

Der Einfluss von Klimafaktoren auf Assets im Bereich Umspannwerke und Hochspannung

Maik Plenz*, Felix Heider, Detlef Schulz

Professur für Elektrische Energiesysteme

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr

Hamburg, Deutschland

*maik.plenz@hsu-hh.de

Ralf Niechziol

Stromnetz Hamburg GmbH

Hamburg, Deutschland

Kurzfassung – Die Auswirkungen des Klimawandels sind weltweit spür- und messbar. Langanhaltende Dürrephasen in Frankreich, Überschwemmungen in Italien, wochenlange Waldbrände in den Vereinigten Staaten und Kanada sind nach verschiedenen Experten, wie bspw. des IPCC, Auswirkungen, eines sich verschiebenden Klimas. In Deutschland wirken sich die Folgen auf die Umwelt und die Wirtschafts- und Lebensbereiche aus. Auch die Strukturen der Energielogistik sind betroffen. Speziell in Großstädten sind die Auswirkungen spürbar. Klimatische Faktoren wie Temperaturerhöhungen zur Luft und im Boden, Häufigkeit von Niederschlägen und deren Menge aber auch Vegetationsveränderungen oder Extremwetter wirken sich besonders aus. Speziell in der elektrischen Infrastruktur und hier mit dem Fokus auf Übertragung und Verteilung, wird eine Wirkungskette und deren Auswirkungen untersucht. Grundlage ist eine Zusammenarbeit mit der Stromnetz Hamburg GmbH (SNH), bei welchem die Betroffenheit der Verteilnetze und die techno-ökonomischen Auswirkungen und Anpassungsoptionen auf wichtige Assets in zwei Berichten untersucht werden. Nachfolgend werden anonymisierte Auszüge aus den Ergebnissen vorgestellt und die Auswirkungen des Klimawandels beschrieben. Ziel des Papers ist die Darstellung des aktuellen Forschungsstandes auf dem Gebiet der klimatischen Auswirkungen auf Assets von Netzbetreibern.

Stichworte – Verteilnetz, Assets, Klimawandel

NOMENKLATUR

BRDF	Bidirektionale Reflexions-Verteilungsfunktion (bidirectional reflectance distribution function)
BUKEA	Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft der Freien und Hansestadt Hamburg
HS/MS/NS	Hoch-/Mittel-/Niederspannung
IPCC	Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
SNH	Stromnetz Hamburg GmbH
SRI	Solarer Reflektions-Index
TP	Teilprojekt
UW	Umspannwerk
VNB	Verteilnetzbetreiber

I. EINLEITUNG

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.

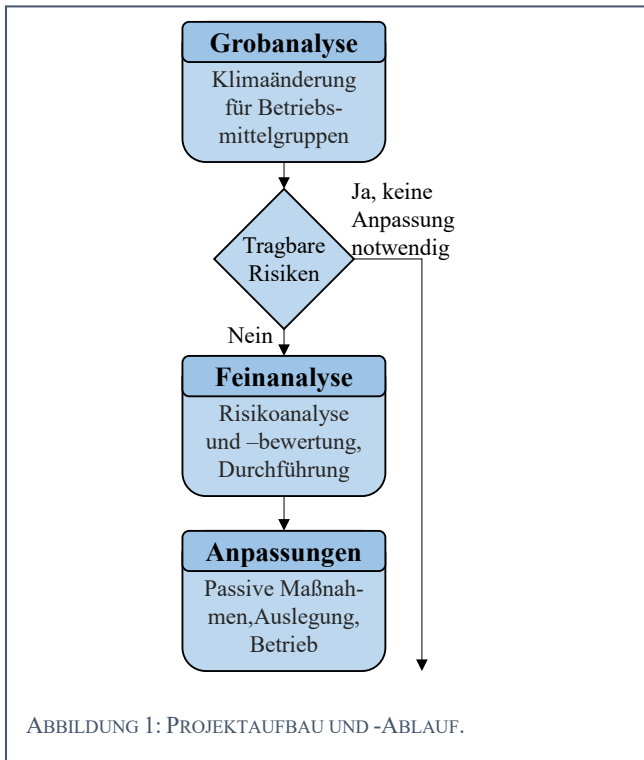
Dabei sind die Ziele eines nachhaltigen Assetmanagements von Verteilnetzbetreibern (VNB) vielfältig, primär gilt jedoch, dass die vorhandenen Anlagen und Leitungen möglichst lange betrieben werden können und negative externe Einflüsse minimiert werden. Infrastrukturunternehmen wie die VNB haben dabei die Herausforderung, die Assets verkehrssicher zu betreiben, eine ausreichende Personen- und Anlagensicherheit sowie die Übertragungsfähigkeit zu gewährleisten. Mit der Projektion der klimatischen Veränderungen in den nächsten 30 Jahren auf die heutigen Auslegungsdaten der Betriebsmittel ist es möglich, einen Perspektivwechsel zu vollziehen und zu identifizieren, an welchen Betriebsmitteln ggf. bereits heute Anpassungsmaßnahmen sinnvoll sind oder Auslegungsfaktoren angepasst werden müssen, um die Betriebsmittel langfristig ohne spätere Anpassungsmaßnahmen sicher betreiben zu können und nicht tragbare Risiken auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Bei nicht schlagartig eintretenden Veränderungen der exogenen Faktoren können die Auslegung und der Betrieb des Netzes kontinuierlich an ein sich veränderndes Umfeld angepasst werden.

