

Multivariate Analysemethode zur Bewertung der Einflüsse des Klimawandels auf umbaute Umspannwerke

Maik Plenz*, Felix Heider, 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 wirken sich sowohl auf die Umwelt als auch auf die Strukturen der Energielogistik aus. Die vielfältigen Einflussbereiche haben direkte Auswirkungen auf Deutschland als Flächenland allgemein und im Speziellen auch auf die Großstädte. Klimatische Faktoren wie Temperaturerhöhungen, Niederschlagsveränderungen oder der Anstieg des Meeresspiegels wirken sich besonders stark aus. Speziell in der elektrischen Infrastruktur und hier den Energienetzen bedarf es einer umfassenden Analyse, um mögliche Risikobereiche zu identifizieren und resilienter zu gestalten. In diesem Artikel werden klimatische Entwicklungen und Zukunftsprognosen erläutert. Der Fokus liegt auf der Vorstellung einer Methode zur Analyse der Einflüsse thermischer Entwicklungen in Umspannwerken. Dies dient als Grundlage eines Forschungsprojektes für die Stromnetz Hamburg GmbH (SNH), bei welchem die Betroffenheit der Verteilnetze und die techno-ökonomischen Auswirkungen und Anpassungsoptionen auf wichtige Assets untersucht werden.

Stichworte – Klimawandel, Stromnetze, Verteilnetze, Umspannwerke

NOMENKLATUR

AR	Assessment report
COP	UN-Klimakonferenz (engl.: UN Climate Change Conference)
GHG	Greenhouse gas (engl.: Treibhausgas)
GIS	Geo-Informationssystem
IPCC	Weltklimarat (engl.: Intergovernmental Panel on Climate Change)
RCP	Repräsentative Konzentrationspfade (engl.: Representative Concentration Path)
$I_{r-T1/T2}$ in kA	Bemessungsstrom
S_r in kVA / MVA	Bemessungscheinleistung des Transformators
P_{EB} in kW	Leistung Eigenbedarfstransformator
$P_{Cu}(t)$ in kW	Kupferverluste (lastabhängig)

$P_V(t)$ in kW	Gesamte Verlustleistung Kupfer und Eisenverluste des 110/10 kV Transformators
$P_{VEB}(t)$ in kW	Gesamte Verlustleistung Kupfer und Eisenverluste des Eigenbedarfstransformators
$T_A(t)$ in °C	Temperatur außerhalb des Umspannwerkes
$\varphi_A(t)$ in %	Relative Luftfeuchtigkeit an der Außenwand des Umspannwerkes
$E_A(t)$ in W/m ²	Bestrahlungsstärke an der Außenwand des Umspannwerkes
$V_A(t)$ in m/s	Windgeschwindigkeit an der Außenwand des Umspannwerkes
U_{nN} in V	Netzennspannung

I. EINLEITUNG

Gemäß dem dritten Teil des 6. Sachstandsberichtes (AR6) des Weltklimarats (IPCC), welcher am 04. April 2022 veröffentlicht wurde, gehen auch die optimistischen Zukunftsszenarien davon aus, dass die globalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 weiter stark ansteigen werden. Die bei der UN-Klimakonferenz (COP26) in Glasgow angekündigten national festgelegten Klimaschutzbeiträge halten die Erwärmung im Laufe des 21. Jahrhunderts nicht im anvisierten 1,5 °C Ziel. Die Begrenzung der Erwärmung auf unter 2 °C hängt, von einer raschen Beschleunigung der Anstrengungen zur Emissionsminderung spätestens nach 2030 ab. Als Ursache dieser Entwicklung kann eindeutig die Konzentration von Greenhouse gas (GHG) in der Atmosphäre identifiziert werden. Vor allem die kurzfristige Zunahme in den letzten 50 Jahren ist auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen [1]. Insbesondere Infrastrukturen wie technische Assets der Energieversorgung sind bei einer Veränderung der klimatischen Zustände und Einflüsse zu analysieren. Speziell kritische Infrastrukturen wie das Energienetz gelten als maßgeblich zur Erhaltung der Stabilität des Gemeinwesens. Ausführungen zu den Einwirkungen des Klimawandels auf verschiedene Bereiche in der Energiewirtschaft finden sich u. a. in [2]. Nachdem in [2] bereits erdgebundene Kabelsysteme und Erdungssysteme auf ihre Beeinflussungen durch den Klimawandel analysiert wurden, wird in diesem Artikel auf ein weiteres relevantes

Asset eingegangen. Die Umspannwerke der 110/10 kV-Ebene sind die Dreh- und Angelpunkte der Stromversorgung und somit als besonders schützenswert anzusehen.

Im Fokus dieses Artikels steht nicht die Betrachtung eines einzelnen Unternehmens und dessen Vulnerabilität, die durch den anthropogenen Klimawandel entstehen. Vielmehr analysiert der Artikel im ersten Abschnitt die Klimamodelle und Szenarien nach dem 5. und 6. Klimaschutzbericht des IPCC, um Klimaparameter verständlich zu machen und auch für mögliche Entwicklungen und Ensembles zu sensibilisieren. Die Erläuterung der komplexen Modelle, Annahmen und Bandbreiten möglicher Entwicklungen fördert die Kenntnisse zum Verständnis möglicher Folgen des Klimawandels. Darauf folgend wird ein multivariater Analyseansatz vorgestellt, der es Betreibern von umbauten Umspannwerken möglich macht, den Einfluss externen Faktoren, wie Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit auf Transformatoren im Inneren des Gebäudes zu bewerten. Hier ist insbesondere die Innentemperatur und damit die Lebensdauer, Ausfallwahrscheinlichkeit und der Wirkungsgrad von Veränderungen betroffen. Abschließend wird die Interpretation der Ergebnisse eines fiktiven Beispiels gezeigt. Der gesamte Artikel beruht auf einer Zusammenarbeit mit der Stromnetz Hamburg GmbH. Deren Ziel ist es, mögliche Einflüsse des anthropogenen Klimawandels auf einzelne Assets des Verteilnetzbetreibers aufzuzeigen, um in diesem Zusammenhang die theoretische Grundlage für technische Anpassungsmaßnahmen sowie die zugehörigen Kostenkalkulationen zu legen.

Die Zielstellung dieser Arbeit ist die Analyse des Einflusses der Umgebungstemperatur zu Energiemenge bzw. Wärmeentwicklung des jeweiligen Betriebsmittels sowie die Darstellung des Zusammenwirkens verschiedener Wetterparameter und ihrer Änderungen in Bezug auf die Gebäudeinnentemperatur an den Trafos, abhängig von deren Lastsituation.

II. KLIMAMODELLE DES 5. UND 6. SACHSTANDSBERICHTES DER IPCC

Insbesondere ein Verständnis der Klimapfade, ihrer Grenz- und Definitionsbereiche und deren Eigenschaften ist notwendig, um sowohl den Aufbau von Modellen als auch die Entwicklung von Prognosen abschätzen zu können. Die wichtigsten Szenarien und Prognosepfade werden in den Klimaberichten des IPCC veröffentlicht. Hierzu zählen die Ergebnisse des 5. und 6. Sachstandsberichtes der IPCC, inklusive der neusten Ergebnisse aus den Arbeitsgruppen [1], [3]. Da bereits in einer vorherigen Veröffentlichung [2] intensiv auf den Aufbau und die Ermittlung von Klimamodellen eingegangen wurde, wird nachfolgend der Fokus auf die aktuellen Studien und eine Zusammenfassung der bis zu 4.000 Seiten umfassenden Berichte gelegt.

