Photovoltaikanlagen), d.h. max. 70 km Umkreis um das Stadtgebiet von Hanau, oder aus Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung im Stadtgebiet Hanau zu beziehen [hat]“ (ebd.). Weitergehend ist die Einrichtung eines Klimafonds zu beachten, in welchen der Betreiber „für den Anteil des Strombedarfs, der nicht aus Anlagen der Region bedient wird, [...] einen Betrag in Höhe von 0,025 ct/KWh an die Stadt Hanau ab[führt], die diesen Betrag in ein Sondervermögen zur Förderung von Projekten zur Klimaneutralität (Klimafonds) einzahlen wird“ (Hanau 2021g: 1). Hier wird die Notwendigkeit einer exakten Begründung des Vorhabenbezugs hervorgehoben (R02: 121). Hierbei argumentieren auch Al Kez et al. (2022: 10), dass ein höherer Anteil an erneuerbarer Energieerzeugung zu einer geringeren Umweltbelastung von Rechenzentren führt.

Eng verbunden mit dem Aspekt des Energieverbrauchs ist auch die Energieeffizienz der Rechenzentren. Hier wird zum einen vereinbart, dass „mindestens die Energieeffizienzzahlen erreich[t werden müssen], die sich aus den im Zeitpunkt des Bauantrags geltenden Anforderungen des Umweltzeichens „Blauer Engel für Colocations-Rechenzentren“, DE UZ 214, ergeben“ (Hanau 2021g: 1). Durch das Umweltzeichen werden laut der Organisation „Blauer Engel“ u. a. jene Co-Location-Rechenzentren ausgezeichnet, „deren Gebäudetechnik besonders energieeffizient und ressourcenschonend betrieben wird“ (Blauer Engel 2020: 1). Zum anderen besteht eine Vereinbarung auf eine PUE von 1,3 (Hanau 2021g: 1). Im Zusammenhang der Festlegung auf einen PUE, werden entsprechende Werte inzwischen durch das Energieeffizienzgesetz festgeschrieben, eine Festlegung auf kommunaler Ebene „erscheint somit nicht mehr erforderlich“ (HMDI 2025: 32).

Eine weitere zentrale Umweltauswirkung, deren Nutzung ebenfalls in beiden Fallstudien primär städtebaulich vertraglich festgesetzt wird, ist die Abwärme des Rechenzentrums. Im Fallbeispiel „Großauheim-Kaserne“ ist die im Betrieb entstehende Abwärme „vorrangig durch Rekuperation oder ähnliche Prozesse im Vorhaben oder im Plangebiet zu nutzen [...], [d]er Betreiber verpflichtet sich, soweit die Nutzung insoweit nicht möglich ist, eine Nutzung der durch technische Prozesse entstehenden Abwärme – im jeweils anfallenden Temperaturniveau – durch der Versorgung der Allgemeinheit dienende Wärmeversorgungsnetze zu ermöglichen“ (Hanau 2021g: 2-3). Das Beispiel „Katzenfeld“ in Gießen verdeutlicht insbesondere aufgrund des Punkts, dass konkrete Abwärmenutzung und die Abstrahlung der Wärme des Rechenzentrums im Einzelfall zu prüfen sind und im Rahmen der Verhandlungen mit dem Investor konkretisiert werden müssen (G01: 4), dass Abstimmungen mit Investor und Betreiber fortlaufend und zentral sind, um Abwärme nutzbar zu machen und es weitergehend bereits in der Standortwahl zentral ist, die notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen für die Nutzung zu gewährleisten.

Die Nutzung bzw. auch die Nutzbarmachung von Abwärme ist hierbei ambivalent hinsichtlich Herausforderungen und sich bietenden Potenzialen zu betrachten. Erstere verdeutlichen sich insbesondere im Hinblick auf hohe Investitionskosten, die im Zusammenhang mit der Nutzbarmachung stehen (R02: 83). Diese zeigen sich bspw. in dem Punkt, dass auftretende Abwärme originär niedrig temperiert ist und zur Nutzung in Nah- und Fernwärmenetze Wärmepumpen zur Erhöhung der Temperatur notwendig werden (R02: 103-104). Zentral ist hierbei die Klärung der Schnittstelle, bis wohin der Investor, bzw. ab wo die Stadt für diese Kosten aufkommen muss. Grundsätzlich zeigt sich in diesem Punkt eine starke individuelle Projektabhängigkeit, technische Aspekte sind entsprechend auch aufgrund der zunehmend steigenden Effizienz in Fall- zu Fallbasis mit den jeweiligen Investoren zu verhandeln (G01: 4). Zentral erscheint hierbei das Hinzuziehen einer externen Beratung sowie qualifiziertem Rechtsbeistand, welche auf fachlicher Augenhöhe mit Investoren in Verhandlungen Expertise beitragen können (R02: 127, R02: 136). Als weitergehend zentral wird auch die politische Rückendeckung während Verhandlungen beschrieben (R02: 127).

Potenziale zeigen sich im Sinne der Nutzung von Abwärme allerdings durchaus, wie bspw. in ihrem Beitrag zur grundsätzlichen Deckung des Fernwärmebedarfs (R02: 94, R02: 102), wofür allerdings die aufgeführten Grundvoraussetzungen geklärt werden müssen, als auch zur Dekarbonisierung desselben (R02: 85-86).

Weitere Auswirkungen von Planvorhaben mit Rechenzentrenbezug stellen Emissionen der Notstromaggregate dar. Diese können, gerade in Planvorhaben in der Größenordnung der Großauheim-Kaserne, hier wird im Planungsszenario mit 116 Dieselgeneratoren gerechnet (Hanau 2021d: 11), zu hohen Lärm- und CO₂-Emissionen beitragen (R02: 120, G01: 4). Hier besteht lt. ExpertInnen die Notwendigkeit klarerer Regelungen, um Konflikte zwischen kommunalen Nachhaltigkeitszielen und den Voraussetzungen der RZ-Betreiber hinsichtlich BImSchG-Genehmigungen, zu klären (R02: 116).

Während im Rahmen der Gießener Fallstudie der Wasserverbrauch des Vorhabens in der Erhebung nicht thematisiert wurde, zeigt das Fallbeispiel „Großauheim-Kaserne“ einen Wechsel von adiabater Kühlung zu einer Kühlung mit Kältemaschinen, weswegen WUE-Werte im Verfahren nicht weiter konkretisiert wurden (R02: 142). Dennoch besteht in Betrachtung des Aspekts Wassereffizienz der Bedarf, diesen in Diskussionen um Effizienzwerte und auch der Betrachtung von Kühlungstechnologien in Verhandlungen mit Investoren und RZ-Betreibern zu berücksichtigen.

Um die diskutierten Facetten zu vergleichen, erfolgt in Tabelle 13 eine Betrachtung beider Fallstudien im Kontext der zweiten Schutzperspektive, worin, wie auch im Rahmen der Diskussion zur ersten Schutzperspektive, Voraussetzungen zur Analyse inkludiert sind. In den Voraussetzungs-Aspekt werden hierbei die Dokumente, welche zum Zeitpunkt der empirischen Erhebung verfügbar waren, einbezogen. Dies inkludiert insbesondere die Begründung, den Umweltbericht sowie den städtebaulichen Vertrag.

Perspektive und Fallbeispiel	Betrachteter Aspekt	Voraussetzungen zur Analyse der Schutzperspektive II	Berücksichtigung im B-Plan Verfahren z. Zt. der Erhebung
Ex-ante Perspektive auf das Fallbeispiel Katzenfeld (Vor-Entwurf)	Stromversorgung	● Begründung zum B-Plan ● stV	• Ziel: Klimagerechte Stromversorgung • Details sind Bestandteil der Vertragsverhandlungen zum stV (on-going)
	Abwärme	● stV	• Abwärmenutzung ist geplant (Einbindung in das Fernwärmenetz) und Bestandteil der Vertragsverhandlungen zum stV

Ex-post Perspektive auf das Fallbeispiel Großauheim-Kaserne (Rechtskraft)	Stromversorgung	● stV	• PUE: 1,3 • 100% der verbrauchten elektrischen Energie sind aus EE zu beziehen, 50% des Stromverbrauchs dabei aus regionalen EE
	Abwärme	● stV	• Abwärmenutzung im Plangebiet • Deckung des Fernwärmebedarfs durch die Nutzung von Abwärme
	Lärm- und CO ₂ -Emissionen	● Umweltbericht	• Mit hohen Emissionen wird gerechnet, Konflikt zwischen kommunalen Nachhaltigkeitszielen und Anforderungen an Betreiber
	Wasserverbrauch	● pot. stV	• WUE-Werte wurden durch den Wegfall adiabater Kühlung nicht weiter konkretisiert

Tabelle 13: Vergleichender Überblick zur Anwendung der zweiten Schutzperspektive

Quelle: Eigene Darstellung

Anmerkung: ● = Voraussetzung ist beobacht-/analysierbar, ● = Voraussetzung ist teilweise beobacht-/analysierbar, ● = Voraussetzung ist nicht beobacht-/analysierbar

Der Vergleich verdeutlicht, dass zum Zeitpunkt des Vor-Entwurfs verschiedene Umweltauswirkungs-Facetten noch nicht abschließend analysiert werden können, da insbesondere Verhandlungen zum städtebaulichen Vertrag zum Stand der Erhebung noch in der Durchführung waren. Dennoch hebt die Gegenüberstellung die Notwendigkeit hervor, die verschiedenen Fußabdrücke von Rechenzentren (vgl. Al Kez 2022) als auch die Nutzung von Abwärme u. a. zur Dekarbonisierung des Fernwärmehaushalts (vgl. Yuan et al. 2023: 14), frühzeitig in das Planverfahren und auch insbesondere in die Vertragsverhandlungen zum städtebaulichen Vertrag zu integrieren.

Die Analyse der Forschungsfrage 2.1 zu Herausforderungen, welche die zunehmende Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben im Land Hessen begleiten, als auch die Betrachtung der doppelten Schutzperspektive, angewendet auf die Fallbeispiele „Katzenfeld“ in Gießen und „Großauheim-Kaserne“ in Hanau (Forschungsfragen 2.2 und 2.3), verdeutlichten die inhaltliche und thematische Komplexität von Rechenzentren-Vorhaben im Allgemeinen. Die Erkenntnisse insbesondere hinsichtlich der Aspekte Flächen- und Stromverbrauch, Abwärmenutzung und Emissionen der Notstromaggregate sollen im Folgenden dahingehend

betrachtet werden, inwiefern in diesen Themenkomplexen Handlungsbedarf in der räumlichen Steuerung von Rechenzentren-Vorhaben besteht.

F2.4 In welchen Aspekten kann ein Handlungsbedarf in der räumlichen Steuerung von Rechenzentren-Vorhaben identifiziert werden?

Im Allgemeinen besteht zunächst ein Bedarf darin, Flächenpotentiale für Rechenzentrenstandorte zu identifizieren. Im Rahmen der Experteninterviews wird in diesem Zusammenhang zum einen angesprochen, dass, ausgenommen im Stadtgebiet Frankfurts, genügend Gewerbeflächenpotentiale bestehen (R01: 32). Zum anderen wird allerdings ebenfalls hervorgehoben, dass Rechenzentren räumlich dorthin gesteuert werden sollten, wo sie einer Kommune auch „Nutzen bringen“ (R02: 6):

„Letztlich ist aber, [...] für uns wichtig als Kommune, dass die Rechenzentren der Kommune auch, also uns als Stadt Nutzen bringen. Also dass wir nicht einfach nur sagen ja, wir wollen Digitalisierung und überall Rechenzentren wunderbar, sondern dass wir eben sagen ja, das ist für uns eine Möglichkeit, Probleme auch zu lösen, andere Probleme, die wir haben“ (R02: 6).

Hinsichtlich dessen wird auch im weiteren Sinne eine abgewogene Gewerbeflächensteuerung angesprochen, hierbei einerseits zur Minimierung einer Verdrängung anderer Gewerbe durch Rechenzentren, andererseits zur Nutzung positiver Effekte, welche durch hohe Investitionen der Rechenzentrenbranche zusammenhängen, um bspw. auf Brownfield-Flächen Bodensanierungen (R02: 168), bzw. i. A. Altstandort-Revitalisierungen (R02: 211) ermöglichen zu können. Außerdem wird der notwendige Ausschluss von Rechenzentren auf landwirtschaftlichen Außenflächen thematisiert (R02: 168).

Wie das Gießener Fallbeispiel „Katzenfeld“ aufzeigt, ist insbesondere die Kubatur der Rechenzentrengebäude hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Blockade von Kaltluftströmen zu betrachten. Wenn auch Rechenzentren nicht über den Regionalplan dargestellt werden (I01: 34), ergibt sich aus der Problemstellung heraus dennoch die Notwendigkeit zu analysieren, wie Rechenzentren auch aufgrund der hohen räumlichen Entwicklungsdynamik in VRG und VBH für besondere Klimafunktionen berücksichtigt werden können (R02: 206-208). Wie in Kap. 2.3.1 dargestellt, ist die Grundlage dieser Gebietskategorien „eine Bewertung der Ausgleichsräume, die für die Belüftung von Siedlungsgebieten (Wirkraum)

sorgen“ (iMA 2022: 13). Das den Gebietskategorien zugrunde liegende Vorgehen ist weitergehend „die Ermittlung der thermisch/lufthygienisch belasteten (Siedlungs-)Räume sowie die Identifizierung der möglichst unbelasteten Luftleitbahnen einschließlich der ihnen zugeordneten Kaltluftproduktionsgebiete, die eine ausgleichende Wirkung (Ausgleichsraum) auf die belasteten Wirkräume ausüben können“ (iMA 2022: 13). Gerade aufgrund dessen, dass Rechenzentren, so zumindest in beiden Fallbeispielen an den Ortsrändern lokalisiert sind, ergibt sich daraus weitergehender Forschungs- und Handlungsbedarf.

Zu thematisieren ist hierbei auch grundsätzlich die Rolle des Regionalverbands Frankfurt-RheinMain, welcher den Handlungsauftrag im Sinne der planerischen Steuerung bei der jeweiligen Kommune und den Handlungsauftrag der konkreten Ausgestaltung des Bauvorhabens bei Kommune sowie den Rechenzentrenbetreibern verortet (R01: 30, R04: 26).

In weiterem Handlungsbedarf ist die Nutzung der durch Rechenzentren emittierten Abwärme zu thematisieren. Gerade eine räumliche Steuerung hin zu Alternativen der Abwärmennutzung ausschließlich für Fernwärme, hin zu Nutzungsmöglichkeiten, die eine ganzjährige und kontinuierliche Nachfrage nach Wärme aufzeigen, industrielle oder landwirtschaftliche Bereiche werden dort skizziert, bietet Potenziale die aufgezeigten negativen Outcomes (Saisonalität der Nutzung, Kostenintensität zur höheren Temperierung der Abwärme für Fernwärmenetze) zu mitigieren (R02: 101). Dennoch bietet die Nutzung von Abwärme für die Deckung des Fernwärmebedarfs Potenziale - hierbei auch zu dessen Dekarbonisierung, im Falle, dass das Rechenzentrum städtebaulich vertraglich seinen Strom von erneuerbaren Energien bezieht, wie das Fallbeispiel „Großauheim-Kaserne“ aufzeigt.

In diesem Zusammenhang wird auch ein notwendiger Erfahrungsaustausch zwischen Kommunen erkennbar, insbesondere um ein ungleiches Kräfteverhältnis zwischen finanzstarken Investoren und kleineren Kommunen ausbalancieren zu können:

„Also wir brauchen da so einen Erfahrungsaustausch und also weil es halt dann doch viele kleine Kommunen gibt die da auch ja total überfordert sind von dem was damit zusammenhängt und (..) das ist halt kein ausbalanciertes Kräfteverhältnis zwischen so einem Investor, der da mehrere Milliarden vielleicht investieren will und so einer Kommune mit 15.000 Einwohnern“ (R02: 168).