In diesem Paper werden Projektaufbau und Projektablauf vorgestellt (Kapitel II). Darauf folgend werden anonymisierte Ergebnisse ausgewählter Arbeitspakete dargestellt und in den Kontext des Klimawandels eingeordnet. Zielstellung ist die Abbildung des Einblickes des täglichen Forschungs- und Arbeitsumfanges deutscher Verteilnetzbetreiber im Kontext des Klimawandels.

II. PROJEKTAUFBAU UND VORGEHEN

Hierfür hat die Stromnetz Hamburg GmbH (SNH) im Frühjahr 2021 mit der Helmut-Schmidt-Universität, der Professur für Elektrische Energiesysteme (HSU) und der Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (BUKEA) ein Projekt gestartet, das die Auswirkungen des Klimawandels auf die Netzassets der SNH untersuchen soll. Unter der Leitung des Netzbetriebs, Bereich Umwelt- und Energiemanagement wurde eine sogenannte Betroffenheitsanalyse mit dem Schwerpunkt Umspannwerke durchgeführt. Hierbei wurden

die klimatischen Veränderungen für den Zeitraum 2021 bis 2050 untersucht und der Einfluss auf einige weitere Betriebsmittel analysiert. Einige Auszüge hiervon finden sich in [1]. Anfang 2022 startete die zweite Phase des Projekts, mit dem Schwerpunkt notwendige Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren. Bisher war es häufig so, dass nach Eintritt von besonderen Wetterereignisse (Sturm, Hochwasser usw.) Anpassungsmaßnahmen untersucht und punktuell umgesetzt wurden. Das Paper nutzt diese Ergebnisse, die in Form zweier Berichte erschienen, als Grundlage. Der zweite Bericht umfasst die Erarbeitung eines Anpassungskonzeptes aus den Ergebnissen der Analyse der ersten Teilaufgabe sowie die Ergebnisse von 18 Forschungs- und Arbeitspaketen. Diese werden in Zusammenarbeit mit den Fachbereichen der SNH erstellt und auf Kohärenz zur Anpassungsstrategie der Freien und Hansestadt Hamburg geprüft. Innerhalb dieser Arbeitspakete werden jeweils eine Grobanalyse und Feinanalyse durchgeführt sowie Risiken analysiert und bewertet und Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen. Der Projektablauf hierfür ist in **ABBILDUNG 1** dargestellt. Die Grobanalyse stellt systematisch den ersten Schritt dar, die möglichen Risiken des Klimawandels zu identifizieren. Zusätzlich werden Empfehlung für die Priorisierung und die zeitliche Umsetzung der Maßnahmen erstellt. In diesem Paper werden ausgewählte Arbeitspakete vorgestellt und anonymisiert aufbereitet.