A. RCP Klimapfade und -prognosen

Zur Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung kommen Modelle zum Einsatz, die die dynamischen Prozesse der Atmosphäre in Wechselwirkung mit der Biosphäre, den Ozeanen und der Kryosphäre abbilden. Es muss angemerkt werden, dass es nicht möglich ist, den exakten Einfluss des Menschen auf das Klima der Erde für die nächsten Jahre, Jahrzehnte oder noch längere Zeiträume im Detail zu beschreiben. Im Rahmen des Möglichen liegen jedoch Annahmen über einen möglichen und wahrscheinlichen

Verlauf, die sogenannten Szenarien. Die in der Forschung entwickelten Szenarien der letzten Jahre beschreiben den Einfluss der Menschen auf das Klima und die Entwicklung bei weiterhin steigender Einflussnahme. Im Rahmen des 5. Sachstandsberichtes des IPCC wurden vier sogenannte "repräsentative" Szenarien (Repräsentative Konzentrationspfade – engl. Representative Concentration Pathways – RCPs) entwickelt. Diese beschreiben den Verlauf von GHG-Konzentrationen aufgrund des anthropogenen Einflusses und jenen von Aerosolen auf die Energiezufuhr (Strahlungsantrieb gegenüber dem Jahr 1850) für die Erde. Als Vergleichsgrundlage wird in solchen Studien der Zeitraum der Vorindustrialisierung 1850-1900 verwendet. Die Analyse der Auswirkungen dieser RCP werden im weiteren Verlauf in quasi-realistischen Simulationen für verschiedene Modelle (z. B.: Kryosphäre, Biosphäre, Ozeanmodell, etc.) mit dem Atmosphärenmodell verknüpft und in einem 3-dimensionalen globalen Klimamodell umgesetzt, siehe Abb. 1.

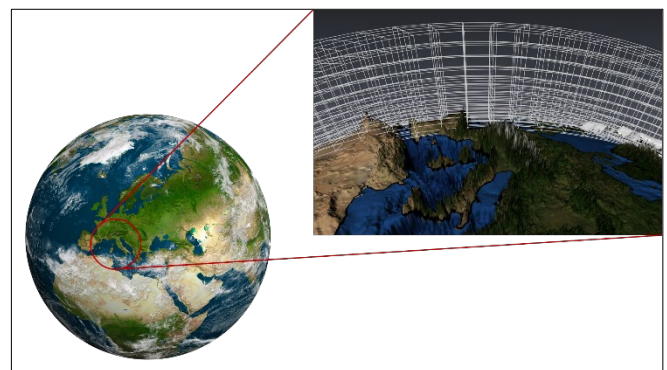


ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES DREIDIMENSIONALEN GLOBALMODELLGITTERS FÜR DIE ATMOSPÄRE. DER AUSSCHNITT BEZIEHT SICH AUF EINEN TEIL DES EUROPÄISCHEN FESTLANDES UND DES MITTELMEERES ANGEPASST AUS [4].

Es existieren eine Vielzahl an globalen Klimamodellen und entsprechenden regionalen Ausprägungen. Hier werden einzelne Modellkomponenten unterschiedlich definiert und/oder gewichtet, was wiederum zu einer hohen Bandbreite an unterschiedlichen Ergebnissen führt. Wenn mehrere Klimamodelle in der Betrachtung und Analyse Verwendung finden und miteinander verglichen werden, spricht man von einer Ensemble-Betrachtung. Dies erhöht die Bandbreite möglicher zukünftiger Klimaänderungen. Dies ermöglicht eine Einschätzung zur Wahrscheinlichkeit, wenn mehrere Projektionen eines Ensembles sehr ähnlich sind, ist ihr Eintreten als wahrscheinlicher anzusehen. Eine Übersicht dieser Pfade findet sich in TABELLE I.

TABELLE I: RCP SZENARIEN DES 5. SACHSTANDSBERICHTES NACH [3]

Eigenschaften	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
GHG in 2100 in ppm CO ₂ -äquivalent	400 ppm	650 ppm	850 ppm	1370 ppm
Strahlungsantrieb Δ 1850/2100	2,6 W/m ²	4,5 W/m ²	6,0 W/m ²	8,5 W/m ²
Erwärmung bis 2100 zu 1850-1900 [7]	1,5 °C bis 2 °C	2,5 °C bis 3 °C	3 °C bis 3,5 °C	>3,7 °C bis 5 °C
Emissions-szenario	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch

RCP 2.6: Ein Pfad, bei dem der Anstieg der GHG auf bis zu 490 ppm im Jahr 2020 angesetzt wurde und danach der Strahlungsantrieb bei etwa 3 W/m² seinen Höhepunkt erreicht und dann bis zum Jahr 2100 auf 2,6 W/m² zurückgeht. Der CO₂-Ausstoß reduziert sich bis 2100 auf 0. Das Ziel ist die Einhaltung des 2 °C-Erwärmungszieles bis 2100.

RCP 4.5 und RCP 6.0: Zwei moderate Pfade bei denen das CO₂-Äquivalent bis 2100 auf 650 bzw. 850 ppm anwächst. Danach stabilisiert sich der Strahlungsantrieb auf etwa 4,5 W/m² und 6,0 W/m² bis 2150 und bleibt konstant. Mit beiden wird ein Erwärmungsziel zwischen 2 °C bis 3 °C angestrebt.

RCP 8.5: Ein Pfad der die Weiterführung des aktuellen Ausbauniveaus beschreibt. Das CO₂-Äquivalent steigt bis 2100 auf 1370 ppm an und bleibt bis 2300 auf hohem Niveau. Der Strahlungsantrieb steigt auf über > 8,5 W/m² im Jahr 2100 an. Dies würde im Mittel zu einer Erwärmung um mindestens 3,7 °C und mehr [7] führen.

Selten wird auch noch das RCP 1.9 genannt, das den Weg zur Einhaltung des 1,5 °C-Erwärmungszieles beschreibt. Das Szenario RCP 2.6 ist beispielsweise nur zu erreichen, wenn sehr große Anstrengungen zum Klimaschutz unternommen werden und sich diese in stark verminderten Emissionen niederschlagen. Das Szenario RCP 8.5 ist das sogenannte Business-as-usual-Szenario und beschreibt eine Welt, welche kaum von der momentanen Art des Wirtschaftens und der Energienutzung abweicht.

B. SSP Klimapfade und -prognosen

Im Rahmen des kürzlich veröffentlichten 6. Sachstandsberichtes werden zu den genannten RCP noch sozioökonomische Pfade (engl. Shared Socioeconomic Pathways, SSP) herangezogen. Diese Pfade beschreiben alternative sozioökonomische Entwicklungen die stark in die Treibhausgasentwicklung einwirken, also bspw. Veränderung der Bevölkerungszahlen, des Bildungsstandes, der Urbanisierung und dem BIP pro Kopf. Die wichtigsten in Abb. 2 zusammengefasst und nachfolgend ausgeführt.

