Einflüsse des Klimawandels auf ausgewählte Assetklassen von Verteilnetzbetreibern

Maik Plenz, Paul Ziller, Felix Heider, Lars-Henrik Michael, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
*maik.plenz@hsu-hh.de

***Kurzfassung* – Der Klimawandel und seine Folgen sind weltweit in bedeutendem Ausmaß zu erkennen und auch in Deutschland ersichtlich. Die Veränderungen des Klimas führen zu einem gestiegenen Bewusstsein für mögliche Auswirkungen auf Wirtschaft, Leben, Natur und den Menschen. Speziell in der kritischen Infrastruktur und hier den Energienetzen sind die bisherigen Forschungen jedoch noch nicht weitreichend genug, um eine umfassende Bewertung über die Auswirkungen und potentiellen Folgen abzugeben. In diesem Artikel werden daher mögliche Entwicklungen des Klimawandels projiziert und Auswirkungen auf die Energieinfrastruktur im Allgemeinen und das Verteilnetz im speziellen betrachtet. Hierzu wird der Betrieb von zwei ausgewählten Assetklassen bei sich verändernden klimatischen Bedingungen untersucht. Dies dient als Grundlage eines Forschungsprojektes für die Stromnetz Hamburg GmbH (SNH), bei welchem die Betroffenheit der Verteilnetze und die techno-ökonomischen Auswirkungen auf wichtige Assets untersucht werden.**

Stichworte – Klimawandel, Stromnetze, Verteilnetze, Assets

NOMENKLATUR

GMST	Globale mittlere Oberflächentemperatur (über 20 Jahre) (engl.: Gobal Mean Surface Temperature)
IPCC	Weltklimarat (engl.: Intergovernmental Panel on Climate Change
RCM	Regionale Klimamodelle (engl.: Regional Climate Model)
RCP	Repräsentative Konzentrationspfade (engl.: Representative Concentration Path)
SNH	Stromnetz Hamburg GmbH
VNB	Verteilnetzbetreiber
A_{eff} in mm²	Effektiver Leiterquerschnitt
D in cm	Durchmesser des Maschenerders
d_{T} in cm	Bereich der Austrocknung um das Kabel
I_{E}, I_{S} in A	Erdungsstrom, Schirmstrom
P_{V} in W	Verlustleistung
$P_{\mathrm{L}}, P_{\mathrm{I}}, P_{\mathrm{S}}$ in W	Leiterverluste, Dielektrische Verluste der Isolationsschicht(en), Schirmverluste
r	Reduktionsfaktor
$r_{\mathrm{B}}, r_{\mathrm{M}}, r_{\mathrm{S}}, r_{\mathrm{I}}, r_{\mathrm{L}}$ in cm	Radius des Bodens, Mantels, Schirms, Isolators und Leiters
R_{A}, R_E, R_{L}, R_{S} in Ω	Ausbreitungswiderstand, Erdungswiderstand, Leiterwiderstand, Schirmwiderstand
t_{F} in s	Dauer eines Fehlers bis zur Abschaltung
T_{L}, T_B in °C	Leitertemperatur, Bodentemperatur
$\bar{T}_{\mathrm{RCP2.6}}$ in °C	Jahresmitteltemperatur (des RCP 2.6)
U_{T}, U_{E} , U_{S} in V	Maximale zulässige Berührungsspannung, Erdungsspannung, Schrittspannung
$Z_{\infty,\mathrm{K}}$, $Z_{\infty,\mathrm{F}}$ in Ω	Impedanzen der Kabel und Freileitungen
λ_{F} in W/K·m	Wärmeleitfähigkeit
ρ_{E} in Ω·m	Spezifische Erdwiderstand des Erdreiches
ρ_{spez} in Ω·mm²/m	Spezifischen elektrischer Widerstand
σ_{th} in m·K/W	Thermischer Widerstand

I. EINLEITUNG

Gemäß dem ersten Teil des 6. Sachstandsberichtes (AR6) des Weltklimarats (IPCC), welcher am 09. August 2021 veröffentlicht wurde, gehen auch die optimistischen Zukunftsszenarien mit einem weiteren Anstieg der durchschnittlichen globalen Oberflächentemperatur um 1,0 °C – 1,8 °C einher (siehe ABBILDUNG 1). Laut dem IPCC war seit dem Jahr 1850 jede Dekade wärmer als die vorherige. Dabei fiel der Anstieg der Temperatur in den letzten 50 Jahren (1970 – 2020) höher aus als in sämtlichen 50-Jahr-Perioden der vergangen 2000 Jahre. Als Ursache dieses Temperaturanstieges sieht das IPCC die Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten an [1].

Die Einflussnahme auf die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre durch den Menschen (anthropogener Klimawandel) bestimmt nach dem aktuellen

DOI: 10.24405/13944

Bericht (AR6) des IPCC schon zum jetzigen Zeitpunkt maßgeblich die Ausprägung und Häufigkeit von Wetterextremen, wie z. B. Hitzewellen, Dürren, Starkregenereignissen und tropischen Stürmen. Die Belege dazu haben sich nach Ansicht des IPCC seit der Veröffentlichung des letzten Berichts (AR5) im Jahr 2014 erhärtet [2].

Die Vulnerabilität ist besonders in der Energiewirtschaft hoch. Als kritische Infrastruktur ist sie maßgeblich zur Erhaltung der Stabilität des staatlichen Gemeinwesens verantwortlich. Alle Bereiche, von Erzeugung über Transport, Verteilung und Speicherung bis hin zum Verbrauch und Handel, sind direkt oder indirekt von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. So werden bspw. Kraftwerke oder elektrische Leitungen in ihrem Wirkungsgrad maßgeblich durch äußere Witterungsereignisse beeinflusst [3].

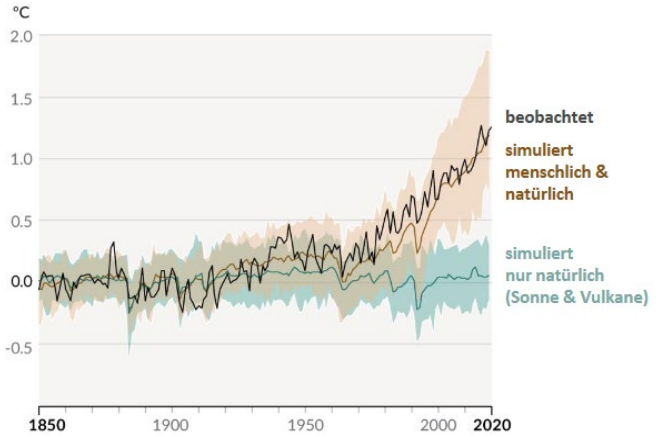

ABBILDUNG 1: ÄNDERUNG DER GLOBALEN OBERFLÄCHENTEMPERATUR (JÄHRLICHE MITTEL) AUS BEOBACHTUNGSDATEN UND SIMULIERT UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON MENSCHLICHEN & NATÜRLICHEN SOWIE NUR NATÜRLICHEN FAKTOREN (JEWEILS 1850 – 2020) [1].

Um diesen Einfluss zu verdeutlichen, werden in diesem Beitrag die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verteilungsebene der Energieversorgung vertiefend betrachtet. Mit rund 1,8 Mio. km Leitungslänge bilden die Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetzebenen des Verteilnetzes den Grundstock des Energienetzes. Im Vergleich zu den 37.000 km umfassenden Leitungslängen des Übertragungsnetzes, unterliegen das Verteilnetz und die zugehörigen Netzbetriebsmittel vielfältigeren und großflächigeren Auswirkungen des Klimawandels.

Im Fokus dieses Artikels steht nicht die Betrachtung eines einzelnen Unternehmens, sondern ein Überblick über mögliche Folgen des Klimawandels für verschiedene Klassen von Anlagen in elektrischen Verteilnetzen. Dazu werden einzelne ausgewählte Assets analysiert und der Einfluss des Klimawandels dargelegt. Hierfür wird in einem ersten Abschnitt auf den Klimawandel und die Definitionen und Abgrenzungen eingegangen. Es werden Wetterphänomene und ihr Einfluss erläutert und auf den nationalen Bezugsrahmen ausgerichtet. Darauffolgend werden Klimaeinflüsse auf spezielle Assets der Verteilnetzebene analysiert und bewertet. Abschließend erfolgt die Abschätzung von Auswirkungen. Ziel dieser Arbeit ist es somit, mögliche Einflüsse des anthropogenen Klimawandels auf einzelne Assets eines Verteilnetzbetreibers aufzuzeigen, um in diesem Zusammenhang die theoretische Grundlage für technische Anpassungsmaßnahmen sowie die zugehörigen Kostenkalkulationen zu legen.