In dem Projekt wurde systematisch analysiert, für welche bestehenden Betriebsmittel des Verteilernetzes der SNH nicht tragbare Risiken durch den Klimawandel entstehen können. Hierfür wurde mit den Fachbereichen Assetsteuerung und Betrieb zusammengearbeitet. Es wurden fünf Teilprojekte (TP) etabliert. In den Teilprojekten Umspannwerke, HS-Leitungen und MS/NS-Leitungen werden identifizierte u.U. nicht tragbare Risiken und Sachverhalte untersucht und interne Unterstützung bei verschiedenen Fachbereichen bei SNH abgefordert und ggf. koordiniert. Das TP Risiko dokumentiert den Stand der Risikoeinordnung bezogen auf Wettereinflüsse oder

Klimaeinflüsse zu Beginn der Analyse. Das TP Erfahrungsaustausch Netzbetreiber führte dazu, dass weitere deutsche Netzbetreiber bzw. deren Auslegungsdaten und zukünftigen Klimaentwicklungen verglichen wurden.

III. AUSGEWÄHLTE, ANONYMISIERTE ERGEBNISSE

Nachfolgend finden sich ausgewählte, anonymisierte Ergebnisse der Feinanalyse. Eine Anonymisierung muss aus dem Grund des Daten- und Infrastrukturschutzes erfolgen, da in Zusammenhang mit kritischer Infrastruktur (hier Energieversorgung) keine expliziten Informationen zu Assets, Verortungen oder Maßnahmen erfolgen kann. Aus diesem Grund erfolgt eine Fokussierung auf das Vorgehen und den Ablauf der in der Feinanalyse bearbeiteten TP. Hierzu zählen Themen aus den Bereichen Umspannwerke, Hochspannung und Mittel- und Niederspannung.

A. Umspannwerke: Reduktion der Einstrahlungsenergie umbauter Umspannwerke

Hierbei wird mithilfe von Last- und Temperaturwerten der Großtransformatoren in umbauten Umspannwerken gezeigt, inwieweit Steigerungen der Umgebungstemperatur auf die Temperatur in der Trafokammer einwirken. Als eine Optimierungsvariante werden die Außenwand und vor dem Umspannwerk befindliche Straßen und Bodenoberflächen weiß bestrichen. Die Auswirkungen des Albedo-Effektes werden herbei analysiert.

Albedo beschreibt das Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen. Dabei wird das Verhältnis von reflektierter zu eingehender Strahlung über Wellenlängen beschrieben. Diffus bezeichnet hierbei Oberflächen-Rauheit, die größer als die Lichtwellenlänge sein muss [2]. Nach Warren [3] wird Albedo über die bidirektionale Reflexions-Verteilungsfunktion (BRDF, bidirectional reflectance distribution function) $R(\vartheta_0, \varphi_0, \vartheta_r, \varphi_r, \lambda)$ nach Gleichung (1) definiert.

$$R(\vartheta_0, \varphi_0, \vartheta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dF \uparrow(\vartheta_r, \varphi_r, \lambda)}{\cos \vartheta_0 dF \downarrow(\vartheta_0, \varphi_0, \lambda)} \quad (1)$$

Mit dem Zenit ϑ , dem Azimut φ und der Wellenlänge λ einer einstrahlenden Irradianz $F \downarrow(\vartheta_0, \varphi_0, \lambda)$ und einer reflektierenden Irradianz $F \uparrow(\vartheta_r, \varphi_r, \lambda)$ kann der BRDF ermittelt werden. Daraus kann der spektrale Albedo α_s ermittelt werden, der die einfallende richtungsgebundene Einstrahlung und in den (Halb-)Raum reflektierende Strahlung als Reflektanz in Gleichung (2) formuliert.

$$\alpha_s(\vartheta_0, \lambda) = \int_0^{\pi/2} \cos \vartheta_r d\vartheta_r \int_0^{2\pi} R(\vartheta_0, \vartheta_r, \varphi_r, \lambda) d\varphi_r \quad (2)$$

Allgemein hängt Albedo α von der Richtungsverteilung der Strahlung ab, denn es beschreibt den Anteil von $F \uparrow$ an $F \downarrow$. Das typischerweise gemessene spektral integrierte Albedo $\alpha(\vartheta_0)$ wird nach Gleichung (3) berechnet.

$$\alpha(\vartheta_0) = \frac{\int \alpha_s(\vartheta_0, \lambda) F \downarrow(0, \lambda) d\lambda}{F \downarrow(0, \lambda) d\lambda} \quad (3)$$