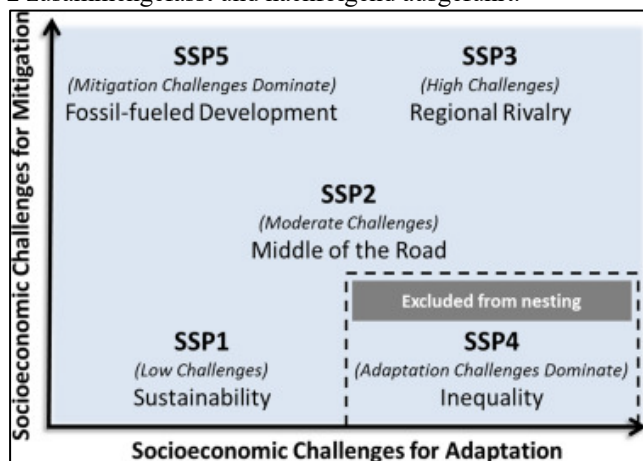


ABBILDUNG 2: ÜBERSICHT UND EINORDNUNG DER SSP AUS [5].

SSP 1 – Nachhaltigkeit („Taking the Green Road“): Hier wird eine Entwicklung hin zu mehr Ökologie und Nachhaltigkeit beschrieben, sowie eine Abkehr von einer ressourcenintensiven Lebensweise der Gesellschaft angenommen. Sowohl Industrie- als auch Schwellenländer verfolgen diese Änderung, die politisch motiviert aus sozialen, kulturellen und wirtschaftlichen Folgen von Umweltschäden und Ungleichheit stärker in die Aufmerksamkeit der

Bevölkerung treten. Eine angepasste Klimaschutzpolitik sowie eine globale Umsetzung mittels umfassender Anpassungskapazitäten werden durch gestiegenen Wohlstand möglich und die Etablierung stabiler Institutionen forciert.

SSP 2 - Mittlere Herausforderungen („Middle of the Road“): In diesem Pfad wird die bisherige Entwicklung speziell in den Bereichen Ökonomie, Gesellschaft und Technologie beibehalten. Klimaschutz wird in beschränktem Umfang betrieben, die Aufwendungen und Kapazitäten reichen nicht aus, um die Pariser Klimaschutzziele zu erreichen. Somit stellt der Pfad jeweils mittlere sozioökonomische Herausforderungen an Klimaschutz und Anpassung, die sich jedoch zwischen und innerhalb von Staaten stark unterscheiden.

SSP 3 – Regionale Rivalität („A Rocky Road“): Im SSP 3 wird die Welt von einem dominierenden Protektionismus gekennzeichnet. Hieraus resultieren Sorgen um die nationalen Wettbewerbsfähigkeiten und Sicherheiten bzw. diese führen zu räumlichen Konflikten. In den letzten Jahren konnte dies durch die letzte US-Regierung oder den Brexit beobachtet werden. Dies führt zu einer zunehmenden Ressourcenbeanspruchung, die ggf. auch die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen weiter fördern könnte. Hinzu kommen langsamere technische Entwicklungen, eine steigende soziale Ungleichheit – speziell zwischen Ländern aber auch in Ländern - und eine abnehmende internationale Zusammenarbeit. Damit steigen die Anpassungsherausforderungen an.

SSP 4 – Ungleichheit („A Road Divided“): Eine steigende Ungleichheit zwischen Nationen steht im Mittelpunkt dieses Pfades. Eine Teilung in der Bevölkerung erfolgt einerseits zwischen einer verknüpften Gesellschaftsschicht der wissens- und kapitalintensiven globalen Wirtschaft und andererseits fragmentierten Bevölkerungsgruppen, die in technologisch und ökonomisch gering orientierten Wirtschaftsbereichen arbeiten und einen niedrigen Bildungsstand sowie geringes Einkommen aufweisen. Es gibt Anstrengungen zur Entwicklung von CO₂-armen Innovationen und eine vergleichsweise schnelle Reaktionsfähigkeit internationaler Politik- und Wirtschaftsorganen. Dies führt zu hohen sozioökonomischen Klimaschutzmöglichkeiten. Gerade in Entwicklungsländern ist der Anpassungsbedarf für den Großteil der Bevölkerung hoch, bei gleichzeitig geringen Anpassungskapazitäten. Hintergrund hierfür ist der eingeschränkte Zugang zu Institutionen, die ggf. Unterstützung bei Wirtschafts- und Umweltkrisen geben könnten.

SSP 5 – Fossil befeuerte Entwicklung („Taking the Highway“): Der letzte Pfad zeichnet sich durch eine ökonomisch-liberale Grundausrichtung aus, die den effektiven Markt und Innovationen in den Fokus stellt. Als Bedingung muss eine Beschleunigung der Globalisierung sowie des technischen Fortschritts stattfinden. Infolge des hohen Bedarfes an fossilen Brennstoffen und fehlender ökologischer Restriktionen auf globaler Ebene sind die sozioökonomischen Herausforderungen für den Klimaschutz relativ hoch. Andererseits ist aufgrund der hohen Innovationskraft, des kontinuierlichen Wirtschaftswachstums und der weiterentwickelten Infrastruktur eine ausreichend hohe Anpassungskapazität an den fortschreitenden Klimawandel vorhanden. Dies führt dazu, dass mit Hilfe stabiler Institutionen schnell eine Anpassung an den Klimawandel

erreicht werden kann. Dies ist sowohl politisch gefordert, als auch ökologisch notwendig.

Detailliertere Ausführungen und Vergleiche der SSP untereinander finden sich in [8]. Die aktuellen Pfade und ihre Prognosen sind in **ABBILDUNG 3** abgebildet.

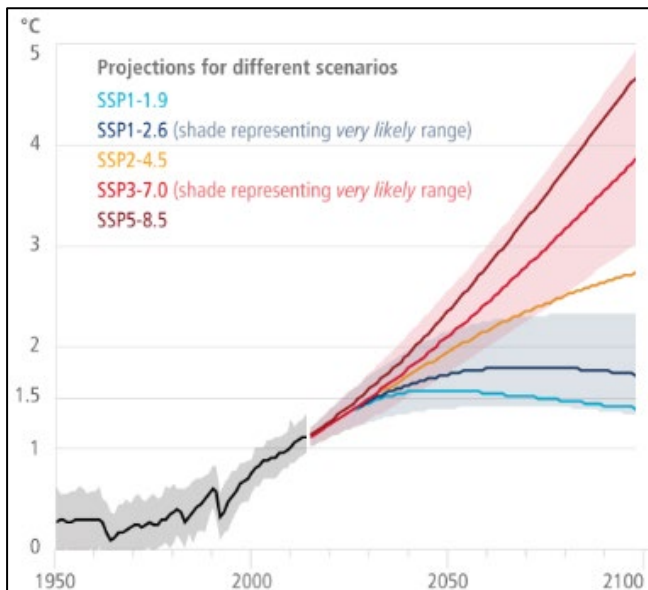


ABBILDUNG 3: ÄNDERUNG DER GLOBALEN OBERFLÄCHENTEMPERATUR (JÄHRLICHE MITTEL) AUS BEOBACHTUNGSDATEN UND SIMULIERT FÜR DIE TYPISCHEN TREIBHAUS- UND SOZIOÖKONOMISCHEN PFADE (JEWEILS 1850 – 2100) [1].