II. KLIMASYSTEM UND KLIMAWANDEL – DEFINITION, ABGRENZUNG UND MODELLE

Das Klimasystem umfasst nicht nur die Atmosphäre und ihre Zusammensetzung, sondern auch die Komponenten des Ozeans, der Biosphäre, der Kryosphäre, der Geosphäre und der Landoberfläche. Diese Komponenten unterliegen externen Einflüssen (bspw. variierender Vulkanismus, solare Aktivitätsänderung), variablen Randbedingungen (bspw. plattentektonische Prozesse) und internen Wechselwirkungen und Prozessen (bspw. atmosphärische Zirkulationsanomalien, die auf die Meeresoberflächentemperatur wirken). Der Klimawandel wird durch die genannten Einflüsse und auftretenden Zustandsformen des Klimasystems, für verschiedene räumliche und zeitliche Skalen bedingt [4]. Damit eine Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf Verteilnetzbetreiber (VNB) erfolgen kann, wird zunächst auf die Grundlagen des natürlichen und anthropogenen Treibhauseffektes eingegangen.

A. Natürlicher Treibhauseffekt

Der natürliche Treibhauseffekt basiert auf dem Sachverhalt, dass die Erdatmosphäre eine weitgehende Durchlässigkeit in Bezug auf einen Großteil der kurzwelligen (Sonnen-)Strahlung aufweist, die langwellige Strahlung jedoch aufgrund der sich in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgase zu einem erheblichen Teil reemittiert wird. Etwa ein Drittel der von der Sonne ausgehenden Strahlung wird durch die Atmosphäre zurückgestrahlt. Der Rest wird zu einem überwiegenden Teil von der Erdoberfläche absorbiert, welche sich infolgedessen erwärmt und in diesem Zusammenhang langwellige Strahlung in Richtung der Erdatmosphäre emittiert. Aufgrund der weitgehenden Undurchlässigkeit der Erdatmosphäre gegenüber langwelliger Strahlung, erfolgt im Anschluss die Reemittierung der von der Erdoberfläche ausgehenden Strahlung, wie ABBILDUNG 2 quantitativ zeigt. Ohne Atmosphäre würde eine mittlere Temperatur von -18 °C auf der Erde vorherrschen. Die damit einhergehende Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre (Treibhauseffekt) schafft die Grundlage für die mittlere globale Lufttemperatur von 14 °C bis 15 °C [1], [5].

Der Treibhauseffekt, bedingt durch die Gase Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und halogenierten Treibhausgasen wie Trichlorfluormethan (CFC-11), führt ohne den menschbedingten Einfluss zu einer Wärmerückstrahlung < 1,5 W/m^2. In der Atmosphäre befinden sich ohne menschlichen Einfluss ca. 280 ppm CO_2, < 1500 ppb CH_4, < 300 ppb N_2O [6].

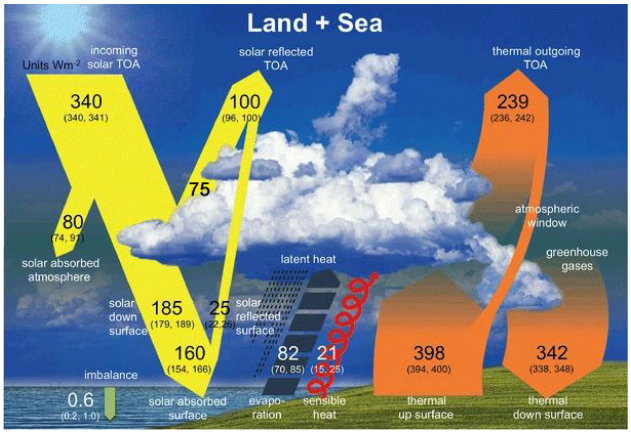

ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES NATÜRLICHEN TREIBHAUSEFFEKTES [7].

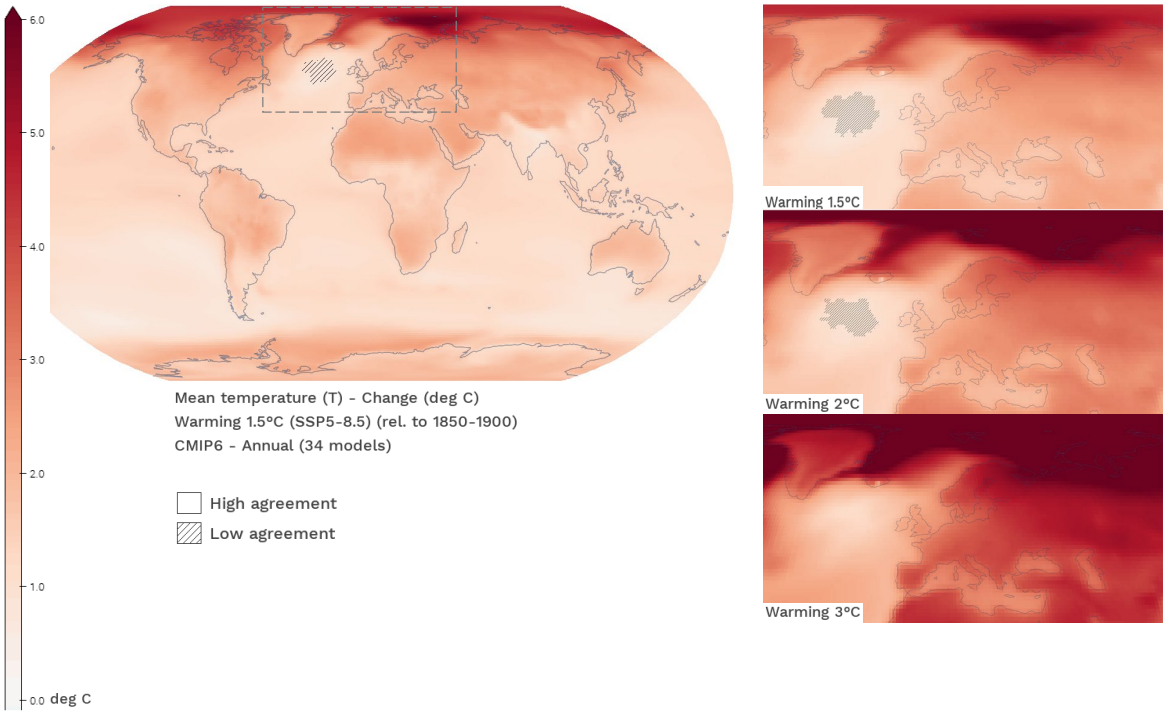

ABBILDUNG 3: VERÄNDERUNG DER MITTLEREN TEMPERATUR BEI EINER WELTWEITEN ERWÄRMUNG AUF 1,5 – 3 °C, IM VERHÄLTNIS ZUM VORINDUSTRIELLEN NIVEAU 1850 – 1900 NACH IPCC INTERACTIVE ATLAS.

B. Anthropogener Treibhauseffekt

Die Einflussnahme des Menschen auf den natürlichen Treibhauseffekt erfolgt in diesem Zusammenhang über die Änderung der Konzentration der genannten Treibhausgase in der Atmosphäre. Nach aktuellem Stand (2020, Messort: Zugspitze) bedeutet dies: 414 ppm CO_2, 1951 ppb CH_4, 333 ppb N_2O, in Summe führt dies zu einem CO_2-Äquivalent aller Gase von knapp 520 ppm CO_2. CO_2 trägt dabei knapp 66 %, CH_4 16 % und N_2O 6 % bei. Dabei führt die Erhöhung der Treibhausgasmenge dazu, dass ein noch größerer Anteil der von der Erdoberfläche emittierten Strahlung von der Atmosphäre zurückgestrahlt wird. Dies führt zu einer Wärmestrahlung von 3,14 W/m^2 und effektiven Erwärmung von knapp [6].