Somit kann $(1 - \alpha)$ als das Maß für die aufgenommene flächenbezogene Leistung betrachtet werden, die von der Oberfläche reflektiert. Stark vereinfacht praktischer orientiert, kann Albedo a als das Maß für das Rückstrahlvermögen (Reflexionsstrahlung der Globalstrahlung G) der Strahlungsbilanz R_N von nicht selber leuchtenden, diffus reflektierenden, nicht spiegelnden Oberflächen angesehen

werden. Eine hohe Albedo bedeutet, dass ein großer Teil der Strahlung reflektiert wird.

$$R_N = (1 - a) \cdot G + R_G - R_T \quad (4)$$

Die atmosphärische Gegenstrahlung R_G bedient die Größe eines teilweise bedeckten Himmels, die sich anteilig aus klarer Himmelsfläche (bzw. der Gegenstrahlung bei wolkenlosem Himmel $A_{G,K}$) sowie Wolkenunterseite (bzw. der Gegenstrahlung bei bedecktem Himmel $A_{G,W}$) und dem Bedeckungsgrad N zusammensetzt.

$$R_G = N \cdot A_{G,W} + (1 - N) \cdot A_{G,K} \alpha + \beta = \gamma \quad (5)$$

Die langwellige thermische Strahlung R_T wirkt ebenfalls als Bestandteil in die Strahlungsbilanz aus Gleichung (4) ein. Zusätzlich gibt es noch eine Vielzahl von weiteren thermischen Effekten, die auf ein Gebäude bzw. deren Innentemperatur einwirken. Die relevantesten werden in ABBILDUNG 2 aufgeführt. Für detaillierte Informationen hierzu, kann auf allgemeine Literatur, wie [4] verwiesen werden.

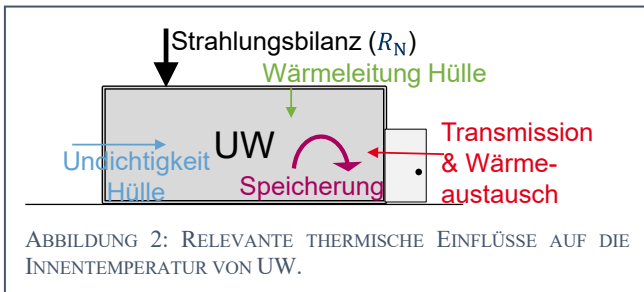


ABBILDUNG 2: RELEVANTE THERMISCHE EINFLÜSSE AUF DIE INNENTEMPERATUR VON UW.

Um die sekundären Auswirkungen des Albedo-Effektes zu messen, werden an Umspannwerken (UW) an entsprechenden Positionen Wetter- und Temperatursensoren installiert und mit den Verlaufsdaten mit den Scheinleistungen und Nennverlustdaten der Transformatoren kombiniert. Es soll die Frage beantwortet werden, ob die linearen Zusammenhänge, die zwischen Wetterparametern und Rauminnenparametern bestehen, durch den Albedo-Effekt beeinflusst werden können. Gleichzeitig soll die Frage beantwortet werden, wie stark weiße Wände und Böden zur Abkühlung der Ansaugluft - die primär zur Kühlung der Transformatorräume genutzt werden - beitragen.

Eine Analyse von Solar Reflectance Index (SRI) Faktoren (siehe ABBILDUNG 3) sowie eine Korrelationsanalyse

möglicher Abweichungen der Ansaugtemperatur dient als Grundlage der Ermittlung der Abweichung. Es bestünde auch die Möglichkeit mithilfe multivariate Analysemethodik der multiplen linearen Regressionsanalyse zu testen, und zu analysieren ob und wenn ja, wie stark der Zusammenhang zwischen Innen- und Außentemperatur beeinflusst werden kann [1].