Die Auswirkungen der jeweiligen Szenarien lassen sich wie beim AR 5 auch hier in entsprechende Größenordnungen fassen und sind zusammenfassend in **ABBILDUNG 3** mit ihren Bandbreiten und numerisch in **TABELLE II** dargestellt. Es zeigt sich, dass im Vergleich die Modelle nochmals teilweise deutlich angehoben, sowie um sehr wahrscheinliche Bandbreiten erweitert wurden.

TABELLE II: SSP SZENARIEN ZUR ÄNDERUNG DER GLOBALEN OBERFLÄCHENTEMPERATUR, DARGESTELLT IST BESTER SCHÄTZWERT [UND SEHR WAHRSCHEINLICHE BANDBREITE] FÜR AUSGEWÄHLTE 20-JAHRES-ZEITRÄUME UND DIE FÜNF BETRACHTETEN ILLUSTRATIVEN EMISSIONSSZENARIEN, VERGLEICHZEITRAUM 1850-1900 [1].

Szenarien	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Nahe Zukunft (2021 – 2040)	1,5 °C [1,2 °C bis 1,7 °C]	1,5 °C [1,2 °C bis 1,8 °C]	1,5 °C [1,2 °C bis 1,8 °C]	1,5 °C [1,2 °C bis 1,8 °C]	1,6 °C [1,3 °C bis 1,9 °C]
Mittelfristig (2041 – 2060)	1,6 °C [1,2 °C bis 2,0 °C]	1,7 °C [1,3 °C bis 2,2 °C]	2,0 °C [1,6 °C bis 2,5 °C]	2,1 °C [1,7 °C bis 2,6 °C]	2,4 °C [1,9 °C bis 3,0 °C]
Langfristig (2081 – 2100)	1,4 °C [1,0 °C bis 1,8 °C]	1,8 °C [1,3 °C bis 2,4 °C]	2,7 °C [2,1 °C bis 3,5 °C]	3,6 °C [2,8 °C bis 4,6 °C]	4,4 °C [3,3 °C bis 5,7 °C]

Für die weiterführenden Analysen muss jedoch angemerkt werden, dass der aktuelle 6. Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe I bisher aufgrund der Aktualität kaum in die Betrachtungen eingeflossen ist. Es ist keineswegs abwegig, sondern sinnvoll, auch entfernt scheinende Szenarien wie ein

SSP 5 - 8.5 bei der Erarbeitung zukünftiger Entwicklungen zu berücksichtigen.

Der 6. Sachstandsbericht 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, längeren warmen und kürzeren kalten Jahreszeiten kommen. Bei 2°C globaler Erwärmung würden Hitzeextreme häufiger kritische Toleranzschwellen für Landwirtschaft und Gesundheit erreichen [1]. Erste Schätzungen zeigen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit, dass die globale Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten nur die Marke von 1,5 °C oder 2 °C erreicht, bereits jetzt schwer zu erreichen ist, wenn die GHG-emissionen nicht sofort, rasch und in großem Umfang reduziert werden [9]. Alle Entwicklung über einer globalen Temperaturerwärmung von 2 °C können mit höherer Wahrscheinlichkeit zu einer Beschleunigung der Erwärmung durch das Auslösen von Kippelementen, wie:

- NH₄- und CO₂-Freisetzung Dauerfrostböden und Thermokarst-Seen,
- Schmelzen des Grönländischen Eisschildes,
- Abbruch der atlantischen Zirkulation,
- Störung der Südpazifischen Klima-Oszillation und Verstärkung des El Niño-Phänomens
- Rückgang der Produktivität der Biosphäre mit einer Übersäuerung der Meere und somit die Abgabe von CO₂, Schädigung von Flora und Fauna, etc.

Um einen Anstieg der globalen mittleren Oberflächentemperatur (über 20 a, kurz: GMT) von insgesamt 2,0 °C mit 67 %-iger Wahrscheinlichkeit zu umgehen, wurde ein verbleibendes weltweites CO₂-Budget bestimmt. Zum aktuellen Zeitpunkt (27.09.2022) stehen allen Ländern ein Restbudget von 1.030 Gt CO₂ zur Verfügung. Eine Begrenzung des Anstiegs auf 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ist mit einem Restbudget von 287 Gt CO₂ ausgewiesen. Weltweit betragen die aktuellen CO₂ – Emissionen der Weltbevölkerung ca. 40-50 Gt/a.

C. Einwirkung auf Regionalmodelle

Mit den globalen SSP / RCP Klimaprojektionen (über einen Betrachtungszeitraum von min. 30 Jahren) werden sogenannte regionale Klimamodelle abgeleitet, die u. a. die gemäßigten Breitengrade widerspiegeln. Für Deutschland gibt es hierzu bereits Ausführungen in [2]. Noch spezifischere Regionalmodelle wie der Großraum Hamburg / das Norddeutsche Tiefland wurde bspw. im Hamburger Klimareport [6] analysiert. Diese Regionalmodelle nutzen meist eine Analyse verschiedener Klimaparameter, deren Entwicklung aus den Modellen und Ensembles abgeleitet oder direkt ermittelt wird (siehe **TABELLE III**).