Nach Ansicht des IPCC geht dieser Sachverhalt mit einer Erhöhung der mittleren globalen Oberflächentemperatur einher [3]. Der anthropogene Treibhauseffekt kann somit abschließend als ein Eingriff des Menschen in das Klimasystem definiert werden, bei dem die zusätzliche Freisetzung von Treibhausgasen den natürlichen Treibhauseffekt verstärkt.

C. Nutzung von Klimamodellen zur Vorhersage

Grundsätzlich gilt, dass Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas und die dafür genutzten Modelle mit Unsicherheiten verbunden sind. Die Klimaprojektionen sind stets für einen längeren Zeitraum von mindestens 30 Jahren zu betrachten bzw. auszuwerten. Die Vielfältigkeit der Inputfaktoren und deren Variabilität – besonders bei Extremwertbetrachtungen – wird ansonsten nicht genügend Rechnung getragen.

Bisherige Ergebnisse globaler Klimaprojektionen zeigen, dass die Unsicherheit mit zunehmendem Projektionshorizont ansteigt, was sich auch bei den regionalen Klimamodellen für die gemäßigten Breitengrade widerspiegelt. Je nach Klimaparameter variieren die Unsicherheiten. Während niederschlagsbezogene Parameter, wie Menge und Häufigkeit, relativ unsicher sind, gelten temperaturbezogene Parameter als relativ sicher [8]. Nichtsdestotrotz stellen diese Modelle die aktuell einzige Möglichkeit dar, Klimaveränderungen vorherzusagen. Durch die Weiterentwicklung der künstlichen Intelligenz (KI) und Rechnerkapazitäten werden die Modelle zukünftig weiter optimiert werden.

III. KLIMAWANDEL – AUSWIRKUNGEN UND FOLGEN WELTWEIT UND IN DEUTSCHLAND

Laut den aktuellsten Berichten (2021 AR6) des Weltklimarats (IPCC) beobachten Wissenschaftler Veränderungen des Erdklimas in allen Regionen und im gesamten Klimasystem. Viele der beobachteten Klimaveränderungen sind seit Tausenden, wenn nicht Hunderttausenden von Jahren beispiellos, und einige der bereits in Gang gesetzten Veränderungen, wie der anhaltende Anstieg des Meeresspiegels, sind über Hunderte bis Tausende von Jahren unumkehrbar [9].

Auszüge des 6. Sachstandsbericht des IPCC (AR6), der 2022 veröffentlicht wird, sind bereits jetzt vorhanden. Ein Großteil der Merkmale des Klimawandels hängt direkt oder indirekt mit der globalen Erwärmung zusammen. Die Auswirkungen sind global gesehen sehr unterschiedlich. So ist beispielsweise die Erwärmung über Land stärker als im globalen Durchschnitt und in der Arktis mehr als doppelt so stark (siehe ABBILDUNG 3).

Die Auswirkungen der Temperaturentwicklungen bringen in verschiedenen Regionen eine Vielzahl von Veränderungen mit sich, die sich mit der weiteren Erwärmung noch verstärken werden. Dazu gehören Veränderungen bei Nässe und Trockenheit, bei Winden, Schnee und Eis, für Küstengebiete und Ozeane. Nachfolgend werden einige dieser Auswirkungen einzelner Klimaparameter detaillierter

beschrieben. Die Prognosemodelle ordnen Deutschland dabei in den Bereich West- und Zentraleuropa ein.

A. Temperatur

Der Bericht geht davon aus, dass die Klimaveränderungen in den kommenden Jahrzehnten in allen Regionen zunehmen werden. Bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C wird es immer häufiger zu Hitzewellen sowie längeren warmen und kürzeren kalten Jahreszeiten kommen. Bei 2 °C globaler Erwärmung würden Hitzeextreme häufiger kritische Toleranzschwellen für die Landwirtschaft und die körperliche Gesundheit von Betroffenen erreichen [1]. Erste Schätzungen zeigen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit, für eine globale Erwärmung über der Marke von 1,5 °C oder 2 °C in den nächsten Jahrzehnten bereits deutlich erhöht ist, sofern die Treibhausgasemissionen nicht sofort, rasch und in großem Umfang reduziert werden [9].

Um einen Anstieg der globalen mittleren Oberflächentemperatur (über 20 Jahre, kurz: GMST) von insgesamt 1,7 °C mit 67 %-iger Wahrscheinlichkeit zu umgehen, wurde ein verbleibendes weltweites CO_2-Budget bestimmt. Ab dem 01.01.2020 steht allen Ländern ein globales Gesamtrestbudget von 700 Gt CO_2 zur Verfügung. Eine Begrenzung des Anstiegs auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ist mit einem Restbudget von 400 Gt CO_2 ausgewiesen [10]. Weltweit betragen die aktuellen CO_2-Emissionen der Weltbevölkerung ca. 40 Gt/a.

Bezüglich der Temperaturentwicklung in Deutschland kann festgestellt werden, dass die Tageshöchsttemperaturen aktuell und zukünftig verstärkt zu höheren Extremwerten tendieren, während bei den Tagestiefsttemperaturen eine Entwicklung zu weniger extremen Werten zu beobachten ist. Auf der Grundlage von Beobachtungen sowie Messungen, die bis in das 19. Jahrhundert zurückgehen, zeigt sich in diesem Zusammenhang auch bei den Tagesmitteltemperaturen eine Entwicklung in Richtung höhere Werte. Damit geht auch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hitzetagen und -wellen einher [11].

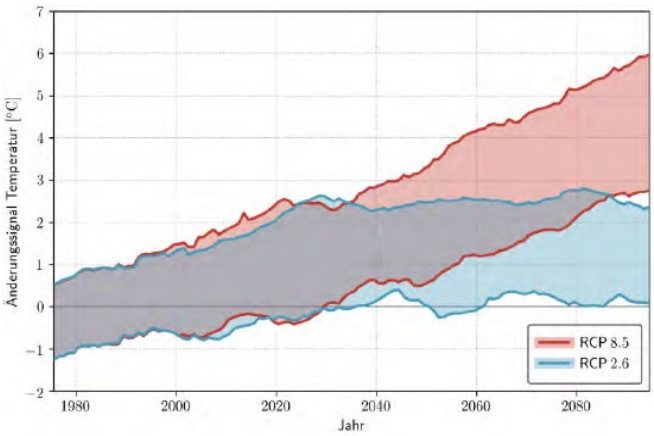

ABBILDUNG 4: PROGNOSE DER JAHRESMITTELTEMPERATURÄNDERUNG IN DEN SZENARIEN RCP 8.5 (37 KLIMAPROJEKTIONEN „WEITER-WIE-BISHER“ – WORST CASE) UND RCP 2.6 (15 KLIMAPROJEKTIONEN „KLIMASCHUTZ AB HEUTE“ – BEST CASE) FÜR DEUTSCHLAND [12].

Die mittlere Temperatur in Deutschland/Mitteleuropa wird mit hoher Sicherheit auch unabhängig vom künftigen Ausmaß der Erderwärmung zunächst schnell weiter steigen. Die ABBILDUNG 4 zeigt die Ergebnisse eines bis 2017 von mehreren deutschen Forschungsinstituten durchgeführten Projekts zum Thema Klimaprojektionen [12]. Hier wurden Klimaänderungssignale durch eine Vielzahl von regionalen Klimamodellen (RCM) anhand der beiden repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) in hoher räumlicher Auflösung modelliert. Diese zeigen bei RCP 2.6, also jener Variante, bei der die CO_2-Emissionen ab 2020 um 2 Gt/a fallen und 2100 komplett auf 0 zurückgehen, eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur zwischen 0,7 und 2,4 °C ($\overline{T}_{\mathrm{RCP2.6}} = 1{,}0$ °C). Dieses Szenario stellt den unteren Rahmen dar und ist nur zu erreichen, wenn direkt eine starke Einsparung an CO_2-Emissionen erfolgt. Realistisch betrachtet ist dies die unwahrscheinlichste Variante. Beim RCP 8.5, jener Variante, bei der die CO_2-Emissionen dem weiteren Verlauf des bisherigen Anstiegs folgen, wenn alle Hinweise zur Umsetzung des COP21 von Paris nicht befolgt werden, führen zu einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur zwischen 2,8 und 5,2 °C ($\overline{T}_{\mathrm{RCP8.5}} = 4{,}0$ °C).