Ein Beratungsgremium auf Ebene des Landes wird hier als sinnvoll angesehen (R02: 182) gerade um für kleinere Kommunen den finanziellen Aufwand, externe Beratung zu beauftragen, zu kompensieren (R02: 201). Anlaufstellen für Beratungen bestehen hierbei bereits in Form des hessischen Rechenzentrenbüros, angesiedelt bei der Hessen Trade and Invest

(HTAI) (HMDI 2026), sowie auf Ebene des Regionalverbands FrankfurtRheinMain (Regionalverband FrankfurtRheinMain 2026: 1).

Handlungs- bzw. primär Forschungsbedarf besteht weitergehend darin, Machbarkeiten von Speichermöglichkeiten der emittierten Abwärme (vgl. Li et al. 2021) im Gebiet der Metropolregion FrankfurtRheinMain zu analysieren, um zusätzliche Potentiale der Abwärmenutzung zu erschließen.

Um knapp werdende Stromverfügbarkeiten zu kompensieren, ist in Frankfurt und auch in der umgebenden Metropolregion ein Anstieg von On-Site Power Generation Entwicklungen, bzw. entsprechender Vorhaben von Rechenzentren-Betreibern zu verzeichnen (R01: 10, R02: 168). Als Quelle dieses Aspekts wird hier der durch den Internetknotenpunkt DE-CIX entstehende Entwicklungsdruck in der Metropolregion FrankfurtRheinMain angesprochen, welcher mitunter dazu führt, dass durch eigene Stromerzeugung auf dem jeweiligen Standort, Stromknappheit durch On-Site Alternativen kompensiert wird (vgl. R02: 168).

Während dieses Vorgehen für Betreiber von Rechenzentren die Chance bietet, unabhängiger vom bestehenden Stromnetz operieren zu können, stellt sich, gerade wenn On-Site Power Generation in Form von Gaskraftwerken vollzogen wird, die Herausforderung der Verwendung fossiler Energieträger.

Im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit von Energie für den Betrieb von Rechenzentren stellt somit auch die räumliche Verortung des Energieangebots einen wesentlichen Faktor in der räumlichen Steuerung von Rechenzentren dar (vgl. zur verpflichtender Nutzung regional erzeugter Energie im städtebaulichen Vertrag „Großbauheim-Kaserne“), gerade auch im Zusammenhang mit On-Site Power Generation wird es hier als notwendig angesehen, eine überregionale Steuerung, in Zusammenhang mit der Verfügbarkeit von Energieangeboten anzustreben (R02: 168).

Dieser Aspekt stellt einen Punkt dar, der, potentiell im Rahmen einer landesweiten Strategie, konkretisierender Untersuchungen bedarf (vgl. R02: 168) - gerade hinsichtlich zusätzlicher Emissionen und auch des Bezugs von bspw. Gas zum Betrieb kleinerer Kraftwerke, welcher konträr zu Dekarbonisierungszielen steht.

Auch in Bezug auf das Vorgehen der Stadt Hanau in der Gebietskulisse der Großbauheim-Kaserne, insbesondere anlässlich des Vorgehens hinsichtlich des städtebaulichen Vertrages

und der damit zusammenhängenden Anlage N zu Nachhaltigkeitskriterien, wird die Notwendigkeit der Entwicklung regionaler Standards betont (R02: 168).

Weitergehend ist hierbei die Frage der Datenverfügbarkeit hinsichtlich Energiepotenzialen zu betrachten, insbesondere dahingehend wird die Einschätzung getroffen, dass die Auskunft der Daten von Energieunternehmen fraglich ist (R04: 44).

Darüber hinaus verdeutlicht sich auch bezüglich der Luftschadstoff- und Lärmemissionen der Notstromaggregate, gerade im räumlichen Zusammenhang sensibler Standorte (R02: 117) Handlungsbedarf. Hier ergibt sich zum einen Forschungsbedarf dahingehend, wie das als Delta dessen, „was Betreiber brauchen um eine BImSch-Genehmigung zu erhalten und den Standards, die sich eine Kommune wünscht - bspw. im Zusammenhang mit lufthygienischen Aspekten“ (R02: 116) beschrieben wird, geschlossen werden kann. Ein Instrument wäre hier der städtebauliche Vertrag, in welchem potentiell neuere Standards für den Betrieb der Aggregate festgelegt werden könnten (R02: 116). Insbesondere das Reißen kritischer Grenzwerte fällt in die Betrachtung, wenn Testlaufzeiten bei Notstromaggregaten zusammenfallen, welche jedoch durch die Definition als Notstrombetrieb keiner gesonderten Betrachtung unterliegen (R02: 120).

4.8. Zwischenfazit

Rechenzentren sind als kritische Infrastruktur Rückgrat der Digitalisierung und somit Systeme, welche mit sehr hoher Relevanz dazu beitragen, die vitalen Funktionen einer Gesellschaft aufrechtzuerhalten. Im bauleitplanerischen, aber auch übergeordneten planerischen Zusammenhang gehen Vorhaben, die einen Rechenzentren-Bezug aufweisen, mit einer hohen Komplexität i. S. v. Herausforderungen, aber auch Chancen einher.

Insbesondere die Zulässigkeit von Rechenzentren in Gewerbe- und Industriegebieten und die damit verbundene bauleitplanerische Steuerungseinschränkung, lenkt den Fokus auf Neuentwicklungen von Rechenzentrenstandorten. Die empirische Analyse der beiden Fallstudien „Katzenfeld“ in Gießen und „Großauheim-Kaserne“ in Hanau zeigt dabei auf, dass die Betrachtung von Bauleitplanverfahren mit Rechenzentrenbezug aus einer doppelten Schutzperspektive stark vom jeweiligen räumlichen Kontext sowie vom entsprechenden Verfahrensstand abhängt. Zwar sind beide Verfahren in ihren thematischen Rahmen vergleichbar, da sie jeweils die Ansiedlung eines Rechenzentrums bauleitplanerisch vorbereiten,

jedoch zeigen sich Unterschiede sowohl hinsichtlich der inhaltlichen Schwerpunkte als auch der planerischen Handlungsspielräume.

Ein zentraler Unterschied zwischen den beiden Fallstudien ergibt sich aus dem jeweiligen Planungsstand. Im Fallbeispiel „Katzenfeld“ befindet sich der Bebauungsplan noch im Vorentwurf, wodurch ein vergleichsweise hoher Grad an Offenheit in der Betrachtung des Planungsprozesses besteht und die Fallstudie ex-ante untersucht werden konnte. Dies ermöglichte es, die doppelte Schutzperspektive nicht nur retrospektiv zu prüfen, sondern im laufenden Planungsprozess zu diskutieren. Insbesondere im Rahmen des Workshops konnte die Anpassung an Klimawandelfolgen in Form von Hochwasser, Starkregen und Hitze mit möglichen planerischen und Anpassungsmöglichkeiten diskutiert und verknüpft werden. Demgegenüber ist das Verfahren „Großauheim-Kaserne“ in Hanau bereits rechtskräftig, sodass sich die Analyse hier stärker auf die Ausgestaltung bereits getroffener Festsetzungen konzentrierte und ex-post untersucht werden konnte. Die Anwendung der doppelten Schutzperspektive manifestierte sich in diesem Fall weniger als offener Prozess, sondern vielmehr als Untersuchung, inwieweit bestehende Regelungen, bspw. im Zusammenhang mit dem städtebaulichen Vertrag verwendet werden, um sowohl die Funktionsfähigkeit des Rechenzentrums als auch den Schutz der Umwelt zu berücksichtigen. Daraus folgt, dass die Anwendung der doppelten Schutzperspektive zu unterschiedlichen Verfahrensständen zum einen unterschiedliche Erkenntnisse generiert, jedoch entsprechend zum anderen auch ongoing den Schutz der KRITIS Rechenzentrum begleiten kann, um ganzheitlich beide Perspektiven in den jeweiligen Planverfahren betrachten und planerisch integrieren zu können.

Darüber hinaus zeigen die Fallstudien, dass Klimawandelfolgen standortabhängig unterschiedlich eingeordnet werden. Im Fall „Katzenfeld“ spielt die räumliche Nähe zur Lahn sowie die Lage hinter dem Werner-Gleim-Deich eine zentrale Rolle. Hochwasser- und Starkregenaspekte wurden im Workshop wiederholt als relevante Rahmenbedingungen für die Standortbewertung und für die technische Ausgestaltung des Rechenzentrums thematisiert. In Hanau hingegen traten Hochwasserrisiken aufgrund der geographischen Lage des Plangebiets in den Hintergrund; stattdessen standen Fragen der thermischen Belastung, der Energieversorgung und insbesondere der Abwärmenutzung im Vordergrund. Diese unterschiedliche Schwerpunktsetzung verdeutlicht, dass Klimarisiken entsprechend kontextbezogen priorisiert werden müssen und weitergehend relevante Daten, gerade im Zusammenhang zu Fließpfadkarten zur Kalkulation des Starkregenrisikos zur Verfügung

stehen sollten. Für die Planungspraxis bedeutet dies, dass übergeordnete Kriterienkataloge, etwa des BSI, zwar einen wichtigen Orientierungsrahmen bieten, jedoch entsprechend standortspezifisch interpretiert und ergänzt werden müssen.

In bauleitplanerischer Adressierung der Umweltauswirkungen von Rechenzentren, Schutzperspektive II, verdeutlicht die Untersuchung zum Fallbeispiel „Großauheim-Kaserne“ die Bedeutung des städtebaulichen Vertrags in der Festlegung von Nachhaltigkeitskriterien, wie die Nutzung regionaler erneuerbarer Energien. Weitergehend ist allerdings auch die Notwendigkeit kontinuierlicher Begleitung der Flächenentwicklung zu betonen, die sich aus der technischen Effizienzsteigerung der Branche an sich ergibt. Gerade um Trends des steigenden Strombedarfs und der steigenden Rechenkapazität Rechnung zu tragen, sind weitergehende Untersuchungen notwendig, um nachhaltiges Stromangebot zu lokalisieren und Rechenzentrenstandorte dort zu konzentrieren, wo Strom verfügbar und nachteilige Umweltaspekte von RZ mitigierbar sind. Zu letzterem besteht zusätzlicher Forschungsbedarf darin, Speicherlösungen für nicht-nutzbare Abwärme zu entwickeln. Außerdem kann in diesem Bezug das Zwischenfazit gezogen werden, dass Notstromaggregatemissionen, als auch On-Site Power Generation Handlungsbedarf auf kommunaler Ebene erzeugen, insbesondere dahingehend begründet, als dass beide Facetten z. T. konträr zu Nachhaltigkeitsbestrebungen von Kommunen stehen. Es besteht in diesem Zusammenhang Forschungsbedarf darin, zum einen eine Bestandsanalyse vorzunehmen, welche technologischen Varianten in beiden Facetten im Status quo von bestehenden Rechenzentren betrieben werden und zum anderen zu analysieren, wie sich gerade dieselbetriebene Notstromaggregate und Gaskraftwerke als On-Site Power Generation auf die lokale Umwelt auswirken, wie Folgen mitigiert, und wie die Dynamik in dieser Entwicklung in kommunalen Bauleitplanverfahren berücksichtigt werden können.

Insgesamt verdeutlicht die Analyse, dass die doppelte Schutzperspektive ein analytisches Konzept darstellt, um Auswirkungen des Klimawandels auf KRITIS-Planvorhaben und Auswirkungen der Planvorhaben auf die Umwelt ganzheitlich zu betrachten, ihre konkrete bauleitplanerische Implementation jedoch maßgeblich von Standort-individuellen räumlichen und zeitlichen Faktoren abhängt. Sowohl Klimawandelfolgen in ihren Konsequenzen auf RZ-Infrastruktur, als auch deren Auswirkungen auf die Umwelt und ihre Mitigation durch Bauleitplanungsinstrumente wie dem städtebaulichen Vertrag stellen sich, sowohl in Gießen als auch in Hanau Raumkontext-spezifisch dar. Beide Perspektiven sollten, entsprechend des Aspekts ‚zeitliche Faktoren‘, frühzeitig in die jeweiligen

Planverfahren eingebunden werden. Als Beispiel kann hier die Abwärmenutzung dienen: Nutzungsmöglichkeiten sind inhärent individuell; in Hanau kann bspw. ein Großteil signifikanter Anteil der Abwärme zur Deckung des Fernwärmbedarfs genutzt werden, insbesondere weil die Standortvoraussetzungen im Großauheim-Kasernenareal prädestiniert für die Schaffung der dafür notwendigen Infrastruktur gewesen ist. Solche Potentiale können für andere Kommunen, welche mit Rechenzentrenansiedlungsvorhaben konfrontiert sind, durchaus unterschiedlich aussehen. Hier zeigt sich ebenfalls das Beispiel Hanaus, eine Potentialflächenanalyse für geeignete Rechenzentrenstandorte mit den verfügbaren Gewerbeflächen zu verknüpfen, um ein Ansiedlungskonzept für Rechenzentrenvorhaben aufzustellen, als sinnvoll. Auch in einem solchen Aufstellungsprozess könnte die Anwendung der doppelten Schutzperspektive lokale Möglichkeiten bieten, neben den Aspekten der Nutzbarkeit der Flächen im Allgemeinen, auch die Perspektiven der Klimawandelfolgen auf und Umweltauswirkungen der Vorhaben, bzw. letzteres primär im Sinne der für die Mitigation notwendigen Infrastrukturen, zu integrieren.

5. Fazit

Im folgenden Fazit sollen zunächst die zentralen Ergebnisse der Arbeit sowie damit verbundene Handlungsempfehlungen dargelegt werden. Darauf folgt eine Schilderung der mit der Disseration verbundenen Limitationen und eine anschließende Darstellung weiterer Forschungsbedarfe- bzw. Perspektiven. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über weitere Forschungsarbeiten welche im Rahmen dieser Dissertation entstanden sind.

5.1. Zentrale Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation war es zu untersuchen, wie der Schutz kritischer Infrastrukturen vor Klimawandelfolgen in der räumlichen Planung in Hessen berücksichtigt wird. Die Untersuchung des raumplanerischen Mehr-Ebenen-Systems erfolgte hierbei zweistufig: Zur Betrachtung der Landes- und Regionalplanung, sowie ausgewählter raumbedeutsamer Fachplanungen wurden Daten durch qualitative Experteninterviews mit Planungsakteuren erhoben. Um die Ebene kommunaler Bauleitplanung zu betrachten, erfolgte eine Kombination aus Experteninterviews sowie die Durchführung von Fallstudien. Zentrales Untersuchungselement der Fallstudien waren zwei Bebauungsplanverfahren mit Rechenzentren-Bezug, einerseits ein Bebauungsplan im Planungsstand des Vorentwurfs in Gießen, das „Katzenfeld“, welcher bezogen auf seine Rechtskraft ex-ante untersucht wurde, andererseits ein rechtskräftiger Bebauungsplan in Hanau, die „Großbauheim-Kaserne“, aus ex-post Perspektive. Theoretischer Perspektivrahmen für diese Fallstudien war die doppelte Schutzperspektive, in welcher zum einen die Auswirkungen des Klimawandels auf Planvorhaben und zum anderen die Auswirkungen der Planvorhaben auf die Umwelt betrachtet werden (Diller et al. 2023). Die Darstellung der zentralen Ergebnisse und darauf aufbauenden Handlungsempfehlungen erfolgt entlang der in Kapitel 1.1. hergeleiteten Forschungsziele und darauf aufbauenden Forschungsfragen, die das empirische Vorgehen angeleitet haben.