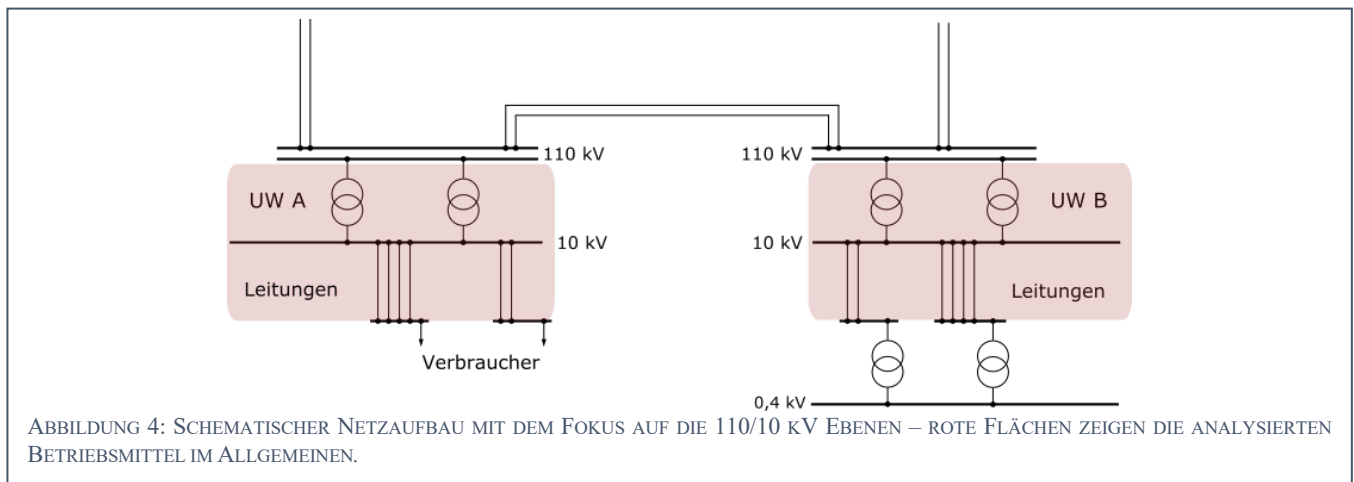


TABELLE III: ENTWURFSLISTE POTENTIELL RELEVANTER KLIMAPARAMETER

Klimaparameter	Typ/Unterkategorie
Temperatur und Einstrahlung	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatur im Jahresmittel - Anzahl der heißen Tage - Anzahl der Frosttage/Eistage - Sonnenscheindauer / Einstrahlung
Wind	<ul style="list-style-type: none"> - Windgeschwindigkeit - Sturmtage
Niederschlag	<ul style="list-style-type: none"> - Jahresniederschlag - Niederschlagsverteilung - Überschwemmungsszenarien
Hochwasser	<ul style="list-style-type: none"> - Meeresspiegelanstieg - Küstenhochwasser - Flusshochwasser
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"> - Trockenperiode - Bodenfeuchtigkeit - Bodentemperatur

Einige dieser externen Einflussfaktoren stellen die Bemessungsgrößen dar, die für eine Analyse zur Bewertung der Einflüsse auf Betriebsmittel des Verteilnetzes genutzt werden.

III. MODELL ZUR BEWERTUNG DES EINFLUSS EXTERNER UND INTERNER FAKTOREN AUF UMSPANNWERKE

Umspannwerke verbinden verschiedene Spannungsebenen im elektrischen Netz miteinander. Nachfolgend werden Umspannwerke, die Verbindung aus Schaltanlagen und mindestens einem Transformator, dem Spannungsbereich Hoch- und Mittelspannungsumspannebene (110kV/10kV) zugeordnet. Wie ABBILDUNG 4 zeigt, erfolgt bei der Bewertung von Einflüssen auf Umspannwerke eine Einzelfalluntersuchung ausgewählter Umspannwerke (rote Fläche, beispielhaft UW A und UW B).

Der Fokus in diesem Artikel soll dabei weniger auf der betriebsmitteltechnischen Ausstattung eines Umspannwerkes liegen, zu der neben Strom- und Spannungswandlern zum Überwachen und Schützen auch Leistungsschalter zum Ein- und Ausschalten des Stromes unter Normal- und Fehlerbedingungen sowie Sammelschienen, Transformatorschaltfelder, Transformatoren, Trennschalter, Erdungsschalter und Überwachungs- und Betriebsanlagen gehören, sondern sich mit den thermischen Eigenschaften

ausgewählter Räume umbauter Umspannwerke, hier dem Transformatorraum, beschäftigen. Freiluftschaltanlagen und umbaute Systeme werden hier unterteilt, wobei in urbanen Gebieten meist umbaute Systeme bestehen. Daher ist die bauliche Umschließung der Schaltanlagen/Transformator Kombination relevant. Diese stehen auch im Fokus der Betrachtung.

Im Rahmen der Analyse von Klimaeffekten und -auswirkungen auf die Umspannwerke, ist es wichtig ihre Verortung im Kontext des umgebenden Raumes zu kennen und zu analysieren. Hierbei helfen das Geo-Informationssystem (GIS) sowie Netzmodelle und Karten. Die GIS-Verortung von Umspannwerken im urbanen Bereich dient dazu, Effekte von Klima- und Wetterereignissen darzustellen, einzuordnen und mögliche Bias zu ermitteln.

Spezifische ortsgebundene Effekte wie die Betrachtung von Wärmeinseln und Frischluftzuströmungen sind variabel und von der umliegenden Infrastruktur abhängig. Ihre Einflüsse werden nicht oder nur in Nebenbedingungen wie Windgeschwindigkeits- und Einstrahlungsmessungen berücksichtigt.

Insbesondere umbaute Umspannwerke mit bestehenden thermischen Problemen in einzelnen oder allen Räumen, Umspannwerke die stark eingebaute Position in der Stadt einnehmen oder Umspannwerke die nach Süden ausgerichtete Trafokammer aufweisen wurden im genannten Projekt als kritisch identifiziert. Als temperaturkritische Bereiche in einem Umspannwerk wurden:

- der Transformatorraum,
- der Überwachungsraum/Arbeitsplatz und
- der Eigenversorgungstransformator und seine Auswirkung im Gebäude identifiziert.

Die Vorgaben für die Arbeitsräume sind aus der Auslegung der Klimatisierung der Anlage entnommen. Dabei wird definiert, dass die zulässige Raumtemperatur 30 °C betragen darf. Diese darf nur an Tagen mit >28 °C Außentemperatur überschritten werden, sollte eine Überschreitung eintreten müssen im erforderlichen Raum Klimaanlage respektive größere Klimaanlage installiert werden. Innerhalb eines Messzeitraumes von 60 min darf die Innentemperatur 35 °C nicht übersteigen, tritt dies auf, ist der Raum als Arbeitsraum unbrauchbar. Als Zielgröße kann somit die Rauminnentemperatur im Transformatorraum

T_{T1T2} angesehen werden, die Einflussgrößen werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

Zur Analyse der externen und internen Faktoren müssen alle untersuchten Umspannwerke eine umfangreiche Anzahl an Überwachungs- und Messelektronik wie z.B. Long Range Wide Area Network (kurz: LoRaWAN) Messsysteme zur Überwachung vielfältiger Eigenschaften wie Lufttemperatur, Trafotemperatur, Luftfeuchtigkeit, Zeit, etc. bereits verbaut haben.

A. Einflussfaktoren

Um eine Analyse des Einflusses verschiedener interner und externer Faktoren (extern = außerhalb des Umspannwerkes) auf T_{T1T2} durchzuführen, müssen diese benannt und über einen ausreichenden Zeitbereich, mit möglichst hoher Auflösung aufgenommen werden. Ziel ist die Darstellung der Einflüsse der Parameter auf die Wärmeentwicklung im Traforaum.

Eine Regressionsanalyse versucht den funktionalen Zusammenhang zwischen diesen Treibern und $T_{T1T2}(t)$ zu spezifizieren. Zur Bestimmung der Abhängigkeit und Stärke eines Zusammenhanges, ob dieser nun bspw. positiv stark abhängig ist, ist die multiple lineare Regressionsanalyse ein geeignetes Mittel, die Matrixschreibweise ist in (1) abgebildet. y ist die beobachtete abhängige Variable, die durch eine lineare Mehrfachregression durch X unabhängige Variablen, Regressionskoeffizienten β und einem Rest ϵ erklärt wird. nähere Ausführungen hierzu finden sich im nächsten Abschnitt.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (1)$$

Die Analyse zwischen den Daten der Temperatur im Traforaum $T_{T1T2}(t)$ und den verbleibenden Daten der Treiber verdeutlicht den Einfluss der zusätzlichen Datenquellen. Als zusätzliche Regressoren wurden folgende Größen identifiziert:

$P_V(t)$	Gesamte Verlustleistung Kupfer und Eisenverluste der 110/10 kV Trafos
$P_{V_{EB}}(t)$	Gesamte Verlustleistung Kupfer und Eisenverluste des EB-Trafos
$T_A(t)$	Temperatur an der Außenwand des Umspannwerkes
$\varphi_A(t)$	Relative Luftfeuchtigkeit an der Außenwand des Umspannwerkes
$E_A(t)$	Bestrahlungsstärke an der Außenwand des Umspannwerkes
$V_A(t)$	Windgeschwindigkeit an der Außenwand des Umspannwerkes

$P_V(t)$ umfasst alle kumulierten Wärmeverluste an den 110/10 kV-Transformatoren. Umspannwerke haben einen oder mehrere 110/10 kV-Transformator/en und einen oder mehrere Eigenbedarfstransformator/en. In der vorliegenden Betrachtung wird nach (n-1)-Kriterium von zwei Transformatoren T1 und T2 sowie einem Eigenbedarfstrafo T(EB) ausgegangen. Bei den 110/10 kV-Umspannwerkstransformatoren ist in der Regel nur einer der beiden Transformatoren in Betrieb. Der andere ist ausgeschaltet, so dass auch keine lastunabhängigen Eisenverluste P_{Fe} – gleichbedeutenden mit den Leerlaufverlusten, die ihre Ursache in der Magnetisierung des Eisenkerns finden und bei annähernd gleichbleibender

Betriebsspannung konstant sind – entstehen können. Die lastabhängigen Kupferverluste P_{Cu} (Belastungsgrad: $\frac{I_b^2(t)}{I_n^2}$ bzw. $\frac{S^2(t)}{S_F^2}$) werden nach Gleichung (2) berechnet.

$$P_{Cu}(t) = \frac{I_b^2(t)}{I_n^2} \cdot P_{CuT} = \frac{S^2(t)}{S_F^2} \cdot P_{CuT} \quad (2)$$

Im Datenblatt angegeben sind die Nennkurzschlussverluste P_{CuT} . Die Verluste der 110/10-kV-Transformatoren fallen direkt in den Transformatorräumen an. Diese führen einerseits zur Veränderung der Temperatur des Transformators selbst (Öl, Kessel, und Kupferwindungen und des Kerns usw.) sowie der umgebenden Wände und Gebäudeteile durch die umgebende Luft. Die Verluste der 110/10-kV-Transformatoren dominieren i.d.R. die Gesamtverluste $P_{V_{Ges}}$ eines Umspannwerkes. Für T1 und T2 werden Betriebsströme der Transformatoren jeweils als ¼-h-Lastgangsdaten ausgewertet.

Im Regelfall ist der Eigenbedarfstransformator (EB) immer eingeschaltet und versorgt das Umspannwerk sowie die installierten Anlagen und den Überwachungsraum. Die Verluste an den Eigenbedarfstransformatoren $P_{V_{EB}}(t)$ sind die Eisen- und Kupferverluste des Trafos im jeweiligen Betriebsraum in dem der EB installiert ist. Bei den EBs wird der durchgeleitete Teil der Energie, ebenfalls als ¼-h-Lastgangsdaten übermittelt und dient der Versorgung diverser Verbraucher innerhalb des Umspannwerkes. Der größte Teil der Energie wird in den Schutz- und Leittechnikräumen durch die ständig im Betrieb befindlichen Geräte in Wärme umgesetzt. Ein kleinerer Teil wird aufgewendet für die Beleuchtung in den Fluren, WCs, Aufenthaltsräumen, Kellerräumen. Die Lüfter der Transformatoren $P_{Lüfter}$ werden über den EB-Trafo gespeist. Die übermittelten Messwerte der EB erfassen nicht die Verluste der EB-Transformatoren selbst, sondern den durchgeleiteten Teil der Energie. Es wird näherungsweise angenommen, dass die Kurzschlussverluste mittels der durchgeleiteten Wirkleistung P_{EB} abgebildet werden kann.

$$P_{Cu}(t) = \frac{P_{EB}^2(t)}{S_F^2} \cdot P_{CuT} \quad (3)$$

Die vereinfacht angenommenen kumulierten Wärmeverluste an den Transformatoren $P_V(t)$ werden in die Datenbank nach Gleichung (4) übernommen.

Weiterhin wurden alle externen Umwelteinflüsse die auf das umbaute Umspannwerk wirken, als relevant identifiziert. Hierzu zählen $T_A(t)$, $\varphi_A(t)$, $E_A(t)$ sowie $V_A(t)$. Alle diese Informationen wurden mittels LoRaWAN- Messsensoren am Umspannwerk aufgenommen und ausgewertet.

B. Multiple lineare Regression der Regressoren auf T_{T1T2}

Eine multiple lineare Regression hat das Ziel die Abhängigkeit zwischen einer abhängigen Variable – im vorliegenden Fall T_{T1T2} - mittels mehrerer unabhängiger Variablen / Regressoren zu erklären. Das Verfahren, dient der quantitativen Prognose einer Variable und testet die Zusammenhänge zwischen dem Regressand und den Regressoren. Im Vorfeld der Regressionsanalyse sollte zudem eine Überprüfung verschiedener Voraussetzungen stattfinden. Eine Übersicht dieser findet sich in [10].

$$P_V(t) = \begin{cases} \left(\frac{(U_{nN} \cdot I_{rT1}(t))^2}{S_{rT1}^2} \cdot P_{CuT1} \right) + P_{FeT1}, & \text{wenn } I_{rT1} \neq 0 \\ \left(\frac{(U_{nN} \cdot I_{rT2}(t))^2}{S_{rT2}^2} \cdot P_{CuT2} \right) + P_{FeT2}, & \text{wenn } I_{rT2} \neq 0 \\ \left[\left(\frac{(U_{nN} \cdot I_{rT1}(t))^2}{S_{rT1}^2} \cdot P_{CuT1} \right) + P_{FeT1} \right] + \left[\left(\frac{(U_{nN} \cdot I_{rT2}(t))^2}{S_{rT2}^2} \cdot P_{CuT2} \right) + P_{FeT2} \right], & \text{wenn } I_{rT1}, I_{rT2} \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Hierzu werden die stündlichen Werte der Regressoren in der oben angeführten Zusammenstellung wie folgt behandelt:

$$T_{T1T2} = \beta_0 + P_V \beta_1 + P_{VEB} \beta_2 + T_A \beta_3 + \varphi_A \beta_4 + E_A \beta_5 + V_A \beta_5 + \epsilon \quad (5)$$

bei welcher die Zielfunktion gemessen an den einzelnen Beobachtungen $T_{T1T2}(t)$:

$$\sum_{x=\text{Anfangsmesszeitpunkt}}^{\text{Endmesszeitpunkt}} \epsilon_x^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

minimiert werden muss. Unbekannt sind dabei die Skalare (β_n) und die Störgröße ϵ .