Enge Bebauung, ansteigende Umgebungstemperaturen, bedingt durch die Entwicklungen des Klimawandels sowie hohe Auslastungen haben Einfluss auf die Kühlung eines Umspannwerkes. Bedingt durch den Kamineffekt, bei dem kühle Luft an bodennahen Bereichen des Umspannwerkes angesaugt und entsprechend durch Abluftsysteme an den oberen Bereichen der Trafokammer entlassen wird, sowie bei Bedarf zusätzlicher Kühlung, kann die Trafokammer und damit der Trafo gekühlt werden. Eine Erhöhung der Außentemperatur (ohne gleichzeitige Installation weiterer Kühlsysteme), eine stärkere insbesondere dunkelfarbige Bebauung der Umgebung, die Erhöhung der Einstrahlung durch Entfall von Schattenspendern oder Umbau von vorgelagerten Flächen, zu bspw. dunklen Asphaltflächen, kann zu einer Verminderung der Kühlleistung und damit zu einer Steigerung der Öltemperatur und damit auch Netzverlusten führen. Es kann die Lebensdauer und die Übertragungsfähigkeit der Transformatoren reduzieren. Gleichzeitig könnten die Arbeitsbedingungen für Mitarbeiter erschwert werden [1].

Durch die Ausnutzung des Albedo-Effektes soll eine Reduzierung der Ansauglufttemperatur erfolgen, welche zur Kühlung der Transformatorraum genutzt wird. Nach dem Weißstreichen der Außenwand und der umlagerten Pflasterfläche wird untersucht, ob und wie der Albedo-Effekt auf die Innentemperatur wirken kann. Hierzu wird die Ansaugluft beider Transformatorräumen verglichen. Sowohl die vorliegende Straße bzw. Bodenfläche als auch die Außenwand des Zweischalenbauwerkes werden weiß gestrichen.

Insbesondere führt im städtischen Umfeld ein hoher Bebauungsgrad mit wärmespeichernden Materialien und/oder versiegelte Oberflächen sowie zusätzlichen Wärmeeinbringern, wie Abwärme von Transformatoren im Sommer, zu Hitzestress und einer reduzierten nächtlichen Auskühlung. Mithilfe einfacher Maßnahmen sollte untersucht werden, ob und wenn ja wie, die richtige Auswahl von Bau- oder Oberflächenmaterialien dazu beitragen kann, diese

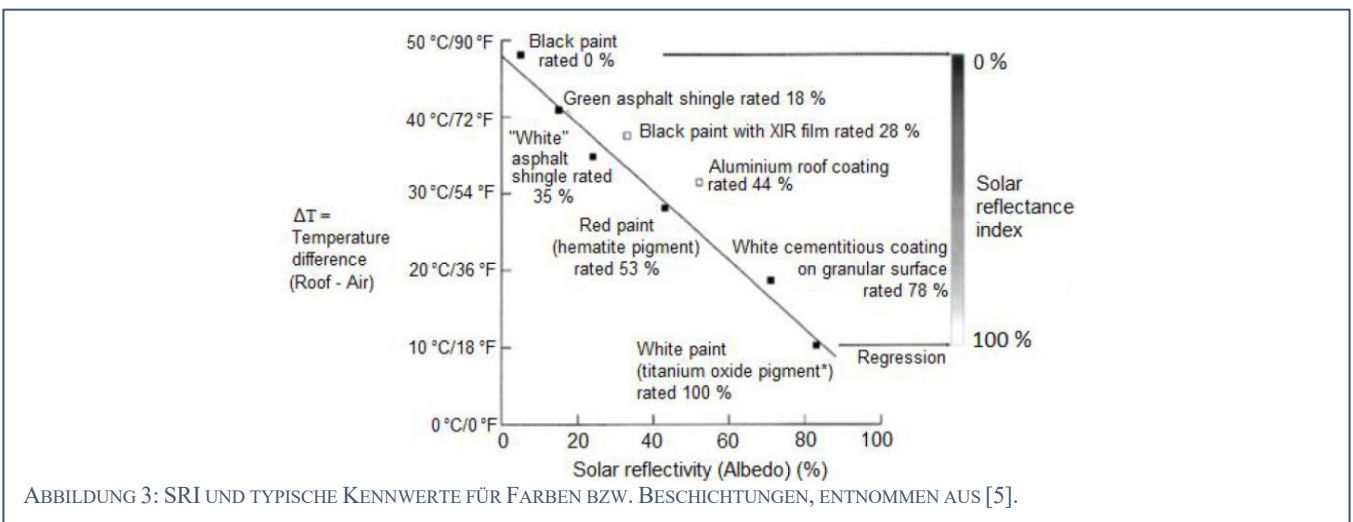


ABBILDUNG 3: SRI UND TYPISCHE KENNWERTE FÜR FARBEN BZW. BESCHICHTUNGEN, ENTNOMMEN AUS [5].