Forschungsziel 1 umfasste zunächst eine Ermittlung von Umfang und Formen der Berücksichtigung des KRITIS-Schutzes im Zusammenhang mit Klimawandelfolgen in der

hessischen Landes- und Regionalplanung sowie in ausgewählten raumbedeutsamen Fachplanungen.

Die Untersuchung bestand dabei aus einer Analyse des Handlungsrahmens raumplanerischer Steuerung von KRITIS vor dem Hintergrund des Klimawandels, wobei hier zunächst auf Forschungsfrage 1.1 eingegangen werden soll:

F1.1: Worin besteht der Handlungsrahmen im Kontext der raumplanerischen Steuerung von KRITIS vor dem Hintergrund des Klimawandels in Hessen?

Mit der Verankerung des KRITIS-Grundsatzes im Raumordnungsgesetz wird die Aufgabe, dem Schutz kritischer Infrastrukturen auch im Handlungsfeld der Raumplanung Rechnung zu tragen, gesetzlich festgeschrieben. Die Umsetzung des Grundsatzes zeigt sich jedoch bereits in der Betrachtung des Forschungsstandes von definitorischen und inhaltlichen Uneindeutigkeiten gekennzeichnet (Schmitt 2020: 49).

Im Kontext der hessischen Raumordnung wird KRITIS-Schutz primär abstrakt-verbal im Gebietskontext des vorbeugenden Hochwasserschutzes, im Sinne einer konfliktarmen Flächensicherung, behandelt. KRITIS-Schutz wird derweil in den Begründungen zu VRG und VBH für vorbeugenden Hochwasserschutz im Rahmen der Neuaufstellung der Regionalpläne verankert. In diesem Zusammenhang wird der Auftrag zum einen als Freihaltung sensibler Raumstrukturen auf Ebene kommunaler Bauleitplanung und zum anderen als Prüfungsauftrag an Betreiber bzgl. des einzuschätzenden Hochwasserrisikos sowie der Anpassung an Hochwassergefährdung definiert. Erkenntnisse aus der empirischen Analyse der Landes- und Regionalplanung sowie der ausgewählten raumbedeutsamen Fachplanungen weisen darauf hin, dass die situative Kritikalität von Klimawandelfolgen, definiert als Gefahren die im Hinblick auf den Klimawandel im Kontext des KRITIS-Schutzes zu beachten sind, im Hochwasserkontext durch bestehende Regelwerke hinreichend einschätzbar ist. Der konkrete Auftrag, KRITIS baulich und technisch an Hochwasserrisiken anzupassen, wird insbesondere in der Verantwortung der Betreiber und der für den Infrastrukturschutz zuständigen Akteure bzw. planerisch auf Ebene kommunaler Bauleitplanung gesehen.

Fortführend wird Hitze im Status quo raumordnerischen Handelns nicht mit dem Schutz von KRITIS verknüpft, Starkregen befindet sich weitergehend aufgrund der kleinräumigen Auftretenswahrscheinlichkeit nicht im Handlungsrahmen der Raumordnung.

Die beiden betrachteten raumbedeutsamen Fachplanungen, einmal zur Höchstspannungsinfrastruktur durch die BNetzA, sowie der Straßenverkehrsplanung seitens Hessen Mobil,

agieren derweil sektorspezifisch. Zum einen wird das N-1 Kriterium in der Gestaltung des Übertragungsnetzes und zum anderen die Anwendung einer Gefährdungsanalyse im Kontext der Straßeninfrastrukturplanung beschrieben. Resilienz der Infrastruktur gegenüber bspw. Extremwetterereignissen wird dabei als technischer Basisschutz v. a. im Aufgabenbereich technischer Fachplanung sowie des Anlagenschutzes durch etwaige Vorhabenträger verortet.

Die Betrachtung des Handlungsrahmens ist eng verbunden mit einer Betrachtung der Hürden, welche die Umsetzung des KRITIS-Schutzes eingrenzen. **Forschungsziel 2** adressierte diesen Aspekt entsprechend im Rahmen einer Identifizierung der Hürden, die der Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes entgegenstehen. Dabei leitete die folgende Forschungsfrage die Analyse:

F1.2: Inwiefern stellen sich Hürden bei der Umsetzung des KRITIS - Grundsatzes in der hessischen Raumplanung dar?

Hürden bestehen zunächst in zweierlei Form: Zum einen ist einerseits die fehlende rechtsbindende Definition von KRITIS zu nennen, währenddessen andererseits bspw. die hessische KRITIS-Übersichtsliste für eine raumplanerische Integration als zu allumfassend und umfangreich erachtet wird und zudem keine geographisch lokalisierbare Standortkonkretisierung möglich ist. Dies schränkt hierbei auch bspw. den Aspekt einer Einschätzung von Kaskadeneffekten ein, welche außerhalb des möglichen regulatorischen Rahmens des raumordnerischen Handelns gesehen wird.

Zum anderen besteht eine zentrale Hürde in der Definition situativer Kritikalität von Klimawandelfolgen außerhalb von Hochwasserkulissen, wo Schwellenwerte wie bspw. HQ₁₀₀ es ermöglichen, eine solche situative Kritikalität klar einzugrenzen. Vor allem im Kontext Hitze kann dabei erkannt werden, dass Unklarheit dahingehend besteht, welche Grenz- und Schwellenwerte die Resilienz von KRITIS negativ beeinflussen. Jedoch verdeutlichen die Ergebnisse der landesweiten Klimaanalyse (Landesplanung Hessen 2020) durch die Berechnung thermisch betroffener Siedlungsgebiete und der damit verbundenen Festlegungen zu VRG und VBH besonderer Klimafunktionen einen Einzug von Hitze in den raumordnerischen Handlungsbereich. Eine entsprechende Handlungsempfehlung besteht darin, dass gerade hitzesensitive KRITIS, wie bspw. Krankenhäuser, in den regionalplanerischen Begründungen dieser Flächenkategorien im Rahmen des Gebots hitzeangepasster Bauwei-

se- und Planung einbezogen werden und der Bezug zu extremer thermischer Betroffenheit hergestellt werden sollte.

Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse beider Fallstudien in Gießen und Hanau zur Implementation der doppelten Schutzperspektive, sowie der zusammenhängenden Experteninterviews dargelegt und mit daraus resultierenden Handlungsempfehlungen verbunden.

Forschungsziel 3 bezog sich dabei auf die Anwendung der doppelten Schutzperspektive zum Schutz von KRITIS und deren methodische Implementation in Fallbeispiele zu Rechenzentren-Planvorhaben auf Ebene der kommunalen Bauleitplanung.

In Forschungsfrage 2.1 wurde zunächst betrachtet, welche (planerischen) Herausforderungen die zunehmende Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben im Land Hessen begleiten:

F2.1: Welche (planerischen) Herausforderungen begleiten die zunehmende Entwicklung von Rechenzentrenvorhaben im Land Hessen?

Zwei zentrale Herausforderungen sind dabei hervorzuheben: Zum einen der hohe Flächenverbrauch welcher mit Rechenzentren-Entwicklungen einhergeht, zum anderen der hohe Energie- bzw. Strombedarf von Rechenzentren. Ein Unterschied in planerischer Steuerungsmöglichkeit differenziert sich dabei zwischen Entwicklungen in bestehenden Gebieten und in neuen Planverfahren: Bei bestehenden Gewerbe- und Industriegebieten besteht die Herausforderung, dass Rechenzentrenvorhaben nicht in der Positivliste der Anlage 1 zum Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPg) genannt werden und somit nicht unter die UVP-pflicht fallen (ebd.). Nach HBO werden sie gem. §65 HBO „in einem vereinfachten Baugenehmigungsverfahren zusammen mit der immissionsschutzrechtlichen Prüfung der Notstromdieselmotoranlagen i. S. v. Anlage 1 Ziffer 1.1 der 4. BImSchV beurteilt“ (ebd.). Um der zunehmenden Flächenentwicklung von Rechenzentren vor diesem Kontext zu begegnen, reagieren bspw. Frankfurt am Main mit einer räumlichen Clusterung von Rechenzentren durch ein Gewerbeflächenentwicklungsprogramm als Aktualisierung des städtebaulichen Entwicklungskonzepts und Hanau mit einem Ansiedlungskonzept für Rechenzentren. Durch solche Konzepte soll auch dem Verdrängungseffekt von Rechenzentren gegenüber kleineren Gewerbebetrieben entgegengewirkt werden. Weitere Herausforderungen ergeben sich im Konkreten zudem einerseits durch zu berücksichtigende Klimawandelfolgen und ihrer Integration in Planverfahren, sowie durch diverse Umweltbelange, wie durch

Rechenzentren emittierte Abwärme und durch Notstromaggregate ausgehende CO₂-Emissionen.

Beide Facetten wurden in den Fallbeispielen in Gießen und Hanau vertieft betrachtet. Dafür wurde die doppelte Schutzperspektive (Diller et al. 2023) angewendet, welche es ermöglichte, zum einen die Auswirkungen des Klimawandels auf Planvorhaben und zum anderen die Auswirkungen der Planvorhaben auf die Umwelt zu untersuchen. Bei dem Fallbeispiel in Gießen handelte es sich dabei um das Bebauungsplanverfahren „Katzenfeld“, welches zum Planungsstand des Vorentwurfs analysiert wurde, bei dem Hanauer Fallbeispiel um den Bebauungsplan „Großauheim-Kaserne“, welcher zum Stand der Rechtskraft betrachtet wurde. Zunächst soll hier auf die erste der beiden Facetten Bezug genommen werden:

F2.2: Wie werden die Folgen des Klimawandels auf Rechenzentren in Bebauungsplanverfahren mit Rechenzentren-Bezug berücksichtigt?

In beiden Fallstudien wurden zunächst die Klimawandelfolgen Hochwasser, Starkregen und Hitze betrachtet. Im Zusammenhang mit Hochwasser dienen Hochwassergefahren- und Risikokarten als Datengrundlage zur Einschätzung der Gefährdungslage. Im Gießener Fallbeispiel führte die Lage in einem ÜSG gem. § 78b WHG zur Aufschüttung des RZ-Areals auf einen Meter über HQ_{extrem}, Details sind im Planungsstand des Vorentwurfs jedoch Bestandteil der konkreten Verhandlungen mit dem Investor. Das Hanauer Fallbeispiel liegt derweil außerhalb von Hochwasserrisiko- und Gefahrenkulissen.

Um Starkregenfolgen ersteinschätzen zu können, eignen sich Fließpfad- bzw. Starkregengefahrenkarten zur Analyse. Während solche im Kontext des Gießener Fallbeispiels zur Verfügung standen und zur Dimensionierung des RRB sowie von Versickerungsbecken genutzt wurden, standen vergleichbare Datengrundlagen im Hanauer Beispiel nicht zur Verfügung. In Gießen war zusätzlich eine hydraulische Simulation des Wasserabflusses durch die Aufschüttung der Rechenzentren-Fläche zum Zeitpunkt der Erhebung noch im Prozess der Erstellung. Zur frühzeitigen Einschätzbarkeit und Integration von Starkregenfolgen wird die Handlungsempfehlung formuliert, frühzeitig Starkregengefahrenkarten zu beantragen. Diese Kartenwerke werden auf Basis detaillierter hydraulischer Simulationen erstellt und stellen „zusätzlich zu den Fließwegen auch Senken dar, in denen sich Wasser sammeln kann und die Wassertiefe, die bei einem angenommenen Starkregenereignis entstehen kann“ (HLNUG 2026b). Fördermöglichkeiten bestehen dabei durch das Land Hessen (ebd.).

Im Kontext von Hitze ermöglichen bestehende Daten aus Quellen des Hitzeviewers Hessen (HLNUG 2025b), der hessischen landesweiten Klimaaanalyse (iMA 2022), sowie der Planungshinweiskarte Klima in Gießen (Gießen 2022) einerseits und der Hanauer Stadtklimaaanalyse (vgl. Hanau 2021e) andererseits eine erste Einschätzungsmöglichkeit zur thermischen Betroffenheit der Plangebiete. Konkrete Simulationen der Auswirkungen von Hitze auf die Planvorhaben sind in Gießen Bestandteil der bioklimatischen Verträglichkeitsuntersuchung, zum Zeitpunkt der Erhebung noch on-going, sowie einer Klimaaanalyse in Form eines Gutachtens auf Basis der Stadtklimaaanalyse in Hanau. Zudem besteht mit dem Umweltbericht als Teil des Bebauungsplanverfahrens eine wesentliche Grundlage dazu, Klimawandelfolgen auf das Planvorhaben betrachten zu können. Im Fallbeispiel Hanau wurde die Klimaaanalyse dabei in die Erstellung des Umweltberichts einbezogen (Hanau 2021d: 9) und kommt zu dem Fazit, dass sich die größten Auswirkungen auf die Lufttemperatur auf dem Plangebiet selbst einstellen und durch beide Planvarianten, es wurde zwischen einer allgemeinen Gewerbeflächenentwicklung und der Entwicklung des Gebiets als Rechenzentren-Campus verglichen, eine Durchlüftung des Hanauer Stadtgebiets nicht beeinflusst wird (Hanau 2021e: 58).

In der methodischen Implementation der ersten der beiden Schutzperspektiven kann hierbei zwischen der Betrachtung zweier Datengrundlagen unterschieden werden: Zum einen Datengrundlagen die unabhängig konkreter bauleitplanerischer Planvorhaben bereits öffentlich verfügbar bestehen und zum anderen Datengrundlagen die in spezifischer Betrachtung des Vorhabens gutachterlich erstellt werden.

Zu Erstem zählen im Kontext Hochwasser, Hochwasserrisiko- und Gefahrenkarten, im Kontext Hitze die landesweite Klimaaanalyse, der Hitzeviewer Hessen sowie Stadtklimaaanalysen, wobei alle zuvor genannten in beiden Fallbeispielen analysierbar waren. Die drei Datengrundlagen bezogen auf Hitze, ermöglichen in der methodischen Anwendung des Perspektivansatzes eine Betrachtung jener Facette. Gleiches gilt für Starkregen, im Falle des Vorhandenseins entsprechender Datengrundlagen kann zum einen diskutiert werden, wie Fließpfade im Rahmen des Vorhabens berücksichtigt wurden und zum anderen betrachtet werden, wie eine etwaige Fließpadsituation im Planverfahren reflektiert wurde.

Zu Zweitem zählen Gutachten wie die Klimaaanalyse im Fallbeispiel Hanaus welche zum Stand der Rechtskraft des Plans betrachtet werden konnten, im Beispiel Gießens befand sich eine bioklimatische Verträglichkeitsuntersuchung zum Stand des Vor-Entwurfs ebenfalls noch in der Erstellung.

Im Folgenden werden nun die zentralen Ergebnisse der Analyse der zweiten Schutzperspektive dargestellt, Forschungsfrage 2.3 lautete dabei:

F2.3: Wie können die Auswirkungen von Rechenzentren-Vorhaben auf die Umwelt im Rahmen von kommunalen Bauleitplanverfahren berücksichtigt werden?

Zentrale Instrumente zur Berücksichtigung der Auswirkungen von Rechenzentren-Vorhaben auf die Umwelt bestehen in Form des Umweltberichts, sowie durch den städtebaulichen Vertrag. Letzterer dabei insbesondere zur Vereinbarung von Nachhaltigkeitszielen zwischen Kommune und Investor.