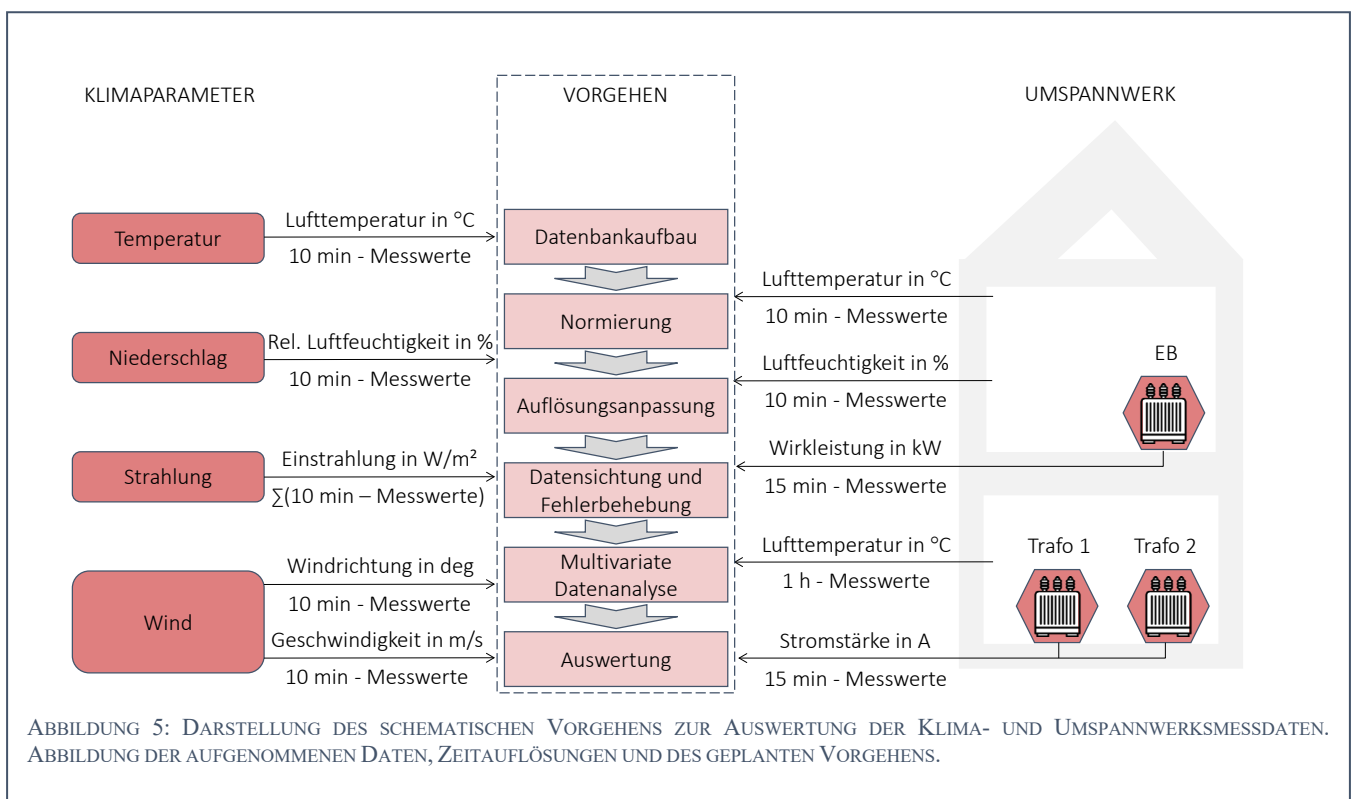
Um alle Werte miteinander zu verknüpfen und eine solche Regressionsanalyse durchzuführen müssen verschiedene Schritte durchgeführt werden, die in ABBILDUNG 5 dargestellt sind. Dies ist als Beispielhaft zu betrachten, da sowohl die zeitlichen Auflösungen der Messwerte, die Datenverfügbarkeit aber auch der mögliche Aufbau und damit

die Einflüsse abweichen können. Wie in ABBILDUNG 5 aufgeführt, sind vielfältige Messwerte mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen vorhanden, die in die Betrachtung einbezogen werden. Nach einer Zusammenführung der Datensätze in einer Datenbank, erfolgt eine Normierung zur Vereinheitlichung der Daten, eine Anpassung der Datenauflösung sowie die Datenkontrolle, Analyse und Auswertung. Die zeitliche Auflösung wird dabei auf die größte überschneidende Zeiteinheit je Datenpunkt zusammengeführt, da eine Rückrechnung mit einigem Aufwand möglich ist, aber die Datenqualität mindert.

Die Schritte beginnend mit dem Aufbau der Datenbank über die Normierung bis hin zur Anpassung der Datenqualität und Fehleranalyse wird nachfolgend kurz erläutert. Das Ziel des Datenbankaufbaus ist die Zusammenführung der Daten zu einer softwareseitigen Nutzbarmachung. Daneben erfolgt eine stichprobenartige Überprüfung der Datensätze. Die Datenpakete werden in zwei Hauptpakete unterteilt:

Klimaparameter:

- Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Einstrahlung, Windrichtung und -geschwindigkeit,



- Lufttemperatur und –feuchtigkeit im Umspannwerk

Messwerte der Trafos:

- Messwerte der 110/10 kV Transformatoren auf der Trafosammelschiene 10 kV: Hierfür werden die Messdaten der beiden Trafos je UW (T1 und T2) nach Gleichung (4) in einen Datensatz zusammengezogen (in kW)
- Messwerte der EB Transformatoren auf der Trafosammelschiene 10 kV: Hierfür werden die Messdaten des EB-Trafos nach Gleichung (4) in einen Datensatz zusammengezogen (in kW)

Es erfolgt im nächsten Schritt die Normierung aller Messwerte auf einheitenlose Ebenen. Eine Transformation der Datensätze (Normierung) vor Beginn der multivariaten Datenanalyse ist üblich, wenn die Maßeinheiten der Messgrößen entweder ungleich oder unvergleichbar sind [11]. Im vorliegenden Fall bekommt z.B. die solare Einstrahlung (W/m²) zur Klassenbildung ein numerisch gleiches Gewicht von gleicher qualitativer Bedeutung wie bspw. °C. Es wird sozusagen die wahre Bedeutung in Variablen erfasst. Eine Übergewichtung hochvolatiler oder einstrahlungsarmer Stunden wird reduziert, und dem Zweck der Musterfindung untergeordnet. Hierzu können lineare (z. B.: Z-Score-Transformation, 0;1-Normierung) oder nicht lineare Verfahren (z. B.: Sigmoid) Anwendung finden. Im vorliegenden Fall wird auf eine 0;1-Normierung zurückgegriffen [12].

Es erfolgt eine Auflösungsanpassung aller Datensätze auf die höchste Zeiteinheit. Die ggf. bereits in der Datenaufnahme durch verschiedene Messsysteme und –instrumente auftretende Schwankung in der Datenqualität wird in der Fehlerbehebung und Datensichtung angepasst. Fehler werden als NaN im Rahmen der Auflösungsanpassung in die Datenbank integriert. Gleichzeitig erfolgt eine Entfernung der Ausreißer bzw. Spikes. Meist enthalten Maximalwerte (bspw. der Verlustleistung) keinen überproportionalen Mehrwert. Im vorliegenden Trafobeispiel würde der Maximalwert der Verlustleistung $P_V(t)$ nicht dazu führen, dass auch eine Sprungantwort der Raumtemperatur eintritt, sondern die Veränderung tritt verzögert ein.