Effekte zu mindern. Die Zielstellung ist somit, das Eindringen von Wärme in Gebäude zu minimieren und die nächtliche Abkühlung im umliegenden städtischen Freiraum zu maximieren. Damit wird eine Reduktion des urbanen Wärmeinseleffektes erreicht. Positives Nebenresultat ist die Reduktion der Ansauglufttemperatur, durch geringe Staumenge thermisch stärker belasteter Luftmengen.

In Analysen wie [4] zeigt sich, dass weiße Versiegelungen und Materialien das höchste, also beste, Rückstrahlvermögen α aufweisen. Die tiefste Albedo α tritt beim dunklen Asphalt oder der Oberfläche von PV-Anlagen auf. Somit weisen also auch bei den Wandkonstruktionen die hellen Farben eine höhere Albedo als die dunklen, wie Backsteine, auf. Dementsprechend werden Wand und der Boden mit einem hellen Anstrich versehen. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird der Solar Reflectance Index, kurz SRI eingeführt. Mit diesem Index können die Effekte von solarer Reflexion und thermischer Emissivität kombiniert betrachtet werden. Je höher der SRI-Wert ist, desto geringer ist der Aufheizeffekt infolge solarer Strahlung auf die Oberfläche. Die Rangfolge ist ähnlich wie bei dem Albedo-Effekt. Eine Übersicht zur Einordnung und dem Verständnis findet sich in ABBILDUNG 3.

Um eine genauere Abschätzung über die Auswirkungen zu haben, wurden die einzelnen Elemente vor und nach dem Umfärben sowie der SRI miteinander verglichen. Dies ist jedoch nur ein oberflächlicher, basierend auf [4] durchgeführter Vergleich. Um genauere Werte zu erreichen, müssen verschiedene Analysen, wie bspw. eine thermische Messung der Wandoberflächentemperatur sowie eine Probe der Farbeinwirkung auf der Wand und dem Boden analysiert werden. Nichtsdestotrotz kann eine grobe Bestimmung der Veränderung erfolgen. Der SRI veränderte sich im Mauerwerk von SRI = 44 auf SRI = 86, im Pflaster von SRI = 52 auf SRI = 75...80. Um diese die Einflüsse einer weiß gestrichenen Außenwand inkl. Bodenbelag nachzuweisen, wird die Ansaugtemperatur zweier nebeneinanderliegenden Transformatoren gemessen. Insbesondere die Einfachheit sowie gleiche zeitlich abhängige Temperaturbedingungen - zu gleicher Zeit sind an beiden Ansaugsystemen vergleichbare Temperatur- und Umgebungsbedingungen - erlauben die Möglichkeit einer Vergleichbarkeit auf.

ABBILDUNG 4 zeigt den Verlauf und markiert das analysierte Fenster bzw. den untersuchten Zeitraum. Es zeigt sich, dass der Vergleichszeitraum deutlich vom restlichen und auch teilweise von den relevanten Messbereichen in den Sommermonaten abweicht. Tendenziell lässt sich über den Betrachtungszeitraum vor der Analyse (ABBILDUNG 4 rote Markierung) ein genereller Gap zwischen den Temperaturen erkennen. Eine genaue Analyse der Messwerte in ABBILDUNG 4 verdeutlicht diese erste Ansicht. Um bewertbare Ergebnisse zu erzielen, wurde die Abweichung vor und nach der Umsetzung der Maßnahme untersucht. Hierfür werden sowohl die wöchentlichen als auch die monatlichen Messwerte der Abweichung $\Delta T_{A(z)}$ miteinander verglichen. Die Temperatur der Ansaugluft der rechten Trafokammer $T_{Zr}(t)$ und die der linken $T_{Zl}(t)$ werden dabei kumuliert und durch die Anzahl der Messwerte n_z des gewählten Zeitraums Z geteilt.