Zunächst ist als Auswirkung der Stromverbrauch zu beleuchten, wobei die Realisierung von Rechenzentren-Vorhaben maßgeblich von der Bereitstellung der Anschlusskapazität für die Stromversorgung mitbestimmt wird (Hanau 2021a: 3). Zentrales Element zur bauleitplanerischen Berücksichtigung nachhaltiger Stromversorgung ist hierbei der städtebauliche Vertrag, wobei in Hanau die Nutzung regionaler erneuerbarer Energien Bestandteil des Vertrags ist, in Gießen sind Details im Stand der ex-ante Perspektive auf den Vor-Entwurf noch Bestandteil der Vertragsverhandlungen zum städtebaulichen Vertrag. Zudem wurde im Hanauer Fallbeispiel ein PUE von 1,3 vereinbart die jedoch auch im Prozess durch das Energieeffizienzgesetz festgeschrieben wurde.

Fortführend stellt die Emission von Abwärme eine zentrale Umweltauswirkung von Rechenzentren dar. Auch hier bietet der städtebauliche Vertrag Potentiale zur Vereinbarung derer Nutzung, wie das Hanauer Fallbeispiel aufzeigt. Zentral ist dabei die Erkenntnis, dass die Abwärmenutzung zum einen zur Dekarbonisierung der Fernwärme in Hanau und zugleich zur Deckung des Fernwärmebedarfs beitragen kann. Im Zuge dessen muss allerdings berücksichtigt werden, dass zur Nutzbarmachung von Abwärme hohe Investitionskosten aufkommen. Insbesondere Wärmepumpen zur Erhöhung der originär niedrig temperierten Abwärme zur möglichen Nutzung für Nah- und Fernwärmenetze sind hier hervorzuheben.

Zur Einschätzung der CO₂- und Lärmemissionen der Notstromaggregate bietet in Hanau der Umweltbericht, bzw. im Konkreten das Klimagutachten als dessen Grundlage, die Möglichkeit Szenarien zu deren Emissionen in die Planungen einfließen zu lassen. In diesem Zusammenhang können gerade Dieselaggregate zu signifikanten Emissionen beitragen, wobei Erkenntnisse aus den Fallstudien ergeben, dass eine Notwendigkeit darin besteht, klarere Regelungen zu formulieren um dahingehende Konflikte zwischen kommunalen

len Nachhaltigkeitszielen und den Voraussetzungen der RZ-Betreiber hinsichtlich BIm-schG-Genehmigungen, zu klären.

Zwei weitere Auswirkungen sind außerdem mit der Gebäudekubatur von Rechenzentren verbunden: Zum einen der Aspekt der Flächenversiegelung, zum anderen der Aspekt der Höhe der Gebäude. Der Flächenversiegelung begegnet bspw. das Ansiedlungskonzept für Rechenzentren in Hanau damit, dass Rechenzentren dort geclustert werden sollen, wo z. B. „Altstandorte einer Verwertung zugeführt werden, die ansonsten eventuell dauerhaft brachliegen würden, weil die Aufbereitung nicht finanzierbar wäre. Zudem wird hierdurch vermieden, neue Siedlungsflächen in Anspruch nehmen zu müssen“ (Hanau 2021a: 3). Auswirkungen der Höhe der Baumasse ist insbesondere in der Blockade-Wirkung von Kaltluftströmen zu berücksichtigen. Im Falle des „Katzenfeld“-Fallbeispiels ist diese Analyse zum Zeitpunkt der Erhebung noch on-going, im Beispiel „Großauheim-Kaserne“ wird im Rahmen des Klimagutachtens identifiziert, dass durch die Planvarianten keine Durchlüftung in Hanau beeinflusst werden (Hanau 2021e: 58).

Zur methodischen Implementation der doppelten Schutzperspektive kann zur Analyse der zweiten Perspektive zunächst eine Divergenz darin festgestellt werden, was in Zusammenhang mit der zweiten Schutzperspektive zur ex-ante Betrachtung des Verfahrensstands des Vor-Entwurfs in Gießen, zu dem der ex-post Betrachtung des rechtskräftigen Bebauungsplans in Hanau analysiert werden kann. Hervorzuheben ist zunächst der jeweilige räumliche Kontext, sowie die Abhängigkeit der Implementation von den Verfahrensständen der betrachteten Planungsverfahren. Es kann dabei betont werden, dass die doppelte Schutzperspektive keine „one-size-fits-all“-Lösung darstellt, sondern jeweils im konkreten räumlichen Zusammenhang, herausgehend aus einer fundierten Betrachtung der jeweiligen planerischen Ausgangsbedingungen erfolgen muss. Zur methodischen Implementation ist fortführend festzuhalten, dass der Perspektivansatz als Analyseinstrument dazu bestehen kann, ein Planverfahren an verschiedenen Verfahrensständen einerseits hinsichtlich der das Vorhaben betreffenden Klimawandelfolgen und andererseits hinsichtlich der Umweltauswirkungen des Vorhabens zu untersuchen. Auch in der Anwendung verschiedener Methoden zur Realisierung der doppelten Schutzperspektive ergibt sich eine Handlungsempfehlung: Offene Vorgehen wie Workshops eignen sich insbesondere für noch laufende Verfahren und geschlossene Methoden wie Experteninterviews v. a. für den Rückblick auf bereits abgeschlossene Verfahren. Weitergehend wird es empfohlen, die Implementation der doppelten Schutzperspektive on-going, in verschiedenen Zeitpunkten der Planverfahren zu verankern,

um auch technologischen Innovationen, die sich bspw. im Kontext der Mitigation von Umweltauswirkungen ergeben, Rechnung tragen zu können.

Die skizzierten Facetten, welche im Rahmen der Anwendung der doppelten Schutzperspektive in beiden Planverfahren aufgezeigt wurden, verdeutlichen die Notwendigkeit den mit ihnen verbunden Handlungsbedarf näher einzugrenzen. Eine solche Eingrenzung wird in der folgenden Darstellung der zentralen Erkenntnisse hinsichtlich Forschungsfrage 2.4, vorgenommen.

F2.4: In welchen Aspekten kann ein Handlungsbedarf in der räumlichen Steuerung von Rechenzentren-Vorhaben identifiziert werden?

Im Sinne einer nachhaltigen Steuerung von Rechenzentren zeigt sich im Allgemeinen ein grundlegender Bedarf an einer strategischen Identifikation und Steuerung geeigneter Flächenpotenziale. Dabei sollten Rechenzentren gezielt dort angesiedelt werden, wo sie kommunale Mehrwerte erzeugen. Dies erfordert eine ausgewogene Gewerbeflächenpolitik, die Verdrängungseffekte vermeidet sowie Potenziale wie die Revitalisierung von Brownfields und Altstandorten nutzt. Herausgehend daraus lässt sich für Kommunen mit einem hohen Grad an Standortanfragen im Rechenzentrenbezug die Handlungsempfehlung formulieren, die Erstellung eines Ansiedlungskonzepts in Erwägung zu ziehen. In ein solches Konzept kann dabei eine Abwägung, welche Standorte sich für Rechenzentrenvorhaben eignen und auch hinsichtlich der infrastrukturellen Voraussetzungen für solche Vorhaben Potentiale bieten, inkludiert werden.

Zugleich wird deutlich, dass Aspekte ausgehend aus der Gebäudekubatur von Rechenzentren, insbesondere hinsichtlich ihrer möglichen Blockadewirkung gegenüber Kaltluftströmen, auch im übergeordneten planerischen Rahmen berücksichtigt werden sollten. Daraus ergibt sich Handlungsbedarf, zu untersuchen inwieweit Rechenzentren bspw. aus VRG und VBH für besondere Klimafunktionen ausgeschlossen werden können, um v. a. Kaltluftentstehungsgebiete nicht negativ zu beeinflussen.

Zusätzlicher Handlungsbedarf kristallisiert sich aus der zunehmenden Bedeutung von On-Site-Power-Generation als Reaktion auf Netzengpässe, was mitunter im Spannungsfeld zu kommunalen Klimazielen zu bewerten ist, insbesondere wenn diese durch fossilen Energieträger betrieben werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit überregionaler Steuerungsansätze, regionaler Standards sowie verbesserter Datengrundlagen zur Energieverfügbarkeit.

Abschließend wird auch im Bereich der Umweltwirkungen, insbesondere bei den Luftschadstoff- und Lärmemissionen von Notstromaggregaten, ein Regelungsdefizit deutlich. Hier besteht sowohl Handlungsbedarf, um die Lücke zwischen gesetzlichen Mindeststandards und kommunalen Anforderungen zu schließen. Außerdem besteht Handlungsbedarf darin, Möglichkeiten des städtebaulichen Vertrag als mögliches Steuerungsinstrument in dieser Hinsicht zu untersuchen.

Die Fallstudienuntersuchung verdeutlicht zunächst die Komplexität, welche Planverfahren mit Bezug auf Rechenzentren als KRITIS charakterisiert. Thematiken effektiver Abwärmenutzung, Verwendung erneuerbarer Energiequellen, die Frage effizienter Wassernutzung und CO₂ Emissionen der Notstromaggregate sind zu betonen. Gleichzeitig ist insbesondere die Notwendigkeit einer frühzeitigen planerischen Integration von Klimagefahren hervorzuheben.

Zur Inklusion der verschiedenen Grundlagen die zur Anwendung der doppelten Schutzperspektive inkludiert werden können, kristallisierte sich in methodischer Vorbereitung beider Fallstudien insbesondere das Vor - Scoping in Form eines Vorgesprächs mit den zentralen Akteuren der Stadt- und Umweltplanung, bzw. des Klimaanpassungsmanagements als besonders relevant heraus. Das Vor - Scoping zur Betrachtung eines Verfahrens aus doppelter Schutzperspektive bietet die Chance, neben der Klärung von Erwartungshaltungen fundiertere Informationen über das Verfahren zu erhalten, welche die tatsächliche empirische Erhebung tiefergehend ermöglicht. Ein weiteres methodisches Fazit besteht aus der Anwendung zweier verschiedener methodischer Vorgehen in der Betrachtung beider Planfälle. So bot das offene Workshop-Format zur ex - ante (bezogen auf die Rechtskraft) Analyse des Gießener Fallbeispiels die Möglichkeit, insbesondere Schutzperspektive I aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu diskutieren. Durch die strukturiertere Form eines Gruppen-Experteninterviews zur Betrachtung des zweiten Fallbeispiels in Hanau konnte die zweite Schutzperspektive dahingehend ex-post der Rechtskraft tiefergehend untersucht werden.

Zusammenfassend bietet die doppelte Schutzperspektive auf KRITIS die Möglichkeit, den Schutz kritischer Infrastrukturen vor den Folgen des Klimawandels mit dem Schutz der Umwelt vor den von ihnen ausgehenden Auswirkungen systematisch zu verknüpfen. Damit fungiert sie als Ansatz, der sowohl die Anforderungen des § 1a Abs. 5 BauGB, Klimaschutz und Klimaanpassung, adressiert, als auch das Konzept des Climate Proofing (Birkmann et al., 2009: 118) konkret in Bezug auf Rechenzentren operationalisiert. Letzteres ermöglicht eine verfahrensbegleitende Sicherstellung, dass Planungen gegenüber Klimawandelfolgen

angepasst und zugleich auf Klimaschutz ausgerichtet werden. Insgesamt bietet die doppelte Schutzperspektive somit einen konzeptionellen Rahmen, um beide Zieldimensionen im Sinne eines vorsorgenden und integrierten KRITIS-Schutzes zusammenzuführen. Weiterführend verdeutlichen die Instrumente des Umweltberichts sowie des städtebaulichen Vertrags auch die Möglichkeit, beide Perspektiven im Bebauungsplanverfahren zu verankern.

5.2. Limitationen

Folgende Limitationen sind in der Betrachtung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens zu beachten: Zunächst ist der geographische Rahmen des Vorhabens zu diskutieren. Der Fokus auf das Land Hessen bot grundsätzlich zweierlei Chancen: Zum einen ermöglichte die Fokussierung auf ein spezifisches Bundesland, empirisch in Betrachtung der einzelnen Planungsebenen in die Tiefe zu gehen. Zum anderen ist das Thema zunehmender Flächenentwicklungen von Rechenzentren gerade in der Metropolregion FrankfurtRheinMain ein sehr gut zu analysierendes Thema. Zwar weisen auch andere Regionen in Deutschland zunehmende Flächenentwicklungen dahingehend auf, der Standort Frankfurt hebt sich jedoch aufgrund seiner räumlichen Kontextbedingungen vor dem Hintergrund des Internetknotenpunktes DE-CIX hervor. Gleichzeitig bedeutet die Fokussierung dieses Vorhabens allerdings eine Exklusion anderer Bundesländer mit ihren spezifischen Herangehensweisen an die KRITIS-Thematik. Zwar ist die Umsetzung des KRITIS-Grundsatzes in Hessen gerade durch die derzeit stattfindende Neuaufstellung der Regionalpläne sehr gut praxisorientiert analysierbar, jedoch könnte durch die zukünftige Inklusion weiterer Bundesländer zusätzlicher Erkenntnisgewinn generiert werden.

Die doppelte Schutzperspektive zum KRITIS-Schutz auf kommunaler Ebene limitiert sich in der Erhebung dieser Dissertation auf Rechenzentren als Punktinfrastrukturen. Um in vielen Beispielen fehlende rechtsbindende KRITIS-Definitionen zu umgehen, war es Ziel dieses Vorgehens, eine Infrastruktur zu untersuchen, die bereits durch das BSIG als KRITIS definiert ist und zugleich eine hohe räumliche Entwicklungsdynamik und somit planerisch - steuernde Relevanz auslöst, was mit Rechenzentren gegeben war.

Auch das methodische Vorgehen im Rahmen des qualitativen Untersuchungsdesigns des Forschungsvorhabens ist mit bestehenden Limitationen verbunden. Zunächst ist die Rolle der jeweiligen ExpertInnen zu reflektieren: Kaiser beschreibt in diesem Zusammenhang

einen bedingten Einfluss von ForscherInnen darauf, „ob der Experte bewusst oder unbewusst irreführende Informationen preisgibt oder sich in der Interviewsituation auf rein formale Positionen zurückzieht, die ebenso gut durch die Analyse von Veröffentlichungen der entsprechenden Organisationen hätten erhoben werden können“ (2021: 38). Im Falle dieser Dissertation wurde diesem Aspekt damit begegnet, auf Ebene der Experteninterviews Veröffentlichungen der Organisationen, primär im Falle der öffentlich zugänglichen Entwürfe der Regionalpläne, zu sichten und diese Erkenntnisse in das Experteninterviews einzubringen. Im Rahmen der Fallstudien ergab sich hier durch das Vor-Scoping eine intensive Vorbereitung mit den zur Verfügung gestellten Dokumenten, wodurch im Rahmen der eigentlichen Erhebung, also dem Workshop in Gießen und dem Gruppen-Experteninterview in Hanau, inhaltlich auf Basis dieser Grundlagen in die Tiefe gegangen werden konnte.

Als einschränkendes Element ist außerdem der Aspekt aufzuführen, dass mit dem Regierungspräsidium Kassel kein Experteninterview durchgeführt werden konnte. Dies wirkte sich allerdings nur begrenzt auf die empirischen Ergebnisse aus, da zum einen der Regionalplan-Entwurf öffentlich einsehbar war und dieser zum anderen vergleichbare KRITIS-Verankerungen wie in den Fällen Mittel- und Südhessens aufwies.

5.3. Forschungsbedarf- und Perspektiven

Im Folgenden soll auf weiteren Forschungsbedarf und mögliche Forschungsperspektiven eingegangen werden.