C. Auswertung und Interpretation von Ergebnissen

Je nach Ergebnis der Analyse kann die Auswertung unterschiedlich ausfallen. Jedoch dient das gezeigte Vorgehen der allgemeinen Möglichkeit zur Interpretation. Ein beispielhaftes Ergebnis der Regressionsanalyse könnte dabei wie in TABELLE IV sein.

TABELLE IV: BEISPIELHAFTES AUSWERTUNG EINER MULTIPLER LINEAREN REGRESSIONSANALYSE

Modellgüte	
Bestimmtheitsmaß (R^2)	0,650
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß (R_{adj}^2)	0,650
Standardfehler	4,478
Beobachtungen	7.750

Koeffizienten						
	P_V in kW	$P_{V_{EB}}$ in kW	T_A in °C	φ_A in %	E_A in W/m ²	V_A in m/s
RK (ns)	0,304	-186	0,253	0,059	0,004	0,009
RK (s)	0,523	-0,193	0,291	0,150	0,114	0,002
S	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,867
RK (ns) Regressionskoeffizient (nicht standardisiert)						
RK (s) Regressionskoeffizient (standardisiert)						
S Signifikanz						

Die ANOVA muss einen signifikanten Wert (<0,0005) darstellen, um mit Bestimmtheit zu sagen, dass für den vorliegenden Fall, das Regressionsmodell einen Erklärungsbeitrag leistet. Die Modellgüte ist mit dem $R^2=0,650$ hoch, $R_{adj}^2 = 0,65$ ist ebenfalls ausreichend. $R^2 = 0,650$ sagt aus, dass das Modell 65,0% der Varianz der T_{T1T2} -Variable erklärt. Bei der Analyse der Koeffizienten hat sich gezeigt, dass V_A mit einer Signifikanz ($p = 0,867$, Grenzwert $p < 0,05$) nicht in die weitere Betrachtung eingebaut werden kann. Der Zusammenhang kann vereinfacht wie folgt angenommen werden:

$$T_{T1T2} = 49,89 + 0,304 P_V - 186 P_{V_{EB}} + 0,253 T_A + 0,059 \varphi_A + 0,004 E_A + 0,009 V_A + \epsilon$$

Steigt bspw. die Außentemperatur am Messsensor T_A um 1 °C führt dies zu einem Anstieg der Innentemperatur im Traforaum am Messsensor (gemittelt über T1T2) von 0,253 °C. Steigt die Verlustleistung P_V der T1/T2-Trafos um 1 kW (sind sie also stärker ausgelastet), dann führt dies zu einem Anstieg der Innentemperatur im Traforaum am Messsensor (gemittelt über T1T2) um 0,304°C. Zum Vergleich zwischen signifikanten Variablen dienen die standardisierten Koeffizienten RK(s). Anhand derer sieht man, welcher den größten positiven/negativen Einfluss auf die y-Variable hat. Im Beispiel hat T_A (0,291) einen größeren Einfluss als bspw. E_A (0,114).

Der Einfluss der globalen und spezifischeren regionalen Klimamodelle kann nun bei der Anpassung der Faktoren $T_A(t)$, $\varphi_A(t)$, $E_A(t)$ sowie $V_A(t)$ erfolgen. Die entsprechenden Bandbreiten möglicher Veränderungen können bei diesem Modellansatz eingesetzt und auf die Veränderung Innenraumtemperatur T_{T1T2} umgelegt werden. Die Qualität sagt dabei aus, wie gut das Modell veränderte Effekte abbilden kann. Nichtsdestotrotz sollten in regelmäßigen Abständen Überprüfungen des Modells stattfinden, um mögliche auftretende Multikollinearitäten, Änderungen im Mess- oder Untersuchungssystem oder Änderungen in den grundlegenden Zusammenhängen adäquat abbilden zu können.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Die ersten Folgen des Klimawandels zeigen bereits heute, dass in den kommenden Jahren und Jahrzehnten eine Anpassung zur Reduktion der Vulnerabilität von kritischen Infrastrukturen und hier im speziellen Energienetzen erfolgen muss. Auch wenn weiterhin vielfältige Unsicherheiten bei Prognosen und Vorhersagen bestehen, ist die Tendenz und Richtung bereits deutlich zu erkennen. Man kann davon

ausgehen, dass extreme Wetterlagen und -ereignisse in ihrem Aufkommen weiter zunehmen werden.

Im vorliegenden Fall wurden insbesondere die Einflüsse der klimatischen Veränderungen auf Umspannwerke analysiert. Die in dem Artikel vorgestellte Methodik ermöglicht eine Analyse und möglicherweise Prävention zur Verbesserung der Lebensdauer und Reduktion von Schäden an 110/10 kV-Transformatoren. Weitere Einflüsse, zum Beispiel auf erdverlegte Kabelsysteme und untergeordnete Netzstationen, werden zusammen mit möglichen Lösungen und Anpassungsstrategien in Kooperation mit SNH untersucht und im zu erstellenden Projektabschlussbericht dokumentiert.

LITERATUR

- [1] IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926
- [2] Plenz, M.; Ziller, P.; Heider, F.; Michael, L.-H.; Schulz, D.; Einflüsse des Klimawandels auf ausgewählte Assetklassen von Verteilnetzbetreibern, In: Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz – Stand der Technik und Digitalisierung bei integrierten Energiesystemen, Sektorenkopplungs- und Mobilitätstechnologien, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Professur für Elektrische Energiesysteme, Hamburg, Dezember 2021, Bd. 3, S. 19-29, ISSN (Druck) 2698-8798, ISBN (Druck) 978-3-86818-250-7, ISBN (Online) 978-3-86818-251-4, DOI: 10.24405/13942
- [3] Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- [4] „Was sind Klimamodelle?“ [Online], URL: <https://www.klimanavigator.eu/dossier/artikel/011977/index.php>, [Zugriff: 21.10.2021]
- [5] Syeda Mariya Absar, Benjamin L. Preston; Extending the Shared Socioeconomic Pathways for sub-national impacts, adaptation, and vulnerability studies. *Global Environmental Change*, Volume 33, 2015, Pages 83-96, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.04.004>.
- [6] DWD (2021): Klimareport Hamburg; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 56 Seiten.
- [7] Pielke JR., Roger (2021). "Most plausible 2005-2040 emissions scenarios project less than 2.5 degrees C or warming by 2100". *osf.io*. doi:10.31235/osf.io/m4fdu. Retrieved 2021-04-26.
- [8] Christian Lutz, Lisa Becker, Philip Ulrich, Martin Distelkamp: Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland. CLIMATE CHANGE 25/2019: Teilbericht des Vorhabens „Politikinstrumente zur Klimaanpassung“. Umweltbundesamt, Mai 2019, ISSN 1862-4359, S. 61–78
- [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] Toutenburg, Helge, and Christian Heumann. *Induktive Statistik: eine Einführung mit R und SPSS*. Springer-Verlag, 2008.
- [11] Cios, K. J., Pedrycz, W., Swiniarski, R. W., & Kurgan, L. A. (2007). *Data mining: a knowledge discovery approach*. Springer Science & Business Media.
- [12] Bacher, J.; Pöge, A.; Wenzig, K. (2010): Clusteranalyse - Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. , 3. Aufl., Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Oldenbourg.