Als Resultat werden die wärmsten Tage und Hitzeperioden zunehmen und künftig häufigere extreme Hitzewellen eintreten. Diese Hitzewellen (mindestens an drei aufeinanderfolgenden Tagen wird das 98. Perzentil der Tagesmaximalwerte erreicht) zählen aktuell zu den größten Naturkatastrophen in Europa. Sie forderten bereits 2003 knapp 30.000 Menschenleben [13]. Die Verbindung von hoher Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Strahlung und geringer Windstärke führt besonders bei Älteren und Kleinkindern in bebauungsdichtebedingten wenig belüfteten Großstädten zu hohen Gesundheitsbelastungen. Wie die Messung in Großstädten in ABBILDUNG 5 zeigt, nimmt die Häufigkeit dieser Hitzewellen kontinuierlich zu. Nach RCP 2.6 würde dies bis 2100 zu 3,7 zusätzlichen Tagen und nach RCP 8.5 zu 19,4 zusätzlichen Tagen, mit Temperaturen über 30 °C führen [12].

Allein bei einem Anstieg der GMST um 1,5 °C wird die Anzahl an Tagen mit über 35 °C im Vergleich zur Periode von 1995 – 2014 um 2,5 Tage größer. Bereits bei einer Erhöhung der GMST um 2 °C GMSTführt dies zu knapp 5 zusätzlichen Tagen (IPCC Interactive Atlas: CMIP6 - Days with TX above 35ºC (TX35) Change days - Warming 1.5°C SSP5-8.5 (rel. to 1995-2014) - Annual (27 models) Regions: Western and Central Europe). Diese ziehen u. a. weitere Extremereignisse wie Brände nach sich. Gleichfalls führt die konstante Erwärmung dazu, dass weniger Schnee fällt und geschlossene Schneedecken unterhalb von 1.500 m NHN seltener werden.

B. Niederschläge

Bei der zeitlichen Niederschlagsverteilung lässt sich eine Verschiebung der jährlichen Niederschlagsmenge vom Sommer in den Winter beobachten. Als gesichert gilt zudem, dass mit fortschreitendem Klimawandel die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten winterlicher Starkniederschläge und das generelle Hagelpotenzial zunehmen wird. An dieser Stelle muss jedoch auch festgehalten werden, dass Prognosen bezüglich der zukünftigen räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung von großen Unsicherheiten geprägt sind [1], [3].

Für Deutschland gilt Ähnliches. Die Mehrzahl der Projektionen aus [12] simulieren für RCP 8.5 eine Änderung der Niederschlagsmenge von -60 % bis +40 % und für RCP 2.6 -30 % bis +10 % für den Sommer. Im Winter liegen die Werte zwischen 0 bis +40 % (RCP 8.5) und -12 % bis +15 % (RCP 2.6). Der Winterniederschlag nimmt in fast allen Simulationen zu. Bei der Niederschlagsmenge weisen die Projektionen auf deutlich höhere Mengen bei Starkregen hin.

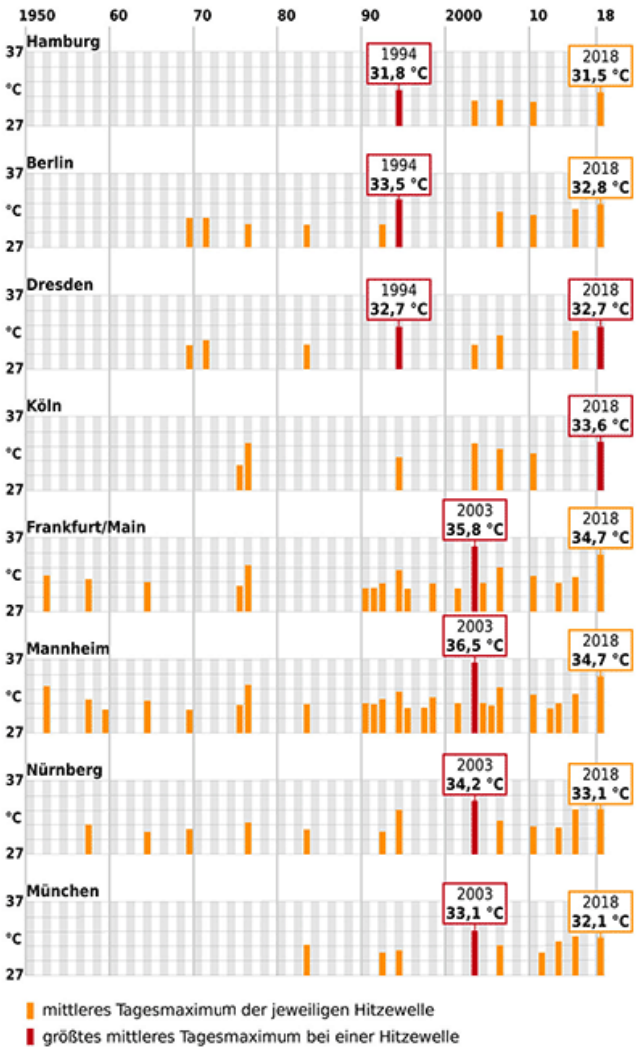

ABBILDUNG 5: MARKANTE HITZEWELLEN SEIT 1951 – 14-TÄGIGE HITZEPERIODEN MIT EINEM MITTLEREN TAGESMAXIMUM DER LUFTTEMPERATUR VON MIND. 30 °C FÜR AUSGEWÄHLTE GROßSTÄDTE [14].

C. *Starkwinde und Strahlung*

Hinsichtlich des Auftretens von Starkwindereignissen ist die Trendlage uneinheitlich und dementsprechend mit sehr großen Unsicherheiten verbunden. Die Ausprägung von starken Winden nimmt in der Zukunft jedoch tendenziell zu [1], [3]. Gleiches gilt für die kurzwellige Strahlung (Globalstrahlung) [12]. Dies gilt global wie national.

IV. AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS IN DER ENERGIEWIRTSCHAFT UND IM BESONDEREN BEI VERTEILNETZBETREIBERN

Der Bereich der Energiewirtschaft umfasst die inländische Bereitstellung von Primärenergieträgern, die Umwandlung, Übertragung und Verteilung sowie Speicherung und den Verbrauch von Energie. Auch der Energiemarkt, -handel und zugehörige Institutionen sind Teil der Energiewirtschaft.

Der Fokus der Auswirkungen des Klimawandels wird auf die Bereiche: Energiebedarf, Energieumwandlung, Energieübertragung und -verteilung (Infrastruktur), Energieversorgung und Verfügbarkeit von Primärenergieträgern gelegt. Eine grobe Übersicht zu den Auswirkungen findet sich in ABBILDUNG 6.

Im Mittelpunkt der Betrachtung in diesem Artikel steht der Bereich Übertragung und Verteilung mit dem Schwerpunkt auf Verteilnetze und die betreibenden Institutionen. Da einige Publikationen, wie [15], hier nur den Fokus primär auf Leitungssysteme der Höchst- und Hochspannungsebene legen, wird im Rahmen dieses Artikels der Betrachtungsbereich erweitert. Diese Erweiterung passiert auf Grundlage einer Zusammenarbeit mit der Stromnetz Hamburg GmbH (SNH), dem verantwortlichen VNB der Metropolregion Hamburg. In Zusammenarbeit mit SNH werden bis zum Ende des Jahres 2022 Analysen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Assets analysiert und mögliche Sicherheitsvorkehrungen und Anpassungsmaßnahmen erarbeitet.