Zunächst ergeben sich interessante Forschungsperspektiven durch die derzeit stattfindende Entwicklung des KRITIS-Dachgesetzes. Dessen Ziel ist es, den physischen Schutz von KRITIS „bundeseinheitlich und sektorenübergreifend“ (BMI 2025) in den Blick zu nehmen. Zum Zeitpunkt der Dissertation hat der deutsche Bundestag bisher den Entwurf eines KRITIS-Dachgesetzes beschlossen (Stand: 17.03.2026). Forschungsbedarf besteht einerseits darin, die Rolle räumlicher Planung in ihren Ebenen in den Blick zu nehmen und andererseits zu identifizieren, wie eine Definition von KRITIS in diesem Rahmen Auswirkungen auf den Umgang der Raumplanung mit dem Schutz von KRITIS haben könnte. Denkbar wäre hier auch eine Erweiterung des Analyseansatzes von Schmitt (2020) zur Berechnung systemischen Kaskadenpotentials auf niedrigerer Ebene - insbesondere wenn durch die Dachgesetzgebung eingeschätzt werden kann, welche Betreiber als KRITIS identifiziert

werden. Auch im europäischen Vergleich besteht eine interessante Perspektive darin, die verschiedenen nationalen Umsetzungen der CER-Richtlinie hinsichtlich ihrer Implikationen für die räumliche Planung, aber auch im Allgemeinen, zu untersuchen.

In diesem Zusammenhang besteht auch die Möglichkeit, die Untersuchung in Bezug auf den raumordnerischen Handlungsrahmen und diesen einschränkender Hürden auf weitere Bundesländer zu erweitern. Dabei kann zum einen untersucht werden, wie Planungsakteure in weiteren räumlichen Kontexten KRITIS-Schutz operationalisieren und zum anderen betrachtet werden, in welchen klimatischen Kontexten er verankert wird. Methodisch wäre hierbei zu Beginn eine qualitative Inhaltsanalyse bestehender, bzw. sich in Aufstellung befindlicher Regionalpläne gewinnbringend um in einem vergleichenden Rahmen Festsetzungen zum Schutz von KRITIS analysieren zu können. Darauf aufbauend können, wie im Rahmen dieser Dissertation, qualitative Experteninterviews dazu genutzt werden, um zusätzlich zu analysieren, worin mögliche Unterschiede im Vorgehen der KRITIS-Schutz Implementation, bzw. mögliche Hürden bestehen.

Außerdem ergeben sich im konkreten Bezug auf die Anwendung der doppelten Schutzperspektive verschiedene Forschungsperspektiven. Zunächst ist hier die Applikation der doppelten Schutzperspektive auf weitere Fallbeispiele mit Rechenzentren-Bezug zu nennen. Eine Perspektive wäre es dabei, in einem vergleichenden Rahmen bspw. die Anwendung und Inhalte städtebaulicher Verträge hinsichtlich ihrer Vereinbarungen zu untersuchen und zu identifizieren, wie weitere Kommunen mit den unterschiedlichen Herausforderungen die mit Rechenzentren einhergehen, umgehen.

Weitergehend, herausgehend aus der Handlungsempfehlung die doppelte Schutzperspektive in weiteren Schritten des Planverfahrens zu integrieren, liegt auch in ihrer Integration in weitere Verfahrensstände, wie bspw. im Bereich der Vorbereitung zum Vor-Entwurf, oder auch des Entwurfs, eine Forschungsperspektive. Außerdem ergibt sich weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Perspektiven-Anwendung auf weitere KRITIS-Sektoren, wie z. B. auf die Entwicklung von Krankenhausstandorten.

Konkret in Bezug auf die Rechenzentren-Infrastruktur besteht Forschungsbedarf darin zu untersuchen, wie Betreiber mit knapper werdender Stromverfügbarkeit umgehen, Alternativen zur on-site-power Generation bestehen und zudem nachhaltige Stromversorgung in den Betrieb integrieren können. Zusammenhängend damit ergibt sich zusätzlicher For-

schungsbedarf, die Nutzung und Anwendbarkeit von Speichersystemen nähergehend zu untersuchen, um bspw. auch Abwärme längerfristig speichern zu können.

5.4. Überblick über weitere Forschungsarbeiten

Der folgende Abschnitt soll nun abschließend einen kurzen Überblick über veröffentlichte und vor - Veröffentlichung stehende Artikel geben, die im Verlauf des Dissertationsvorhabens entstanden, jedoch nicht Teil der vorliegenden Monographie sind. Tabelle 14 stellt die Artikel zunächst dar.

	Titel, AutorInnen und DOI	Publikationsstatus
1	„Changes in land use within flood hazard areas between 1990 and 2018 in EU countries“ Borowska-Stefańska / Wiśniewski / Gros / Balážovičová / Masný https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107712	Veröffentlicht in <i>Land Use Policy</i> (27.07.2025)
2	„Comparative Analysis of Evacuation Processes in Response to Fluvial Floods: Selected Regions in Germany and Poland“ Borowska-Stefańska / Dulebenets / Gros / Masierek / Wiśniewski	Veröffentlicht im <i>Journal of Water Resources Planning and Management</i> (09.04.2026)
3	„The Role of the International Border in Shaping Critical Infrastructure Resilience and Service Continuity during Cascading Events – example of floods on German-Polish Border“ Borowska-Stefańska / Gros / Wiśniewski	Unter Review im <i>International Journal of Critical Infrastructure Protection</i> (Dezember 2025)

Tabelle 14: Überblick über weitere Artikel die im Verlauf der Dissertation veröffentlicht wurden

Quelle: Eigene Darstellung

Artikel 1, „Changes in land use within flood hazard areas between 1990 and 2018 in EU countries“ (Borowska-Stefanska et al. 2025) verfolgte das Ziel, die Wirksamkeit nichttechnischer Hochwasserschutzmaßnahmen im Hochwasserrisikomanagement am Beispiel der Erfahrungen in Deutschland, Polen und der Slowakei zu bewerten. Zu diesem Zweck wurden Zusammenhänge zwischen Veränderungen in der Landnutzung (zwischen 1990 und 2018)

in hochwassergefährdeten Gebieten (mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 % für das Auftreten von Hochwasser) und Änderungen in der Gesetzgebung in drei Ländern, die die Landentwicklung in diesen Gebieten bestimmen, ermittelt. Die Ermittlung historischer Veränderungen ermöglicht die Entwicklung von Methoden und Verfahren, die für die Prognose der Entwicklung der betreffenden Gebiete hilfreich sind. Die Analyse hat gezeigt, dass die Veränderungen der Landnutzung in den untersuchten Gebieten in engem Zusammenhang mit rechtlichen Aspekten stehen, insbesondere mit den Beschränkungen, die sich aus der Umsetzung der Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG) ergeben. Hinsichtlich der Intensität der Bebauung in hochwassergefährdeten Gebieten lassen sich in diesen Ländern mehrere Zeiträume unterscheiden. Im Falle Polens und der Slowakei gibt es zwei Perioden: Die erste, in der die Intensität der Bebauung zwischen 1990 und 2006 am höchsten war, was vor allem auf das Fehlen geeigneter gesetzlicher Bestimmungen zur Eindämmung der Bebauung in hochwassergefährdeten Gebieten zurückzuführen ist. Die zweite Periode von 2006 bis 2012 zeigt die Auswirkungen der EU-Vorschriften und einen Rückgang der Bebauungsintensität. Im Gegensatz dazu war in Deutschland die höchste Bebauungsintensität zwischen 2006 und 2012 zu verzeichnen.

Als vergleichende Analyse von Evakuierungsprozessen in Folge von Hochwasserereignissen, wurden in Artikel 2 (Borowska-Stefanska et al. 2026) die Woiwodschaft Dolnośląskie und das Bundesland Nordrhein-Westfalen verglichen. Mit Schwerpunkt auf präventiven Evakuierungen mit dem Auto werden in der Studie Szenarioanalysen und räumliche Modellierungen eingesetzt, um die Wirksamkeit, die Vorbereitung und die Ergebnisse von Selbstevakuierungsstrategien zu bewerten. Unter Verwendung der Enhanced Two-Step Floating Catchment Area (E2SFCA)-Methode bewertet die Studie die räumliche Erreichbarkeit ausgewiesener öffentlicher Einrichtungen - insbesondere Schulen -, die als potenzielle Evakuierungsziele dienen. Die Analyse berücksichtigt Reisezeiten, Kapazitäten der Einrichtungen und Bevölkerungsverteilungen innerhalb von HQ₁₀₀-Gebieten. Die Ergebnisse zeigen erhebliche räumliche Unterschiede in der Erreichbarkeit von Evakuierungsorten und unterstreichen die entscheidende Rolle des privaten Fahrzeugbesitzes und der Infrastruktur bei der Notfallvorsorge. In allen Szenarien zeigen die Ergebnisse einen klaren Kompromiss zwischen Evakuierungsgeschwindigkeit und Auslastung der Schutzkapazitäten: Optionen, die die Fahrzeiten minimieren, führen tendenziell zu einer Überlastung einer kleinen Anzahl gut angebundener Einrichtungen, während eine ausgewogenere Nutzung der verfügbaren Kapazitäten für viele Bewohner längere Fahrzeiten bedeuten. Die Studie unterstreicht die

Notwendigkeit einer integrierten Evakuierungsplanung, die regionale Verhaltensweisen, Infrastrukturkapazitäten und räumliche Erreichbarkeit berücksichtigt, um das Hochwasserisikomanagement zu verbessern.

Artikel 3 (Borowska-Stefanska et al. 2026, under review) analysiert, wie Fluss- und Küstenüberschwemmungen, die Schließung internationaler Grenzen und Kaskadeneffekte die Erreichbarkeit von Krankenhäusern und Feuerwehren in der polnisch-deutschen Grenzregion entlang der Oder und der Ostseeküste beeinträchtigen. Unter Verwendung einer 100 km langen grenzüberschreitenden Pufferzone, eines 1x1 km großen Bevölkerungsrasters, eines multimodalen Straßennetzes und offizieller Hochwassergefahrenkarten werden Zugänglichkeitsindikatoren für vier Störungsvarianten (kein Schock, Grenzschießung, Kettenreaktionen, kombiniert) berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beeinträchtigung der Erreichbarkeit hauptsächlich durch das Ausmaß der Überschwemmungen und Kaskaden verursacht wird, während die Grenzschießung nur vernachlässigbare Auswirkungen hat. Flusshochwasser mit geringer Wahrscheinlichkeit führen zu einem fast vollständigen Verlust der Erreichbarkeit innerhalb des Korridors, wobei Krankenhäuser systematisch anfälliger sind als Feuerwehren. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, bei der grenzüberschreitenden Resilienzplanung Verbindungen, die anfällig für Kaskaden sind, und Zugangswege zu Krankenhäusern zu priorisieren.

Literaturverzeichnis

Al Kez, Dlzar / Foley, Aoife / Laverty, David / Furszyfer Del Rio, Dylan / Sovacool, Benjamin (2022): Exploring the sustainability challenges facing digitalization and internet data centers. In: *Journal of Cleaner Production* 371, S. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133633>

Baier, Andreas / Krieger, Klaus / Meinzinger, Franziska / Döring, Julia (2021): Veröffentlichungen von Starkregengefahrenkarten im deutschen Raum. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 68 (3), S. 179-183. <https://doi.org/10.3242/kae2021.03.002>

BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2023a): https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/kritische-infrastrukturen_node.html (Zuletzt geprüft am: 05.06.2023).

BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (2023b): KRITIS-Gefahren. Online: https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/KRITIS-Gefahrenlagen/kritis-gefahrenlagen_node.html (zuletzt geprüft am 11.12.2023).

BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (2023c): Gesetz und Verordnungen des Bundes und Richtlinien der EU. Online: https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Strategien-und-rechtlicher-Rahmen/Rechtlicher-Rahmen/rechtlicher-rahmen_node.html (zuletzt geprüft am 13.06.2024).

Bieber, Christoph (2021): Digitalisierung. In: Andersen, Uwe / Bogumil, Jörg / Marschall, Stefan / Woyke, Wichard (Hrsg.): *Handwörterbuch des politischen Systems der Bundesrepublik Deutschland*. Wiesbaden: Springer.

Birkmann, Jörn / Fleischhauer, Mark (2009): Anpassungsstrategien der Raumentwicklung an den Klimawandel: „Climate Proofing“ - Konturen eines neuen Instruments. In: *Raumforschung und Raumordnung* 67 (2), S. 114 - 127. <https://doi.org/10.1007/BF03185700>

Birkmann, Jörn / Bach, Claudia / Guhl, Silvie / Witting, Maximilian / Welle, Torsten / Schmude, Miron (2010): *State of the Art der Forschung zur Verwundbarkeit Kritischer Infrastrukturen am Beispiel Strom/Stromausfall*. Berlin: Forschungsforum Öffentliche Sicherheit.

Birkmann, Jörn / Vollmer, Maike / Schanze, Jochen (2013): *Raumentwicklung im Klimawandel - Herausforderungen für die räumliche Planung*. Hannover: Forschungsberichte der ARL.

Birkmann, Jörn / Wenzel, Friedemann / Greiving, Stefan / Garschagen, Matthias / Vallée, Dirk / Nowak, Wolfgang / Welle, Torsten / Fina, Stefan / Goris, Anna / Rilling, Benedikt / Friedrich, Frank / Fekete, Alexander / Cutter, Susan / Düzgün, Sebnem / Ley, Astrid / Friedrich, Markus / Kuhlmann, Ulrike / Novák, Balthasar / Wieprecht, Silke / Riegel, Christoph / Thieken, Annegret / Rhyner, Jakob / Ulbrich, Uwe / Mitchell, James (2016): *Extreme Events, Critical Infrastructures, Human Vulnerability and Strategic Plan-*

ning. Emerging Research Issues. In: Journal of Extreme Events 3 (4), S. 1-25. <https://doi.org/10.1142/S2345737616500172>

Bitkom (2024): Rechenzentren in Deutschland. Aktuelle Marktentwicklungen - Stand 2024. Online: <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2024-11/241121-studie-rechenzentrumsmarkt.pdf> (zuletzt geprüft am 28.08.2025).

Blauer Engel (2020): Klimaschonende Colocation-Rechenzentren. Online: <https://www.blauer-engel.de/sites/default/files/2021-08/be-factsheet-rechenzentren-de-web.pdf> (zuletzt geprüft am 23.10.2025).

BMI (Bundesministerium des Inneren) (2009): Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Online: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/BMI09324-kritis-strategie.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (zuletzt geprüft am 08.09.2025).

BMI (Bundesministerium des Inneren) (2025): Bundeskabinett beschließt Gesetzentwurf zum KRITIS-Dachgesetz. Online: <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/DE/2025/09/kritis-dg-kabinett.html> (zuletzt geprüft am 30.07.2026).

BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2010): Klimawandel als Handlungsfeld der Raumordnung. Ergebnisse der Vorstudie zu den Modelvorhaben „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2017): Handbuch zur Ausgestaltung der Hochwasservorsorge in der Raumordnung. MORO Regionalentwicklung und Hochwasserschutz in Flussgebieten. Online: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/moro-praxis/2017/moro-praxis-10-17-dl.pdf;jsessionid=25F361CA660DE192590425239CF7E898.live21324?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt geprüft am 12.09.2024).

BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2025): Stand und Entwicklung des Rechenzentrumstandorts in Deutschland. Gutachten im Auftrag des Bundesamts für Wirtschaft und Klimaschutz. Online: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/stand-und-entwicklung-des-rechenzentrumstandorts-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (zuletzt geprüft am 28.08.2025).

BMWSB (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen) (2026): Besserer Schutz vor Hochwassern in Deutschland. Online: https://www.bmwsb.bund.de/DE/stadtentwicklung/klimagerechte-stadtentwicklung/hochwasserschutz/hochwasserschutz_node.html (zuletzt geprüft am 09.03.2026).

BNetzA (Bundesnetzagentur) (2025): Versorgungssicherheit Strom. Bericht. Feststellung des Netzreservebedarfs für den Winter 2025/2026 sowie den Betrachtungszeitraum April 2027 bis März 2028. Online: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Elektriziti->

[taetundGas/Versorgungssicherheit/Netzreserve/DL/Netzreservebedarf_2025.pdf?__blob=publicationFile&v=3](#) (zuletzt geprüft am 23.02.2026).

Boin, Arjen / McConnell, Allan (2007): Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns: The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience. In: *Journal of Contingencies and Crisis Management* 15 (1), S. 50-59. <https://doi.org/10.1111/j.1468-5973.2007.00504.x>

Borowska-Stefańska, Marta / Wiśniewski, Szymon / Gros, Jan Moritz / Balážovičová, Lenka / Masny, Matej (2025): Changes in land use within flood hazard areas between 1990 and 2018 in EU countries. In: *Land Use Policy* 158, S. 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107712>

Borowska-Stefańska, Marta / Dulebenets, Maxim / Gros, Jan Moritz / Masierek, Edyta / Wiśniewski, Szymon (2026): Comparative Analysis of Evacuation Processes in Response to Fluvial Floods: Selected Regions in Germany and Poland. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 152 (6), S. 1-14. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-7309>

BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2024): Kriterien für die Standortwahl von Rechenzentren. Online: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/RZ-Sicherheit/Standort-Kriterien_Rechenzentren.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (zuletzt geprüft am 22.10.2025).

BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2025): Deutsche Gesetzgebung. IT-Sicherheitsgesetze von 2015 und 2021. Online: https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Regulierte-Wirtschaft/Kritische-Infrastrukturen/Allgemeine-Infos-zu-KRITIS/Rechtsgrundlagen/rechtsgrundlagen_node.html (zuletzt geprüft am 08.09.2025).

Braubach, Angela (2011): Vulnerabilität der Kritischen Infrastruktur Wasserversorgung gegen über Naturkatastrophen. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.

Bruneau, Michel / Chang, Stephanie / Eguchi, Ronald / Lee, George / O'Rourke, Thomas / Reinhorn, Andrei / Shinozuka, Masanobu / Tierney, Kathleen / Wallace, William / von Winterfeldt, Detlof (2003): A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. In: *Earthquake Spectra* 19 (4), S. 733–752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>

BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2024): Kriterien für die Standortwahl von Rechenzentren. Online: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/RZ-Sicherheit/Standort-Kriterien_Rechenzentren.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (zuletzt geprüft am 20.03.2025).

Christidis, Nikolaos / Jones, Gareth / Stott, Peter (2014): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. In: *Nature Climate Change* 5 (1), S. 46-50. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2468>

Cloudflare (2025). Was ist Latenz? Wie sich die Latenz verbessern lässt. Online: <https://www.cloudflare.com/de-de/learning/performance/glossary/what-is-latency/> (zuletzt geprüft am 28.08.2025).

Cortekar, Jörg / Groth, Markus (2013): Der deutsche Energiesektor und seine mögliche Betroffenheit durch den Klimawandel. Hamburg: Climate Service Center.

Curt, Corinne / Tacnet, Jean-Marc (2018): Resilience of Critical Infrastructures: Review and Analysis of Current Approaches. In: *Risk Analysis* 38 (11), S. 2441 – 2458. <https://doi.org/10.1111/risa.13166>

Cushman & Wakefield (2024): EMEA Data Centre Update. H2 2024. Online: <https://digital.cushmanwakefield.com/emeadatacentresupdate-02-2025-emea-regional-en-content-datacentres/> (zuletzt geprüft am 23.04.2026).

Danielzyk, Rainer / Münter, Angelika (2018): Raumplanung. In: ARL (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: ARL.

Datacenter-Insider (2023): Was bedeutet Water Usage Effectiveness - WUE? Online: <https://www.datacenter-insider.de/was-bedeutet-water-usage-effectiveness--wue-a-1f19808197aed989ddce80dc84ca7d30/> (zuletzt geprüft am 24.03.2025).

De Bruijne, Mark / van Eeten, Michel (2007): Systems that Should Have Failed: Critical Infrastructure Protection in an Institutionally Fragmented Environment. In: *Journal of Contingencies and Crisis Management* 15 (1), S. 18-29. <https://doi.org/10.1111/j.1468-5973.2007.00501.x>

DeLaurentis, Daniel (2007): Role of Humans in Complexity of a Systems-of-Systems. In: Duffy, Vincent (Hrsg.): Digital Human Modeling. Berlin/Heidelberg: Springer, S. 363-371.

Deutscher Bundestag (2023): Schutz kritischer Infrastrukturen. Rechtslage in Deutschland, Finnland, Frankreich, Österreich und Schweden. Online: https://www.bundestag.de/resource/blob/945532/888b342ce610fb078fc3c3ada7d39bc5/WD-3-176-22-pdf-data.pdf?utm_source=chatgpt.com (zuletzt geprüft am 16.07.2025).

Durner, Wolfgang (2018): Raumbedeutsamkeit. In: ARL - Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: ARL.

Difu (Deutsches Institut für Urbanistik) (2021): Klimaanpassung/Klimaschutz. In: Berichte 3, S. 16.

Diller, Christian / Schnorr, Mareike / Czickus, Niklas (2023): Kritische Infrastruktur aus einer doppelten Schutzperspektive: Methodische Identifizierungsprobleme und planerischer Handlungsbedarf. In: *Standort* 47, S. 340–346. <https://doi.org/10.1007/s00548-022-00800-7>

Diller, Christian / te Molder, Antje (2024): Länderprofil Hessen. Online: <https://www.arl-net.de/de/node/8570/rev/8340> (zuletzt geprüft am 16.03.2026)

DWD (2024a): Lufttemperatur. Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html;jsessionid=9B64DCA09650BFAC41A8E378A591466B.live11042?lv2=101518&lv3=101632> (zuletzt geprüft am 31.10.2024)

DWD (2024b): Tropennacht. Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102802&lv2=102672> (zuletzt geprüft am 31.10.2024)

DWD (2024c): Klima. Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101462&lv2=101334> (zuletzt geprüft am 08.11.2024).

DWD (2024d): Starkregen. Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html> (zuletzt geprüft am 14.11.2024).

DWD (2026a): Temperatur. Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/T/Temperatur.html> (zuletzt geprüft am 09.01.2026).

DWD / HLNUG (2024): Klimareport Hessen. Wiesbaden: HLNUG.

EU (European Union) (2007): Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060> (zuletzt geprüft am 22.04.2026).

European Environment Agency (2024): What is the difference between adaption and mitigation. Online: <https://www.eea.europa.eu/en/about/contact-us/faqs/what-is-the-difference-between-adaptation-and-mitigation#:~:text=In%20essence%2C%20adaptation%20can%20be,of%20climate%20change%20less%20severe> (zuletzt geprüft am 08.11.2024).

Eusgeld, Irene / Nan, Cen / Dietz, Sven (2011): “System-of-systems” approach for interdependent critical infrastructures. In: *Reliability Engineering & System Safety* 96 (6), S. 679-686. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.010>

Ewim, Daniel R.E. / Ninduwezuor-Ehiobu, Nwakamma / Orikpete, Ochuko F. / Egbokhaebho, Blessed A. / Fawole, Akeeb A. / Onunka, Chiemela (2023): Impact of Data Centers on Climate Change: A Review of Energy Efficient Strategies. In: *The Journal of Engineering and Exact Sciences* 9 (6), S. 1-15. <https://doi.org/10.18540/jcecvl9iss6pp16397-01e>

Fekete, Alexander (2019): Critical Infrastructure and flood resilience: Cascading effects beyond water. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6 (5), S. 1-13. <https://doi.org/10.1002/wat2.1370>

Fekete, Alexander (2020): Critical infrastructure cascading effects. Disaster resilience assessment for floods affecting city of Cologne and Rhein-Erft-Kreis. In: *Journal of Flood Risk Management* 13 (2), S. 1 - 9. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12600>

Fekete, Alexander (2024): Risiko, Katastrophen und Resilienz. Eine Einführung in Methoden, Konzepte und Theorien. Berlin, Heidelberg: Springer.

Folkers, Andreas (2018): Das Sicherheitsdispositiv der Resilienz. Katastrophische Risiken und die Biopolitik vitaler Systeme. Frankfurt am Main: Campus.

Forzieri, Giovanni / Bianchi, Alessandra / Batista e Silva, Filipe / Herrera, Mario A. Marin / Leblois, Antoine / Laval, Carlo / Aerts, Jeroen / Feyen, Luc (2017): Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. In: *Global Environmental Change* 48, S. 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007>

Friedrich, Karsten / Deutschländer, Thomas / Kreienkamp, Frank / Leps, Nora / Mächel, Hermann / Walter, Andreas (2024): Klimawandel und Extremereignisse: Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, Guy / Jacob, Daniela / Schuck-Zöller, Susanne (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. 2. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, S. 61-72

Fürst, Dietrich (2010): *Raumplanung. Herausforderungen des deutschen Institutionensystems*. Detmold: Verlag Dorothea Rohn.

GDA (German Datacenter Association) (2024): *Data Center Impact Report Deutschland*. Online: <https://www.germandatacenters.com/dcird-24/> (zuletzt geprüft am 23.04.2026).

Gebekken, Norbert / Videkhina, Inna / Pfeiffer, Eberhard / Garsch, Maximilian / Rüdiger, Lars (2016): Risikobewertung und Schutz von baulichen Infrastrukturen bei Hochwassergefahr. In: *Bautechnik* 93 (4), S. 199 - 213. <https://doi.org/10.1002/bate.201600003>

Gießen (2022): Fortschreibung Stadtklimaanalyse. Online: <https://giessen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=72653562b42346f0adba2e734a4808e3> (zuletzt geprüft am 08.10.2025).

Gießen (2024a): Begründung zum Vorentwurf des Bebauungsplans GI 05/23 „Katzenfeld“ (zuletzt geprüft am 07.10.2025).

Gießen (2024b): Textliche Festsetzungen zum Bebauungsplan GI 05/23 „Katzenfeld“ (zuletzt geprüft am 07.10.2025).

Gießen (2024c): Umweltbericht-Vorabzug. B-Plan Katzenfeld (zuletzt geprüft am 07.10.2025).

Gießen (2024d): Bebauungsplan Vorentwurf B-Plan „Katzenfeld“ - Anlage 2 a. Online: https://www.giessen.de/media/custom/2874_10726_1.PDF?1728561341 (zuletzt geprüft am 07.10.2025).

Greiving, Stefan / Hurth, Florian / Hartz, Andrea / Saad, Sascha / Fleischhauer, Mark (2016): Developments and Drawbacks in Critical Infrastructure and Regional Planning: A Case Study on Region of Cologne, Germany. In: *Journal of Extreme Events* 3 (4), S. 1-24. <https://doi.org/10.1142/S2345737616500147>

Groth, Markus / Cortekar, Jörg (2015): *Die Relevanz von Klimawandelfolgen für Kritische Infrastrukturen am Beispiel des deutschen Energiesektors*. Lüneburg: Institute of Economics, Leuphana Universität Lüneburg.

Groth, Markus / Rose, Julia (2018): Infrastrukturen (Energie- und Wasserversorgung). In: Von Storch, Hans / Meinke, Insa / Claußen, Martin (Hrsg.): *Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Berlin: Springer, S. 193 - 208.

Groth, Markus / Bender, Steffen / Olfert, Alfred / Schauser, Inke / Viktor, Elisabeth (2023): Kaskadeneffekte und kritische Infrastrukturen im Klimawandel. In: Brasseur, Guy / Jacob, Daniela / Schuck-Zöller, Susanne (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 297-210.

Hanau (2021a): Ansiedlungskonzept für Rechenzentren im Stadtgebiet von Hanau. Online: <https://zukunft-hanau.de/wp-content/uploads/2024/05/StaVo-Beschluss-Rechenzentumsstrategie-2021.pdf> (zuletzt geprüft am 22.05.2025).

Hanau (2021b): Bebauungsplan Nr. 915.3 „Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne“. Begründung. Online: <https://www.hanau.de/mam/Stadtentwicklung/b-plaene/xplan/915.3-begrueend.pdf> (zuletzt geprüft am 25.09.2025).

Hanau (2021c): Bebauungsplan Nr. 915.3 „Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne“. Textliche Festsetzungen. Online: <https://www.hanau.de/mam/Stadtentwicklung/b-plaene/xplan/915.3-text.pdf> (zuletzt geprüft am 25.09.2025).

Hanau (2021d): Bebauungsplan Nr. 915.3 „Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne“. Umweltbericht. Online: <https://www.hanau.de/mam/Stadtentwicklung/b-plaene/xplan/915.3-begrueend.pdf> (zuletzt geprüft am 25.09.2025).

Hanau (2021e): Bebauungsplan Nr. 915.3 „Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne“ in Hanau. Auswirkungen auf das Lokalklima (zuletzt geprüft am 01.10.2025).

Hanau (2021f): Städtebaulicher Vertrag gem. § 11 Abs. 1 BauGB zum Bebauungsplan 915.3 „Gewerbegebiet Großauheim-Kaserne“ (zuletzt geprüft am 01.10.2025).

Hanau (2021g): Anlage N zum städtebaulichen Vertrag Bebauungsplan Großauheim-Kaserne (zuletzt geprüft am 01.10.2025).

Hanau (2021h): Bebauungsplan Großauheim-Kaserne. Online: <https://www.hanau.de/mam/Stadtentwicklung/b-plaene/xplan/915.3-plan.pdf> (zuletzt geprüft am 01.10.2025).

Hanau (2025a): Konversion militärischer Flächen in Hanau. Online: <https://www.hanau.de/stadtentwicklung/geschichte/konversion/index.html> (zuletzt geprüft am 24.09.2025).

Hattermann, Fred / Kundzewicz, Zbigniew / Huang, Shaochun / Vetter, Tobias / Gersengarbe, Friedrich-Wilhelm / Werner, Peter (2013): Climatological Drivers of Changes in Flood Hazard in Germany. In: *Acta Geophysica* 61 (2), S. 463-477. <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0070-4>

Heinrich-Böll-Stiftung / BUND (2025): *Wasseratlas 2025. Daten und Fakten über die Grundlage allen Lebens*. 1. Auflage. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung.

Helfferrich, Cornelia (2009): Die Qualität qualitativer Daten. Manual für die Durchführung qualitativer Interviews. 3. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Herrera, Manuel / Xie, Xiang / Menapace, Andrea / Zanfei, Ariele / Brentan, Bruno (2025): Sustainable AI infrastructure: A scenario-based forecast of water footprint under uncertainty. In: Journal of Cleaner Production 526, S. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146528>

HLNUG (2018): Starkregen und kommunale Vorsorge. Online: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/starkregen/x2_starkregen-v3Einzelblatt.pdf (zuletzt geprüft am 19.11.2024).

HLNUG (2019): Extreme Wetterereignisse in Hessen. Online: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/extreme_wetterereignisse.pdf (zuletzt geprüft am 16.03.2026).

HLNUG (2025a): Starkregenviewer Hessen. Online: <https://umweltdaten.hessen.de/mapapps/resources/apps/starkregenviewer/index.html?lang=de> (zuletzt geprüft am 25.09.2025).

HLNUG (2025b): Hitzeviewer Hessen. Online: <https://umweltdaten.hessen.de/mapapps/resources/apps/hitzeviewer/index.html?lang=de> (zuletzt geprüft am 25.09.2025).