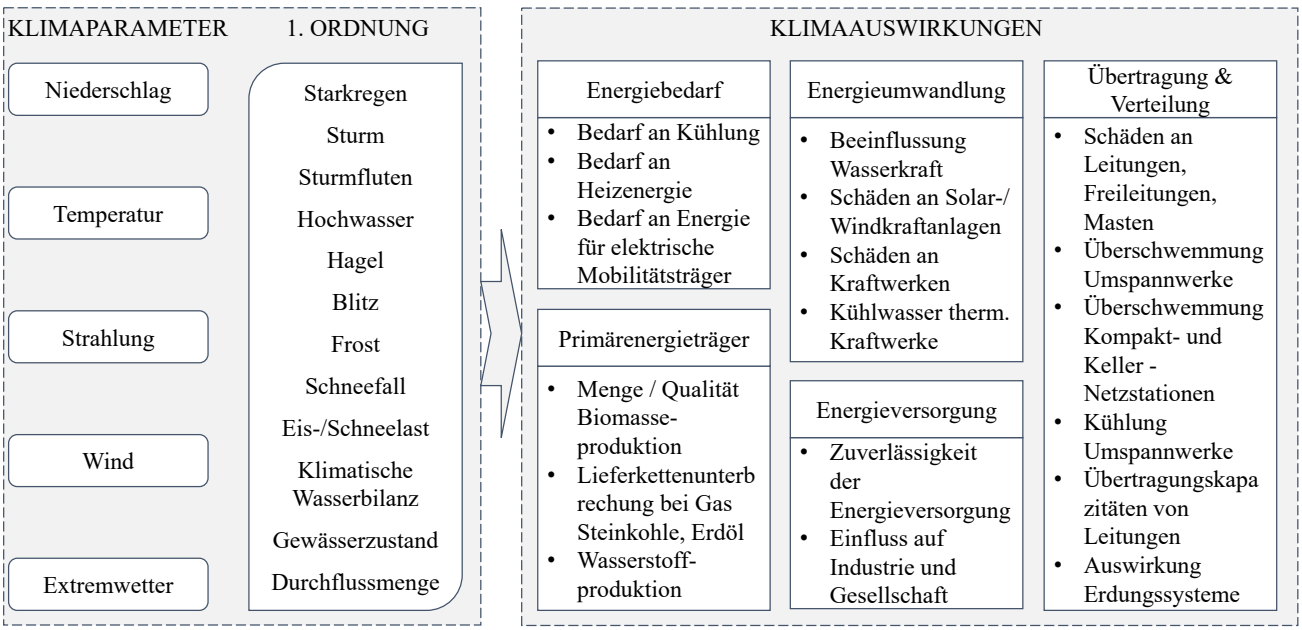

ABBILDUNG 6: DARSTELLUNG DER WIRKUNGSKETTE – BEGINNEND BEI KLIMAPARAMETERN, ÜBER RESULTIERENDE PARAMETER 1.ORDNUNG BIS HIN ZU AUSWIRKUNGEN DER KLIMAVERÄNDERUNGEN AUF DIE ENERGIEWIRTSCHAFT, ANGELEHNT AN [15].

Da SNH einer der ersten VNB in Deutschland ist, der die Auswirkungen des Klimawandels als zukünftige Herausforderung erkannt hat und bisher auch forschungsseitig nur eine geringe Anzahl an Publikationen in diesem Gebiet existieren, wird auf Entwicklungen in anderen Ländern, wie den USA oder afrikanischen Staaten geschaut, um Entwicklungstendenzen und Forschungsergebnisse für Mitteleuropa ableiten zu können. Hierzu kann beispielhaft auf [16] verwiesen werden. Gleichzeitig sind die urbanen Räume besonders betroffen von Temperatur- und Extremereignissen, da sie neben hohen Bevölkerungsdichten auch Mikroklimaerscheinungen besonderen Ausmaßes aufweisen. Speziell die nächtliche Überwärmung der bodennahen Luftschichten (städtische Hitzeinseln, beispielhaft ABBILDUNG 7) sowie der Einfluss auf Strahlungs- und Wärmebilanzen seien hier hervorgehoben.

Da in der Verteilnetzebene der Freileitungsanteil im Vergleich zum Übertragungsnetz gering ist, sind direkte Auswirkungen wie die Reduktion der Leitungsfähigkeit bei bspw. häufig auftretenden warmen Temperaturextremen und Hitzewellen oder Schäden durch Stürme mit unmittelbarer Beschädigung von beispielsweise Masten und Kabeln eher selten. Daher standen bisher eher Übertragungsnetze aufgrund der gegebenen Klimaexposition im Fokus, wie beispielhaft in [17]. Indirekte Auswirkungen, die auf Grundlage langfristiger Einflüsse auf die Verteilnetze wirken, wurden bisher nicht im gleichen Maße analysiert. Dazu zählen u. a.:

- Stärkere Extremwetterereignisse (Hitze, Sturm, Niederschläge, Überflutungen, etc.)
- Veränderung der Bodenfeuchtigkeit/-temperatur
- Veränderung der Aufnahmefähigkeit von Böden und nicht versiegelten Räumen
- Verstärkung von Hitzeinseln und Reduzierung von Frischluftzugängen speziell im urbanen Raum (siehe ABBILDUNG 7)
- Veränderung des Grundwasserspiegels
- Anstieg des Meeresspiegels und Temperaturanstieg des Wassers

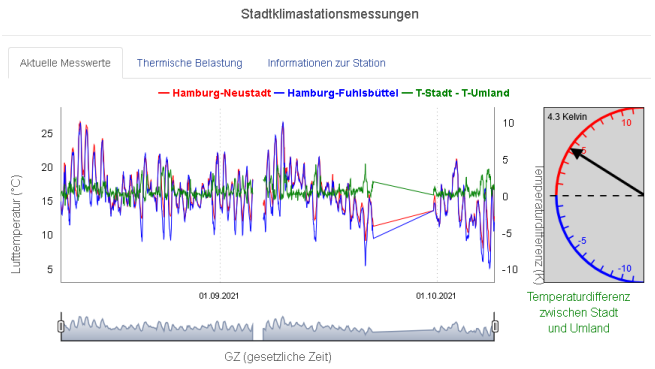

ABBILDUNG 7: DARSTELLUNG DER STÄDTISCHEN WÄRMEINSELINTENSITÄT – LUFTTEMPERATUR STADT (ROT IN °C) GEGENÜBER DER LUFTTEMPERATUR UMLAND (BLAU IN °C) = DIFFERENZTEMPERATUR (GRÜN IN °C); STÜNDLICHE TEMPERATURDIFFERENZ WIRD IM ZEIGERDIAGRAMM DARGESTELLT [18].

Um die Auswirkungen dieser und anderer langfristiger Tendenzen abschätzen zu können, wird der Fokus in dieser Arbeit auf ausgewählte Assetklassen des Verteilnetzes gelegt. Die Grundlage der Auswahl beruht auf den von SNH als relevant aufgezeigten Assets im Rahmen des Projektes. Hierzu zählen Erdkabel und Erdungssysteme. Die Analyse weiterer Assets, Umspannwerke und untergeordnete Netzstationen ist im Verlauf vorgesehen. Alle in diesem Artikel angeführten Anmerkungen und Problemstellungen werden daher auf urbane Räume an Küsten bezogen. Auch die speziell in diesem Jahr aufgetretenen Wetterextreme wie hochwasserbedingte Überschwemmungen in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz zeigen die unbedingte Relevanz dieser Betrachtungen.

V. KLIMAWANDELAUSWIRKUNG AM BEISPIEL VON BETRIEBSMITTELN

A. *Kabelsysteme*

Der aufgezeigte prognostizierte Klimawandel mit den dadurch eintretenden Veränderungen z. B. bei der Anzahl der Eis- und Frosttage sowie die Verlängerung der Vegetationsperiode sowie auch temporäre Wetterphänomene, werden nach bisherigen Erwartungen Einfluss auf die Bodenfeuchtigkeit und damit verbunden auch auf die Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit haben.

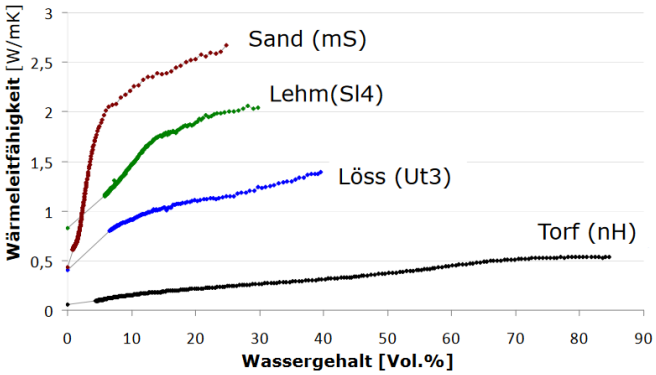

ABBILDUNG 8: WÄRMELEITFÄHIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON BODENTYP- UND WASSERGEHALT [19].

Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit sind wesentliche Eingangsgrößen bei der Auslegung von Kabelsystemen, besonders hinsichtlich des Abstands und Leiterquerschnitts. Einflüsse auf einige ausgewählte Böden sind in ABBILDUNG 8 dargestellt. Der Einfluss von Boden- und Standortbedingungen ist allgemein bekannt und wird in Berechnungsverfahren zur Netzplanung bzw. der Strombelastbarkeit berücksichtigt (u. a. nach DIN VDE 0276-1000 und DIN VDE 0276-620). Dabei werden verschiedene Modelle angewandt, eines der bekanntesten ist das Zweischichtenmodell [20], [21]. Wie ABBILDUNG 9 zeigt, werden bei stationärer Betrachtung bei unbekannten Böden grundsätzlich partielle Austrocknungen mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten λ_F in einem meist kleinen Bereich d_T um das Kabel angenommen.

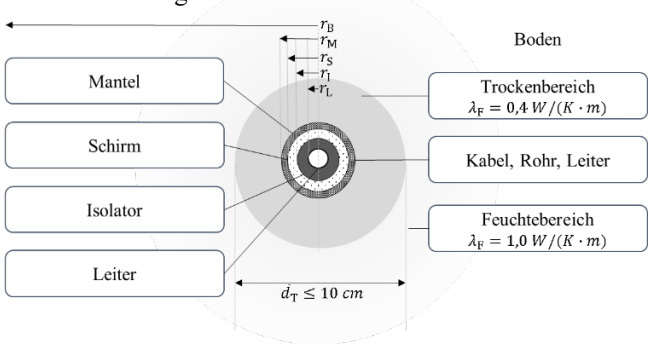

ABBILDUNG 9: DARSTELLUNG DES ZWEISCHICHTENMODELLS UND DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT DER BEIDEN ERDSCHICHTEN λ_F .

Transiente Bodenaustrocknungen sind mittels eines Systems gekoppelter Differentialgleichungen zu beschreiben [22], für die vorliegende Betrachtung jedoch zu komplex.

Die Verlustleistung/-wärme eines Kabels P_V wird u. a. aus den Leiterverlusten P_L ermittelt. Diese sind nach Formel (1) definiert und lassen sich aus dem Leiterwiderstand R_L bzw. dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ_{spez} und dem effektiven Leiterquerschnitt A_{eff} ermitteln.

$$P_L = R_L \cdot I^2 = I^2 \cdot \rho_{spez} \cdot A_{eff} \quad (1)$$

Je nach Kabeltyp und -material bzw. -temperatur verändert sich die Verlustleistung. Hinzu kommen dielektrische Verluste der Isolationsschicht(en) P_I sowie Schirmverluste P_S. Letztere können durch die Kenntnis des Schirmwiderstands R_S, des im Schirm induzierten Schirmstromflusses I_S und des effektiven Leiterquerschnittes A_S nach Gleichung (2) ermittelt werden. Mithilfe eines konstanten Proportionalitätsfaktors von $0{,}15 \cdot I_S$ wird dies vereinfacht nach Formel (3) berechnet.

$$P_S = R_S \cdot I_S^2 = I_S^2 \cdot \rho_{spez} \cdot A_S \quad (2)$$

$$P_S = R_S \cdot (I \cdot 0{,}15)^2 \quad (3)$$

$$P_V = P_L + P_I + P_S \quad (4)$$

Vereinfacht man nun die Annahme zum Aufbau eines Kabels auf vier Materialschichten, den Leiter, die Isolierung, den Schirm und den Mantel, so kann die Leitertemperatur T_L unter Verwendung der spezifischen thermischen Widerstände σ_{th}, der Radien r (siehe auch ABBILDUNG 10) und der Bodentemperatur T_B, nach Formel (5) berechnet werden.

$$T_L = \frac{1}{2\pi}\left[\left(P_L + \frac{P_I}{2}\right)\sigma_{th,I} \ln\frac{r_I}{r_L} + P_V \sigma_{th,M} \ln\frac{r_M}{r_S} + P_V \sigma_{th,B} \ln\frac{r_B}{r_M}\right] + T_B \quad (5)$$

Da steigende Bodentemperaturen, geringere Wassergehalte und damit niedrigere Wärmeleitfähigkeiten zu höheren Verlustleistungen führen, wird direkt die transportierbare Leistung reduziert und langfristig auch die Lebensdauer des Kabels verringert. Daher muss der Einfluss der klimatischen Bedingungen auf den Boden im Projekt untersucht werden.

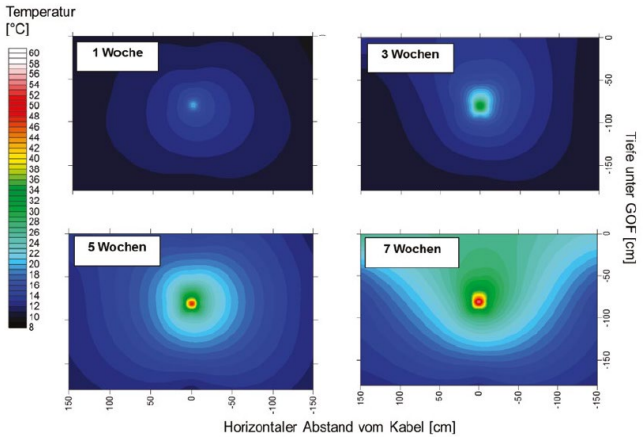

ABBILDUNG 10: ENTWICKLUNG DES TEMPERATURFELDES INNERHALB VERSCHIEDENER ZEITRÄUME IM BODEN [19].

B. Erdungsanlagen

Die Relevanz der Klimaveränderungen für VNB soll anhand eines weiteren Beispiels näher erläutert werden, um den möglichen entstehenden Aufwand bei der Klimawandelfolgenbearbeitung einschätzen zu können.

Erdungsanlagen von elektrischen Energieverteilungssystemen dienen vornehmlich dem Schutz von Mensch und Tier [23]. Aus der VDE 0101 sind Werte für die maximalen Berührungsspannungen im Falle eines Erdfehlers zu entnehmen, die durch Anlagenbetreiber im Rahmen der Planung von Anlagen Berücksichtigung finden müssen. Die ABBILDUNG 11 zeigt die maximalen zulässigen Berührungsspannungen U_T über die Dauer eines Fehlers bis zur Abschaltung t_F für Mensch oder Tier.

Bei einer Fehlerdauer über 10 s ist nach DIN EN 50522/ DIN VDE 0101-2 ein Wert von 85 V zu verwenden. Die Erdungsanlagen haben somit in erster Linie die Funktion, Fehlerströme gegen Erde abzuleiten. Durch die Ableitung des Fehlerstroms entsteht bedingt durch den Erdwiderstand ein Potenzialunterschied, der in ABBILDUNG 12 vereinfacht über einen Halbkugelerder dargestellt ist. Ersichtlich ist, dass die beiden zu beachtenden Spannungen, d. h. die Schrittspannung U_S und Berührungsspannung U_T, jeweils auf den Potenzialunterschied über einen Weg von 1 m bezogen werden.

Anders als in ABBILDUNG 12 werden in tatsächlichen Schaltanlagen Maschenerder mit Maschen von maximal 10 × 50 m verbaut, wobei die verwendeten Kupferbänder in einer Tiefe von 0,8 m verlegt werden. Am Rand des Erders in ABBILDUNG 12 tritt die höchste Spannung U_E auf. Die Umzäunung der technischen Anlagen wird aus diesem Grund immer außerhalb des letzten Erdungsbandes errichtet.