HLNUG (2026a): Häufigkeit und Intensität von Wärmeinselsituationen am Beispiel „Frankfurt am Main“. Online: <https://www.hlnug.de/themen/nachhaltigkeit-indikatoren/indikatorensysteme/klimafolgenindikatoren-hessen/staedtische-waermeinsel> (zuletzt geprüft am 04.03.2026).

HLNUG (2026b): Starkregen-Gefahrenkarten für hessische Kommunen. Online: <https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/projekte/klimprax-projekte/klimprax-starkregen/starkregen-gefahrenkarten> (zuletzt geprüft am 04.05.2026).

HLNUG / Hessische Verwaltung für Bodenmanagement (2025): <https://umweltdaten.hessen.de/mapapps/resources/apps/hwrm/index.html?lang=de> (zuletzt geprüft am 05.03.2025).

HMDI (Hessisches Ministerium für Digitalisierung und Innovation) (2025): Leitfaden für Kommunen zur nachhaltigen Ansiedlung von Rechenzentren. Online: https://digitales.hessen.de/sites/digitales.hessen.de/files/2025-09/rechenzentrum_leitfaden_barrierefrei.pdf (zuletzt geprüft am 23.10.2025).

HMDI (Hessisches Ministerium für Digitalisierung und Innovation) (2026): Rechenzentrumsbüro. Anlaufstelle für Informationen, Beratung und Vernetzung. Online: <https://digitales.hessen.de/starke-netze/recheninfrastrukturen/rechenzentrumsbuero> (zuletzt geprüft am 12.01.2026).

HMWEVL (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum) (2026): Ablaufschema zum Bauleitplanverfahren (Regelverfahren) nach dem Baugesetzbuch (BauGB). Online: <https://bauleitplanung.hessen.de/sites/bauleitplanung->

g.hessen.de/files/2022-04/ablaufschema-bauleitplanverfahren_im_regelverfahren.pdf (zuletzt geprüft am 17.04.2026).

Holling, Crawford Stanley (1973): Resilience and Stability of Ecological Systems. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 4 (1), S. 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

Huber, Bettina / Dunst, Lea (2021): Klimaanpassung in der Bauleitplanung. Zum Integrationsstand klimaanpassungsrelevanter Maßnahmen in Flächennutzungs- und Bebauungsplänen mittelgroßer Städte Deutschlands. In: *Raumforschung und Raumordnung* 97 (5), S. 501 - 517. <https://doi.org/10.14512/rur.34>

Huddleston, Pippa / Smith, Tim / White, Iain / Elrick-Barr, Carmen (2022): Adapting critical infrastructure to climate change: A scoping review. In: *Environmental Science and Policy* 135, S. 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.015>

iMA (2022): Erstellung einer landesweiten Klimaanalyse / Kaltluftströmsituation unter Berücksichtigung des klimawandelbedingten Temperaturanstiegs. Online: https://landesplanung.hessen.de/sites/landesplanung.hessen.de/files/2024-10/landeswklimaanalysehessen_-_abschlussbericht_20240918.pdf (zuletzt geprüft am 16.01.2026).

International Energy Agency (2023): Data Centres and Data Transmission Networks. Online: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks/> (zuletzt geprüft am 07.04.2025).

IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum fünften Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen. Online: https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf (zuletzt geprüft am 08.11.2024).

IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte, V. / Zhai, P. / Pirani, A. / Connors, S.L. / Péan, C. / Berger, S. / Caud, N. / Chen, Y. / Goldfarb, L. / Gomis, M.I. / Huang, M. / Leitzell, K. / Lonnoy, E. / Matthews, J.B.R. / Maycock, T.K. / Waterfield, T. / Yelekçi, O. / Yu, R. / Zhou, B. (Hrsg.): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge/New York: Cambridge University Press, S. 3-32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

IPCC (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Online: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (zuletzt geprüft am 04.04.2024). doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

iWconsult, Detecon (2025): Rechenzentren in Frankfurt am Main und der Region: Standort- und regionalökonomische Wirkungszusammenhänge. Online: https://www.iwconsult.de/fileadmin/user_upload/pdfs/2025/studie_rechenzentren_final_15122025.pdf (zuletzt geprüft am 17.12.2025).

- Janssen, Gerold (2018): Hochwasserschutz. In: ARL (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: ARL, S. 893 - 905.
- Jasiunas, Justinas / Lund, Peter / Mikkola, Jani (2021): Energy system resilience - A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150, S. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476>
- Jeromin, Curt (2023): Baugesetzbuch. § 1 Aufgabe, Begriff und Grundsätze der Bauleitplanung. In: Kröninger, Holger / Jeromin, Curt (Hrsg.): Nomos Handkommentar. BauGB, BauNVO. 5. Auflage. Baden-Baden: Nomos, S. 34 - 63.
- Jones, Nicola (2018): The Information Factories. Data centres are chewing up vast amounts of energy - so researchers are trying to make them more efficient. In: *Nature* 561, S. 163-166. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y>
- Kaiser, Robert (2021): Qualitative Experteninterviews. Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- Keller, Sina / Atzl, Andreas (2014): Mapping Natural Hazard Impacts on Road Infrastructure - The Extreme Precipitation in Baden-Württemberg, Germany, June 2013. In: *International Journal of Disaster Risk Science*. 5 (3), S. 227 - 241. <https://doi.org/10.1007/s13753-014-0026-1>
- Khan, Khalid (2025): How do supply chain and geopolitical risks threaten energy security? A time and frequency analysis. In: *Energy* 316, S. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134501>
- Kotzanikolaou, Panayiotis / Theoharidou, Marianthi / Gritzalis, Dimitris (2013): Cascading Effects of Common-Cause Failures in Critical Infrastructures. In: 7th International Conference on Critical Infrastructure Protection (ICCIP), Mar 2013, Washington, DC, United States. S.171-182. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45330-4_12
- Krings, Susanne (2020): Doppelt relevant: Kritische Infrastrukturen der Daseinsvorsorge. In: *Raumforschung und Raumordnung* 78 (6), S. 575 – 593. <https://doi.org/10.2478/rara-2020-0034>
- Kruse, Philip / Schmitt, Hanna / Greiving, Stefan (2021): Systemic criticality - a new assessment concept improving the evidence basis for CI protection. In: *Climatic Change* 165 (1), S. 1 - 20. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03019-x>
- Kuckartz, Udo / Rädiker, Stefan (2024): Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Umsetzung mit Software und künstlicher Intelligenz. 6. Auflage. Weinheim/Basel: Beltz Juventa.
- Kumar, Nikhil / Poonia, Vikas / Gupta, B.B. / Goyal, Manish Kumar (2021): A novel framework for risk assessment and resilience of critical infrastructure towards climate change. In: *Technological Forecasting & Social Change* 165, S. 1 - 12. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120532>

Kunz, Michael / Karremann, Melanie / Mohr, Susanna (2024): Auswirkungen des Klimawandels auf Starkniederschläge, Gewitter und Schneefall. In: Brasseur, Guy / Jacob, Daniela / Schuck-Zöller, Susanne (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. 2. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, S. 73-84.

Labaka, Leire / Hernantes, Josune / Sarriegi, Jose (2016): A holistic framework for building critical infrastructure resilience. In: *Technological Forecasting & Social Change* 103, S. 21-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.005>

Land Hessen (2020): Bereiche kritischer Infrastrukturen (KRITIS): Hessische Übersicht über Sektoren, Branchen, kritische Dienstleistungen, kritische Prozesse und Beispiele für Anlagen/Einrichtungen sowie Zuständigkeiten der Landesverwaltung. Online: https://hessen.de/sites/hessen.hessen.de/files/2021-11/kritis-uebersicht_sektoren-branchen-kdl-prozesse_he.pdf (zuletzt geprüft am 09.01.2024).

Landkreis Groß-Gerau (2023): Praxisleitfaden zur Steuerung der Ansiedlung von Rechenzentren im Landkreis Groß-Gerau. Online: https://www.kreisgg.de/fileadmin/Wirtschaftsfoerderung/Wirtschaftsfoerderung/Broschueren_und_Berichte/6936_Praxisleitfaden_fuer_Rechenzentren_GG_D_230523.pdf (zuletzt geprüft am 20.03.2025).

Landesplanung Hessen (2020): Landesentwicklungsplan Hessen. Lesefassung. Online: https://landesplanung.hessen.de/sites/landesplanung.hessen.de/files/2022-09/lep_2020_pdf.pdf (zuletzt geprüft am 17.07.2025).

Landesplanung Hessen (2026a): Über uns. Online: <https://landesplanung.hessen.de/landesplanung/ueber-uns-kontakt> (zuletzt geprüft am 06.01.2026).

Landesplanung Hessen (2026b): Grundlagen Landesweite Klimaanalyse. Strömungsmodell FITNAH. Online: <https://landesplanung.hessen.de/klima/landesweite-klimaanalyse> (zuletzt geprüft am 04.03.2026).

Landesplanung Hessen (2026c): Geodaten. Online: https://geodatendienste-landesplanung-hessen.de/ows/services/org.3.40765c1a-056b-4d5b-b5ed-d2549054ea83_wfs?service=WFS&version=2.0.0&request=GetCapabilities (zuletzt geprüft am 13.04.2026).

Laugé, Ana / Hernantes, Josune / Sarriegi, Jose (2015): Critical infrastructure dependencies: A holistic, dynamic and quantitative approach. In: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 8, S. 16 - 23. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2014.12.004>

Lauwe, Peter / Riegel, Christoph (2008): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Konzepte zur Versorgungssicherheit. In: *Informationen zur Raumentwicklung* Heft 1/2, S. 113 - 125.

Lenz, Susanne (2009): Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen. Bonn: BBK.

Li, Haoran / Hou, Juan / Hong, Tianzhen / Ding, Yuemin / Nord, Natasa (2021): Energy, economic, and environmental analysis of integration of thermal energy storage into district heating systems using waste heat from data centres. In: *Energy* 219, S. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119582>

Liefner, Ingo / Losacker, Sebastian (2023): Nachhaltige Wirtschaftsgeographie. Paderborn: Brill Schöningh.

Linke, Hans-Joachim / Ritter, Luisa / Bourgoïn, Audrey / Kraff, Benjamin Dominic / Salemons, Fabian (2022): Gefährdungsanalyse von Verkehrsinfrastrukturen gegenüber Klimaauswirkungen. Teil 1: Gefährdungsanalyse. Online: https://www.raumplanung.tu-darmstadt.de/media/iwar_ruip/forschung_7/Gefaehrdungsanalyse_von_Verkehrsinfrastrukturen_Hessen_Mobil.pdf (zuletzt geprüft am 12.02.2026).

Lundberg, Russell (2026): Critical thinking: exploring the expansion of critical infrastructure. In: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 52, S. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100814>

Mäding, Heinrich (2011): Große Trends. In: ARL (Hrsg.): *Grundriss der Raumordnung und Raumentwicklung*. Hannover: ARL, S. 21-45.

Mainova (2024): Mit Netflix die Wohnung heizen? Das Potenzial von Abwärme nutzen. Online: <https://www.mainova.de/de/wissenswertes/privatkunden-blog/heizen/heizen-mit-abwaerme-139558> (zuletzt geprüft am 08.04.2025).

Masanet, Eric / Shehabi, Arman / Lei, Nuoa / Smith, Sarah / Koomey, Jonathan (2021): Recalibrating global data center energy-use estimates. Growth in energy use has slowed owing to efficiency gains that smart policies can help maintain in the near term. In: *Science* 367 (6481), S. 984-986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>

Monstadt, Jochen / Schmidt, Martin (2019): Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities. In: *Urban Studies* 56 (11), S. 2353-2371. <https://doi.org/10.1177/0042098018808483>

Montagud-Montalvá, C. / Navarro-Peris, E. / Gómez-Navarro, T. / Masip-Sanchis, X. / Prades-Gil, C. (2023): Recovery of waste heat from data centres for decarbonisation of university campuses in a Mediterranean climate. In: *Energy Conversion and Management* 290, S. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117212>

Moss, Richard / Edmonds, Jae / Hibbard, Kathy / Manning, Martin / Rose, Steven / van Vuuren, Detlef / Carter, Timothy / Emori, Seita / Kainuma, Mikiko / Kram, Tom / Meehl, Gerald / Mitchell, John / Nakicenovic, Nebojsa / Riahi, Keywan / Smith, Steven / Stouffer, Ronald / Thomson, Allison / Weyant, Hohn / Wilbanks, Thomas (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In: *Nature* 463, S. 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Nakamura, Isao / Llasat, Maria Carmen (2017): Policy and systems of flood risk management: a comparative study between Japan and Spain. In: *Natural Hazards* 87, S. 919-943. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2802-x>

Neubauer, Katharina (2022): *Datenspeichergebäude. Im Spannungsfeld zwischen gesellschaftlicher Bedeutung und räumlicher Präsenzlosigkeit*. Berlin: Jovis Verlag GmbH.

Newman, Rebecca / Noy Ilan (2023): The global costs of extreme weather that are attributable to climate change. In: Nature Communications 14, S. 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41888-1>

Nissen, Katrin / Ulbrich, Uwe: Increasing frequencies and changing characteristics of heavy precipitation events threatening infrastructure in Europe under climate change. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 17 (7), S. 1177 - 1190. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1177-2017>

Park, J. / Seager, T.P. / Rao, P.S.C. / Convertino, M. / Linkov, I. (2013): Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems. In: Risk Analysis 33 (3), S. 356-367. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01885.x>

Passow, Christian / Donner, Reik (2019): A Rigorous Statistical Assessment of Recent Trends of Heavy Precipitation Over Germany. In: Frontiers in Environmental Sciences 7 (143), S. 1-14. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00143>

Petit, F. D. / Bassett, G. W. / Black, R. / Buehring, W. A. / Collins, M. J. / Dickinson, D. C. / Fisher, R. E. / Haffenden, R. A. / Huttenga, A. A. / Klett, M. S. / Phillips, J. A. / Thomas, M. / Veselka, S. N. / Wallace, K. E. / Whitfield, R. G. / Peerenboom, J. P. (2013): Resilience Measurement Index: An Indicator of Critical Infrastructure Resilience. Online: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2013/07/76797.pdf> (zuletzt geprüft am 04.02.2026).

Platzer, Eva (2023): Schutz kritischer Infrastrukturen in Deutschland. Implementation zum Infrastrukturschutz an Verkehrsflughäfen. Wiesbaden: Springer.

Plenz, Maik / Ziller, Paul / Heider, Felix / Michael, Lars-Henrik et al. (2021): Einflüsse des Klimawandels auf ausgewählte Assetklassen von Verteilnetzbetreibern. In: Universitätsbibliothek der HSU/UniBwH (Hrsg.): *Stand der Technik und Digitalisierung bei integrierten Energiesystemen, Sektorenkopplungs- und Mobilitätstechnologien*. Hamburg: Universitätsbibliothek der HSU/UniBwH, S. 19 - 27.

Rechid, Diana / Breil, Marcus / Jacob, Daniela / Kottmeier, Christoph / Petersen, Juliane / Pfeifer, Susanne / Teichmann, Claas (2024): Regionale Klimamodellierung. In: Brasseur, Guy / Jacob, Daniela / Schuck-Zöller, Susanne (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. 2. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, S. 31-46.

Regierungspräsidium Darmstadt (2025): Textteil – Entwurf / Vorentwurf 2025 Regionalplan Südhessen und Regionaler Flächennutzungsplan für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main. Online: <https://rim.ekom21.de/rp-darmstadt/sdnetrim/UGhVM0h-pd2NXNFdFcExjZWfiUHAvNdZ82ACPIdrvVBZv4P5sm0Te-r7Q9p95yLed/01 - RPS-RegFNP - 2025 - Gemeinsamer Textteil.pdf> (zuletzt geprüft am 18.07.2025).

Regierungspräsidium Gießen (2021): Regionalplan Mittelhessen. Entwurf zur Beteiligung gemäß § 6 Abs. 2 und 3 HLPG i. V. m. § 9 ROG. Online: <https://rp-giessen.hessen.de/>

sites/rp-giessen.hessen.de/files/2022-05/x2021_09_15_rpm-textentwurf.pdf (zuletzt geprüft am 22.04.2025).

Regierungspräsidium Kassel (2024): Regionalplan Nordosthessen. Entwurf für die 1. Offenlage (Stand September 2024). Online: <https://beteiligungsportal.hessen.de/portal/rpks/beteiligung/themen/1003280/1008602> (zuletzt geprüft am 18.07.2025).

Regionalverband FrankfurtRheinMain (2022): Kompaktwissen Rechenzentren. Handreichung für Kommunen in der Region FrankfurtRheinMain. Online: <https://www.region-frankfurt.de/zuk06> (zuletzt geprüft am 20.03.2025).

Regionalverband FrankfurtRheinMain (2026): Rechenzentren in FrankfurtRheinMain. Online: <https://www.region-frankfurt.de/Unsere-Themen-Leistungen/Digitalisierung/Rechenzentren/> (zuletzt geprüft am 12.01.2026).

Riegel, Christoph (2014): Infrastructure resilience through regional spatial planning - prospects of a new legal principle in Germany. In: International of Critical Infrastructures 10 (1), S. 17-29. <https://doi.org/10.1504/IJCIS.2014.059541>

Riegel, Christoph (2015): Die Berücksichtigung des Schutzes kritischer Infrastrukturen in der Raumplanung. Dissertation. Aachen: RWTH.

Rinaldi, Steven / Peerenboom, James / Kelly, Terrence (2002): Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. In: IEEE Control Systems Magazine 21 (6), S. 11 - 25. <https://doi.org/10.1109/37.969131>

Robine, Jean-Marie / Cheung, Siu Lan / Le Roy, Sophie / Van Oyen, Herman / Griffiths, Clare / Michel, Jean-Pierre / Herrmann, Francois Richard (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. In: *C.R. Biologies* 331 (2), S. 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>

Rogelj, J.; Smith, C. / Plattner, G.-K. / Meinshausen, M. / Szopa, S. / Milinski, S. / Marotzke, J. (2021): Summary for Policymakers of the Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report - data for Figure SPM.4 (v20210809). NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. Online: https://data.ceda.ac.uk/badc/ar6_wgl/data/spm/spm_04/v20210809/panel_a (zuletzt geprüft am 01.09.2026).

Schmidt, Hauke / Eyring, Veronika / Larif, Mojib / Marotzke, Jochem / Rechid, Diana / Sausen, Robert (2024): Globale Modellierung des Klimawandels. In: Brasseur, Guy / Jacob, Daniela / Schuck-Zöller, Susanne (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. 2. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, S. 7-18.

Schmidt, Martin / Monstadt, Joachim (2018): Infrastruktur. In: ARL (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: ARL, S. 975 - 988.

Schmitt, Hanna (2020): Was heißt hier eigentlich ‚kritisch‘? Entwicklung einer Evidenzgrundlage zum Umgang mit kritischen Infrastrukturen in der Raumordnung. Dissertation. Dortmund: TU Dortmund.

Scholich, Dietmar (2018): Vorranggebiet, Vorbehaltsgebiet und Eignungsgebiet. In: ARL (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: ARL, S. 2841 - 2855.

Schüttrumpf, Holger / Birkmann, Jörn / Stenger-Wolf, Stefanie / Klopries, Elena-Maria / Thieken, Annegret (2026): The Flood Event in July 2021 in Europe - Observations, Conclusions, Challenges. In: Journal of Flood Risk Management 0, S. 1-14. <https://doi.org/10.1111/jfr3.70175>

Schultheis, Jürgen (2011): Zur Rolle der Raumplanung in der Gesellschaft. In: ARL (Hrsg.): Grundriss der Raumordnung und Raumentwicklung. Hannover: ARL, S. 1-10.

Schumacher, Oskar (2025): Kritische Infrastrukturen. Begriff, Strukturen und Perspektiven von KRITIS als Regulierungsprogramm. Berlin: Duncker & Humblot.

Schwappach, Cordula / Beyer, Elke / Suwala, Lech (2023): Place-Based Climate-Proofing of Commercial and Industrial Areas: Inventory and Guidelines From a Regional Planning Perspective. In: Urban Planning 8 (4), S. 166 - 185. <https://doi.org/10.17645/up.v8i4.7100>

Siddik, Abu Bakar / Shehabi, Arman / Marston, Landon (2021): The environmental footprint of data centers in the United States. In: Environmental Research Letters 6, S. 1-12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfba1>

Soares, Ian Varela / Yarime, Masaru / Klemun, Magdalena (2024): Balancing the trade-off between data center development and its environmental impacts: A comparative analysis of Data Center Policymaking in Singapore, Netherlands, Ireland, Germany, USA, and the UK. In: Environmental Science and Policy. 157, S. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103769>

Staatsanzeiger Hessen (2014): Erste Verordnung zur Änderung der „Verordnung über die Feststellung des Überschwemmungsgebietes Lahn Abschnitt IV von der Kreisgrenze des Landkreises Marburg-Biedenkopf/Landkreis Gießen (km 160,244) bis zur Kreisgrenze Landkreis Gießen/Lahn-Dill-Kreis (km 138,963) vom 25. Juli 2005“. Online: <https://www.staatsanzeiger-hessen.de/browse/document/a6d21ed2-1e84-3836-bb4c-c2dc162766ce> (zuletzt geprüft am 25.03.2025).

Stadt Frankfurt (2022a): Gewerbeflächenentwicklungsprogramm. Online: <https://www.stadtplanungsamt-frankfurt.de/show.php?ID=20069&psid=fgqr8rie3osp18keiti8qdem77> (zuletzt geprüft am 22.10.2025).

Stadt Frankfurt (2022b): Gewerbeflächenentwicklungsprogramm. Anlage 3 - Standorttypen des Gewerbeflächenentwicklungsprogramms. Online: <https://www.stadtplanungsamt-frankfurt.de/show.php?ID=22074&psid=fgqr8rie3osp18keiti8qdem77> (zuletzt geprüft am 22.10.2025).

Stadtplanungsamt Frankfurt (2026): Das Bebauungsplanverfahren. Online: https://www.stadtplanungsamt-frankfurt.de/planverfahren_5350.html (zuletzt geprüft am 17.04.2026).

Stone, Brian (2012): *The City and the coming climate: Climate Change in the places we live*. Cambridge: Cambridge University Press.

Strauß, Jürgen (2015): Infrastruktursicherheit. In: Jäger, Thomas (Hrsg.): *Handbuch Sicherheitsgefahren*. Wiesbaden: Springer, S. 343-354.

Tappert, Simone / Suter, Aline (2025): Urbane Räume im digitalen Wandel - Herausforderungen und Chancen für die Stadtentwicklung. In: *Forum Wohnen und Stadtentwicklung*, S. 1.

Thieken, Annegret / Zenker, Marie-Luise / Bubeck, Philip (2023): Flood-related fatalities during the flood of July 2021 in North Rhine-Westphalia, Germany: what can be learnt for future flood risk management? In: *Journal of Coastal and Riverine Flood Risk* 2, S. 1-19. <https://doi.org/10.59490/jcrfr.2023.0005>

Tröltzsch, Jenny / Görlach, Benjamin / Lückge, Helen / Peter, Martin et al. (2012): *Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel*. Berlin: EcoLogic.

UBA (2011): Hochwasser. Verstehen, Erkennen, Handeln! Online: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/378/publikationen/uba_hochwasser_barrierefrei_ne_w.pdf (zuletzt geprüft am 21.04.2026).

UBA (2020): Planungsebenen, Planungsräume - Stufen der räumlichen Planung. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/planungsinstrumente/planungsebenen-planungsraeume-stufen-der#bundesebene> (zuletzt geprüft am 20.09.2024).

UBA (2022): Klimamodelle und Klimaszenarien. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimamodelle-szenarien#was-sind-klimamodelle> (zuletzt geprüft am 08.11.2024).

UBA (2024): Häufige Fragen zum Klimawandel. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#klima> (zuletzt geprüft am 08.11.2024).

UNDRR (2015): Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. Online: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> (zuletzt geprüft am 20.06.2024).

UNDRR (2017): Disaster Risk Reduction Terminology. Critical Infrastructure. Online: <https://www.undrr.org/terminology/critical-infrastructure> (zuletzt geprüft am 20.06.2024).

Uptime Institute (2024): Executive Summary. Uptime Intelligence Report: July 2024. Uptime Institute Global Data Center Survey 2024. Online: https://uptimeinstitute.com/uptime_assets/7425ec68d479c5d78a743df94a79b114ed9f9c73f13b6460949d2b8e73373209-GA-2024-07-uptime-institute-global-data-center-survey-results-2024.pdf (zuletzt geprüft am 23.04.2026).

Vallée, Dirk (2011): Zusammenwirkung von Raumplanung und raumbedeutsamen Fachplanungen. In: ARL (Hrsg.): Grundriss der Raumordnung und Raumentwicklung. Hannover: ARL, S. 567-604.

Varianou Mikellidou, Cleo / Shakou, Louisa / Boustras, George / Dimopoulos, Christos (2017): Energy critical infrastructures at risk from climate change: A state of the art review. In: *Safety Science* 110 (4), S. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.022>

Von Haaren, Christina / Jessel, Beate (2011): Umwelt und Raumentwicklung. In: ARL (Hrsg.): Grundriss der Raumordnung und Raumentwicklung. Hannover: ARL, S. 671-718.

Wahlroos, Mikko / Pärssinen, Matti / Manner, Jukka / Syri, Sanna (2017): Utilizing data center waste heat in district heating: Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. In: *Energy* 140, S. 1228-1238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.078>

Winsemius, Hessel / Aerts, Jeroen / van Beek, Ludovicus / Bierkens, Marc / Bouwan, Arno / Jongman, Brenden / Kwadijk, Jaap / Ligtoet, Willem / Lucas, Paul / van Vuuren, Detlef / Ward, Philip (2015): Global drivers of future river flood risk. In: *Nature Climate Change* 6, S. 381 – 385. <https://doi.org/10.1038/nclimate2893>

WMO (World Meteorological Organization) (2026): Climate. Online: <https://wmo.int/topics/climate> (zuletzt geprüft am 06.01.2026).

XDI (Cross Dependency Initiative) (2025): 2025 Global Data Centre Physical Climate Risk and Adaptation Report. Online: <https://xdi.systems/news/2025-global-data-centre-physical-climate-risk-and-adaptation-report> (zuletzt geprüft am 29.10.2025).

Xu, Zhitao / Elomri, Adel / Kerbache, Laocine / el Omri, Abdelfatteh (2020): Impacts of COVID-19 on Global Supply Chains: Facts and Perspectives. In: *IEEE Engineering Management Review* 48 (3), S. 153-166. <https://doi.org/10.1109/EMR.2020.3018420>

Yuan, Xiaolei / Liang, Yumin / Hu, Xinyi / Xu, Yizhe / Chen, Yongbao / Kosonen, Risto (2023): Waste heat recoveries in data centers: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 188, S. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777>

Zentrale Kompetenzstelle für Geoinformation Hessen (2026): Verwaltungsgrenzen Hessen. WFS Schnittstelle. Online: https://opendata.hessen.de/dataset/verwaltungsgrenzen-hessen/resource/6b54a955-b4c6-47ce-9f09-237a1a38ddf1?view_id=aba0d30a-9bf3-44e1-8708-696ccb1f000#views-header (zuletzt geprüft am 13.04.2026).

Zio, Enrico (2016): Critical Infrastructures Vulnerability and Risk Analysis. In: *European Journal for Security Research* 1, S. 97–114. <https://doi.org/10.1007/s41125-016-0004-2>

Rechtsquellenverzeichnis

BauGB - Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 22. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 348) geändert worden ist.

BauNVO - Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist.

BlmschV - Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen vom 26. Januar 2010 (BGBl. I S. 38), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4676) geändert worden ist.

BSIG - BSI-Gesetz vom 2. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 301, S. 2), das durch Artikel 4 des Gesetzes vom 11. März 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 66) geändert worden ist.

BSI-KritisV - BSI-Kritisverordnung vom 22. April 2016 (BGBl. I S. 958), die zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 11. März 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 66) geändert worden ist.

EnEfG - Energieeffizienzgesetz vom 13. November 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 309).

GG - Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. März 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 94) geändert worden ist.

HBO - Hessische Bauordnung vom 28. Mai 2018 (GVBl. 2018 S. 198), zuletzt geändert am 14. Oktober 2025 (GVBl. 2025 Nr. 66).

HWG - Hessisches Wassergesetz in der Fassung vom 14. Dezember 2010 (GVBl. I S. 548), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 28. Juni 2023 (GVBl. S. 473, 475).

IT-Sicherheitsgesetz - Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme vom 17. Juli 2015 (BGBl. 2015 I Nr. 31, S. 1324).

IT-Sicherheitsgesetz 2.0 - Zweites Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme vom 18. Mai 2021 (BGBl. 2021 I Nr. 25, S. 1122).

KritisDachG - KRITIS-Dachgesetz vom 11. März 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 66), das durch Artikel 8 des Gesetzes vom 21. Juli 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 221) geändert worden ist.

Richtlinie 2007/60/EG („Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie“) des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken, ABl L 288 vom 06.11.2007, S. 27-34.

Richtlinie 2008/114/EG („EPSKI-Richtlinie“) des Rates vom 8. Dezember 2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern, ABl. L 345 vom 23.12.2008, S. 75-82.

Richtlinie (EU) 2016/1148 („NIS-Richtlinie“) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2016 über Maßnahmen zur Gewährleistung eines hohen gemeinsamen Sicherheitsniveaus von Netz- und Informationssystemen in der Union, ABl. L 194 vom 19.07.2016, S. 1-30.

Richtlinie (EU) 2022/2555 („NIS-2-Richtlinie“) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 910/2014 und der Richtlinie (EU) 2018/1972 sowie zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2016/1148, ABl. L 333 vom 27.12.2022, S. 80-152.

Richtlinie (EU) 2022/2557 („CER-Richtlinie“) des europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/114/EG des Rates, ABl L 333 vom 27.12.2022, S. 164-198.

ROG - Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 12. August 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 189) geändert worden ist.

UVPG - Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 348) geändert worden ist.

WHG - Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 29. März 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 84) geändert worden ist.

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Ich stimme einer evtl. Überprüfung meiner Dissertation durch eine Antiplagiat-Software zu. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Angaben zu auf künstlicher Intelligenz (KI) basierender Hilfen wie ChatGPT oder SchulKI von OpenAI oder Gemini von Google zur Erstellung meiner Dissertation (Zutreffendes angekreuzt):

- ☐ Ich habe bei der Erstellung dieses Textes kein KI-Tool verwendet.
- ☐ Ich habe ein KI-Tool in den folgenden Bereichen eingesetzt (Mehrfachnennungen möglich):
 - ☐ Ideen finden, meine Kreativität anregen
 - ☐ Verstehen von Konzepten, Recherche von Fakten und Definitionen
 - ☐ Optimierung eines von mir verfassten Textes
 - ☐ Erstellen ganzer Textpassagen nach meinen Vorgaben

Folgende KI-Tools habe ich verwendet, damit aufgeführte Teile meines Textes von dem Tool wie folgt profitiert haben:

Datum: _____ Unterschrift: _____