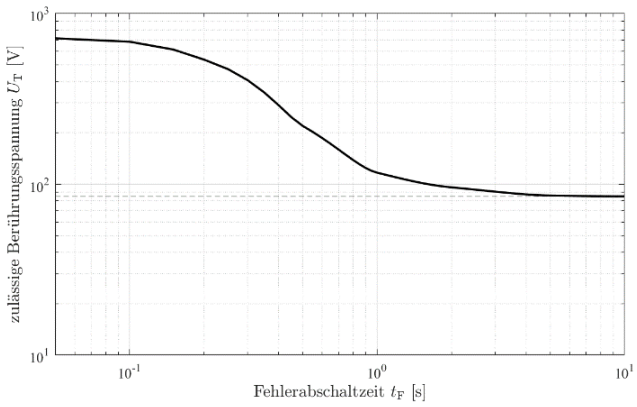

ABBILDUNG 11: EFFEKTIVWERTE DER ZULÄSSIGEN BERÜHRUNGSSPANNUNG BEI ERDFEHLERN IN ABHÄNGIGKEIT ZUR FEHLERABSCHALTZEIT GEM. VDE 0101-2.

Diese Erdungsspannung ist abhängig vom Fehlerstrom, der über Erde abgeleitet wird, als auch vom Durchmesser D des Maschenerders der Anlage. Formel (6) zeigt diesen Zusammenhang.

$$U_E = I_E \cdot \frac{\rho_E}{2 \cdot D} \quad (6)$$

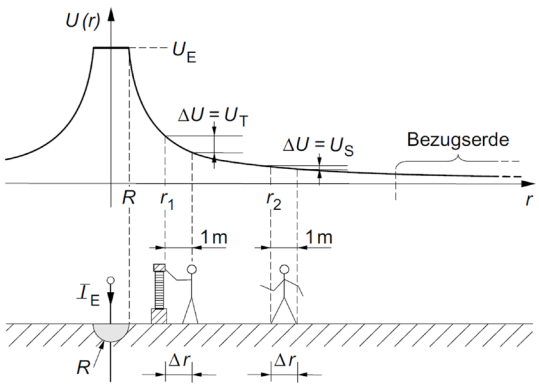

ABBILDUNG 12: SPANNUNGSVERLAUF UM HALBKUGELERDER UND BERÜHRUNGSSPANNUNG U_T SOWIE SCHRITTSPANNUNG U_S FÜR MENSCHEN BEI EINGEPRÄGTEM ERDUNGSSTROM I_E [23].

Ebenfalls ist der spezifische Erdwiderstand ρ_E des Erdreiches bei der Berechnung der maximalen Erdungsspannung zu berücksichtigen. Dieser Wert ist maßgeblich von der Bodenfeuchte und der Zusammensetzung der Erde abhängig [24]. Bereits jetzt ist ersichtlich, dass hohe spezifische Erdwiderstände durch große Durchmesser der Maschenerder ausgeglichen werden müssen. An der Schaltanlage in ABBILDUNG 13 soll die dauerhafte Veränderung der Bodenverhältnisse und ihre Auswirkungen auf die Berührungsspannungen betrachtet werden. Die abgebildete Anlage ist über das 110 kV Freileitungsnetz angebunden und versorgt drei Erdkabel. Aufgrund der Erdseile der Freileitungsanlage und der Erderwirkung der Erdkabel findet eine weitere Entlastung des Maschenerders der Schaltanlage statt. Die zugehörigen anzusetzenden Impedanzen Z_∞ der Kabel sollen mit $Z_{\infty,K} = 1\ \Omega$ und die der Freileitung mit $Z_{\infty,F} = 2\ \Omega$ angenommen werden. Hierbei soll erwähnt werden, dass diese Impedanzen ebenfalls vom spezifischen Erdwiderstand des umgebenden Erdreiches abhängen, dessen Berücksichtigung hier aber entfällt.

Das sich ergebende Ersatzschaltbild ist in ABBILDUNG 14 dargestellt. Dabei gibt der Reduktionsfaktor r den Anteil des Erdungsstroms an, der über Erde und nicht über die Erdseile der Freileitung geleitet wird. Ein üblicher Wert für den Reduktionsfaktor ist $r = 0{,}65$ [23]. Erfahrungsgemäß ist davon auszugehen, dass sich dieses Verhältnis bei einem Fehlereintritt nach mehr als 10 Masten einstellt, wovon in diesem Beispiel ausgegangen werden soll.

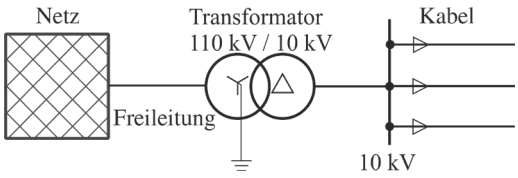

ABBILDUNG 13: BETRACHTETE SCHALTANLAGE MIT FREILEITUNG UND DREI ERDKABELN.

Der Erdwiderstand ergibt sich somit aus einer Parallelschaltung der Widerstände, wie in Formel (7) angegeben. Die Erdungsspannung wird nun als feste Größe angenommen, da die Erdungsspannung als sicherheitsrelevante Größe in die Betrachtungen einfließen muss. Nach ABBILDUNG 14 ist bei einer Fehlerabschaltzeit von $t_F = 0{,}1\ s$ eine maximale Erdspannung $U_E = 650\ V$ einzuhalten. Bei einem maximalen Fehlerstrom $I_E = 5000\ A$ entspricht dies einem Erdwiderstand $R_E = 0{,}2\ \Omega$, der somit als konstant angenommen werden muss, um die Vorgaben zur Berührungsspannung gem. ABBILDUNG 11 einzuhalten.

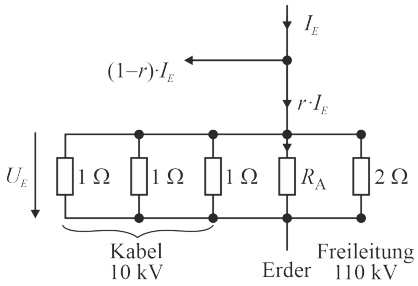

ABBILDUNG 14: ERSATZSCHALTBILD DER BETRACHTETEN SCHALTANLAGE.

$$R_E = R_A \parallel 1\ \Omega \parallel 1\ \Omega \parallel 1\ \Omega \parallel 2\ \Omega \tag{7}$$

$$R_A = \frac{\rho_E}{2 \cdot D} \tag{8}$$

$$D = \frac{\rho_E \cdot (Z_G \cdot R_E)}{2 \cdot Z_G \cdot R_E} \tag{9}$$

mit

$$Z_G = \frac{Z_{\infty,K} \cdot Z_{\infty,F}}{Z_{\infty,K} + 3 \cdot Z_{\infty,F}} \tag{10}$$

Mithilfe der Formel (8) zur Berechnung des Ausbreitungswiderstandes R_A ergibt sich Formel (9) zur Berechnung des Durchmessers des Maschenerders D in Abhängigkeit vom spezifischen Erdwiderstand ρ_E. Das Resultat dieser Betrachtungen ist in ABBILDUNG 15 dargestellt. Zu sehen ist, dass sich ein linearer Zusammenhang der Veränderungen zwischen dem spezifischen Erdwiderstand und dem Maschendurchmesser ergibt. Eine dauerhafte Veränderung des spezifischen Erdwiderstands führt somit zu der Notwendigkeit einer Vergrößerung der Maschenerderausdehnung. Insbesondere in städtischen, dicht bebauten Gebieten kann dies problematisch sein, da die Geländeverfügbarkeit nicht beliebig hoch ist. Neben der Ergänzung um weitere Maschen wäre die weitere Absenkung von Tiefenerdern in tiefere, besser leitende Erdschichten möglich [23].

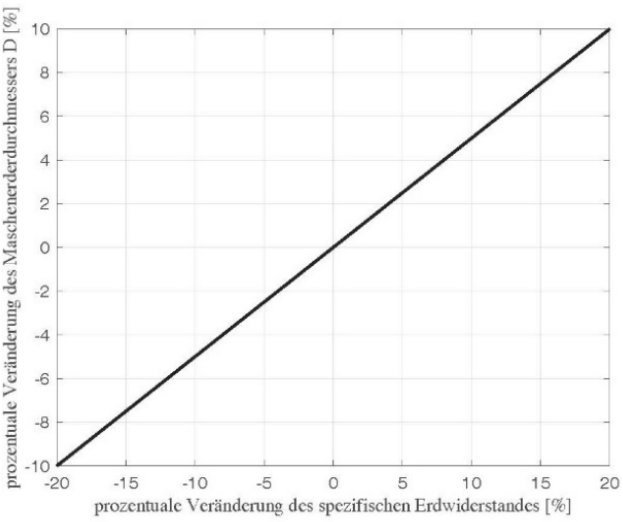

ABBILDUNG 15: NOTWENDIGE VERÄNDERUNG DES MASCHENERDERDURCHMESSERS D BEI EINER DAUERHAFTEN VERÄNDERUNG DES SPEZIFISCHEN ERDWIDERSTANDS ρ_E UNTER EINHALTUNG EINER MAXIMALEN ERDSPANNUNG $U_E = 650\ V$.

Unklar ist noch, ob sich bei einer Austrocknung des Bodens der Blitzstrom, der sich auf die Erde und das Netz aufteilt – und verstärkt durch die Austrocknung über das Netz läuft – zu höher belasteten Betriebsmitteln führt. Diese Auswirkungen sollten im Bereich der Erdungssysteme über das Projekt analysiert und geklärt werden.

VI. Zusammenfassung

Die Folgen des Klimawandels lassen bereits jetzt deutlich werden, dass zukünftig der Anpassungsdruck auf kritische Infrastrukturen weiter steigen wird. Dies betrifft auch die Stromnetze, beispielsweise sind bereits jetzt verschiedene Assets der Verteilnetze vom klimatischen Wandel betroffen. Auch wenn weiterhin Unsicherheiten in Bezug auf genaue regionale Prognosen bestehen, wird anhand von Klimamodellen verdeutlicht, dass extreme Wetterlagen in ihrem Aufkommen weiter zunehmen werden.

Insgesamt drohen große Problemlagen, wie die Zerstörung von überirdischen Energieinfrastrukturen, speziell Masten und Leitungen durch starke Stürme, häufiger aufzutreten. Auch bei Verteilnetzen mit ihrem vergleichsweise geringen Anteil an freistehenden Betriebsmitteln bzw. Freileitungen wird das mögliche Auftreten von Dürren und extremen Hitzetagen immer relevanter. Hinzu kommt eine weiter anhaltende Urbanisierung, die die Netzbetreiber in großen Städten vor zusätzliche Herausforderungen stellt. So fördern Wärmeinseln in Städten, bedingt durch die steigende Bebauungsdichte und zunehmende Versiegelung, die Speicherung von Hitze in hochverdichteten Räumen. Fallende Grundwasserspiegel und höhere Lufttemperaturen führen zu trockeneren und wärmeren Böden. Gleichwohl kann es häufiger zu kurzfristigen Starkregenereignissen und Überschwemmungen kommen, die von diesen Böden dann nicht mehr aufgenommen werden können. Gerade in Städten spielt hier auch die Problematik der versiegelten Flächen eine entscheidende Rolle.

Im vorliegenden Fall wurden insbesondere die Einflüsse der klimatischen Veränderungen auf erdverlegte Leitungen und Erdungssysteme dargestellt und mögliche Auswirkungen aufgezeigt. Weitere Einflüsse, zum Beispiel auf Umspannwerke und untergeordnete Netzstationen, werden zusammen mit möglichen Lösungen und Anpassungs-strategien in Kooperation mit SNH untersucht und im zu erstellenden Projektabschlussbericht dokumentiert. Speziell die Forschung im Bereich des spezifischen Einflusses von Klimawandelauswirkungen ist noch ausbaufähig. Mögliche Forschungszweige wie die Auslegungsoptimierung von erdverlegten Leitungen anhand bodenspezifischer Eigenschaften oder die energieeffiziente Gebäudeoptimierung von umbauten Umspannwerken stehen möglicherweise zukünftig verstärkt im Forschungsfokus. Gleiches gilt für die Kraftwirkungen auf Kabel aufgrund der Ausdehnung bei Wärmeentwicklung und verschiedenen Bodenfeuchtigkeiten (sowie den Zusammenhang zwischen Verlustleistung und lokaler Bodenaustrocknung). Mögliche weitere Forschungs-aspekte könnten die erhöhte Anfälligkeit für Muffenfehler, d. h. das Herausziehen der Kabel aus den Muffen bei trockenen oder feuchten Böden oder die grundsätzlichen Bodenverschiebungen beim Trocknen und Befeuchten (abhängig vom Bodentyp) sein.

Literatur

[1] Z. Zhongming; L. Linong; Z. Wangqiang; & L. Wei: AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Cambridge University Press. In Press. 2021.

[2] L. Bieritz: Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft: Welche Folgen hat die Erwärmung auf die Energieerzeugung und -verteilung? S.7, GWS Discussion Paper, No. 2015/7, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS), Osnabrück, 2015.

[3] G. P. Brasseur; D. Jacob; S. Schuck-Zöller: Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

[4] H. Goosse: Climate system dynamics and modeling. Cambridge University Press, 2015.

[5] H. Behr: Numerische Klimamodelle - Was können sie, wo müssen sie verbessert werden? Teil I: Das Klimasystem der Erde, Schweinfurt: Deutscher Wetterdienst, 2002.

[6] "THE NOAA ANNUAL GREENHOUSE GAS INDEX (AGGI)" [Online]. URL: https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html [Zugriff 19.10.2021].

[7] "Treibhauseffekt", [Online]. URL: https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Treibhauseffekt [Zugriff am 25. Aug. 2021].

[8] R. J. Brienen; L. Caldwell; L. Duchesne; et al.: Forest carbon sink neutralized by pervasive growth-lifespan trade-offs. Nature communications, 11(1), 2020.

[9] "Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC" [Online]. URL: https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/, [Zugriff 29.09.2021].

[10] "IPCC-Bericht: Klimawandel verläuft schneller und folgenschwerer" [Online], URL: https://www.umweltbundesamt.de/themen/ipcc-bericht-klimawandel-verlaeuft-schneller, [Zugriff: 29.09.2021].

[11] Deutscher Wetterdienst: Nationaler Klimareport 2016. Klima-Gestern, heute und in der Zukunft. Offenbach, 2016.

[12] H. Hübener; K. Bülow; C. Fooken; et al.: ReKliEs-De Ergebnisbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). doi:10.2312/WDCC/REKLIESDE_ERGEBNISBE-RICHT, 2017.

[13] P. A. Stott; D. A. Stone; M. R. Allen: Human contribution to the European heatwave of 2003, NATURE, Vol. 432, 2004.

[14] "Wetter- und Klimalexikon - Hitzewelle" [Online], URL: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852, [Zugriff: 30.09.2021].

[15] M. Buth; W. Kahlenborn; J. Savelsberg; et al.: Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Clim Chang, 24, 2015.

[16] J. O. Ebinger: Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation. World Bank Publications, 2011.

[17] M. Groth; J. Cortekar: Die Relevanz von Klimawandelfolgen für Kritische Infrastrukturen am Beispiel des deutschen Energiesektors (No. 335). Working Paper Series in Economics, 2015.

[18] "Wärmeinsel -Stadtklimastationen" [Online], URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/sksm/sksm_node.html, [Zugriff: 14.10.2021].

[19] G. Wessolek; S. Trinks: Das CableEarth-Verfahren zur ökologischen Bewertung und Optimierung der Strombelastbarkeit erdverlegter Energiekabel. In Boden und Energiewende (pp. 39-59). Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.

[20] H. Brakelmann: Einfluß eines natürlichen Temperaturgradierten im Boden auf die Belastbarkeit von Energiekabeln. Elektrizitätswirtschaft Jg. 81, 1982.

[21] H. Brakelmann: Belastbarkeiten der Energiekabel – Berechmethoden und Parameteranalysen – VDE Verlag Berlin, 1985.

[22] A. L. Snijders; G.U. Groeneveld; J. Vermeer; et al.: Moisture migration and drying-out in sand around heat dissipating cables and ducts. KEMA/HEIDEMU Report, 1981.

[23] K. Heuck; K.D. Dettmann; D. Schulz: Elektrische Energieversorgung, 9. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013, ISBN 978-3-8348-1699-3 (Print-Ausgabe), ISBN 978-3-8348-2174-4 (eBook), 2013.

[24] W. Schrank: Schutz gegen Berührungsspannungen: Schutzmaßnahmen gegen elektrische Unfälle durch Berührungsspannungen in Niederspannungsanlagen, Reprint 2019 edn, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Berlin, Boston, 2019.