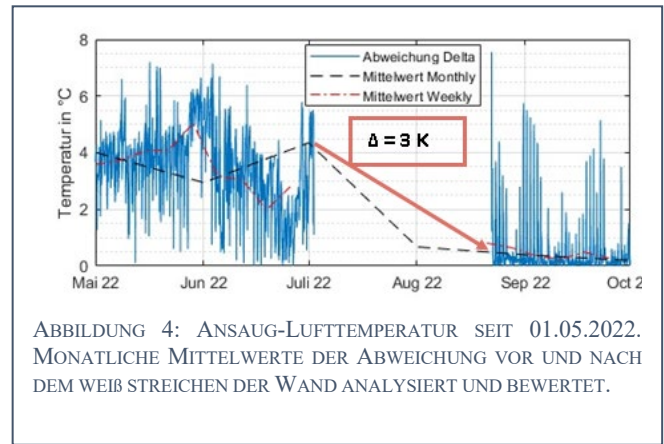


ABBILDUNG 4: ANSAUG-LUFTTEMPERATUR SEIT 01.05.2022. MONATLICHE MITTELWERTE DER ABWEICHUNG VOR UND NACH DEM WEIß STREICHEN DER WAND ANALYSIERT UND BEWERTET.

$$\Delta T_{A(z)} = \sum_{t=1}^z [T_{Zr}(t) - T_{Zl}(t)] / n_z \quad (6)$$

ABBILDUNG 4 zeigt sowohl in der wöchentlichen als auch in der monatlichen Abweichung eine klare Tendenz. Mit 3 K Temperaturdifferenz nach der Maßnahme kann festgestellt werden, dass eine Änderung erreicht wurde.

B. Hochspannung: Einfluss Spitzentemperaturen an heißen Sommertagen > 30 °C und Windgeschwindigkeiten kleiner 0,6 m/s

Anhand einer HS-Freileitung (kurz: FL) wird die Einwirkung des Klimawandels auf die Dauerstrombelastbarkeit von Freileitungen gezeigt. Für die Betrachtung der Freileitungen sind daher die genormten Kennzahlen aus der DIN EN 50182 relevant. Freileitungen werden für Dauerströme bei 35 °C und 0,6 m/s ausgelegt. Eine Veränderung der Bedingungen kann zu einer Überlastung der Freileitungen führen.

Es soll die Frage beantwortet werden, ob es einen Einfluss von Spitzentemperaturen an heißen Sommertagen mit geringen Windgeschwindigkeiten auf Freileitungen gibt. Hierfür muss geklärt werden, ob und wenn ja, wie oft die Situation auf die untersuchte Freileitung einwirkt und ob die dazugehörigen Normen ggf. zukünftig angepasst werden müssen. Hierbei wird eine FL aus dem Hamburger Verteilungsnetz analysiert.

Eine Analyse der Umweltbedingungen durch eine Triangulation der Leitung umliegenden Wettermessstationen, dient als Grundlage der Untersuchung. Diese Daten werden vollumfassend über ihren gesamten Zeitbereich explorativ analysiert und gefiltert, auf spezifische Events. Da es sich bei den Messungen um stationäre Momentaufnahmen handelt, wird abschließend mithilfe verschiedener zeitlicher Auflösungen geprüft, ob sich die grundlegende Aussagekraft der Ergebnisse ändert.

Die zukünftig ansteigenden Umgebungstemperaturen und ggf. einhergehende reduzierte Windgeschwindigkeiten, bedingt durch die Entwicklungen des Klimawandels, vermindern die Fähigkeit Wärme abzutransportieren. Diese Wärme, die durch die Umweltbedingungen und der Auslastung der Freileitungen (Stromwärmeverluste) entsteht, wirken sich auf Durchhang, Zugspannungen und zulässige Belastbarkeit von Freileitungen aus.

Die Vorgaben zur Bewertung sind in den Normen DIN EN 50182, Leiter für Freileitungen sowie DIN EN 50341, Freileitungen über AC 45 kV als Grundlage zur Bewertung

der Strombelastbarkeit eines Freileitungs-Stromkreises enthalten. Die CIGRE TB 601 [6] beschreibt weiterführend die statischen und dynamischen Grenzen. Dabei wird normativ eine Hochsommerwetterlage angenommen, die definiert ist für Leiterseile hinsichtlich ihrer Dauerstrombelastbarkeit. Sie umfasst die klimatischen Randbedingungen:

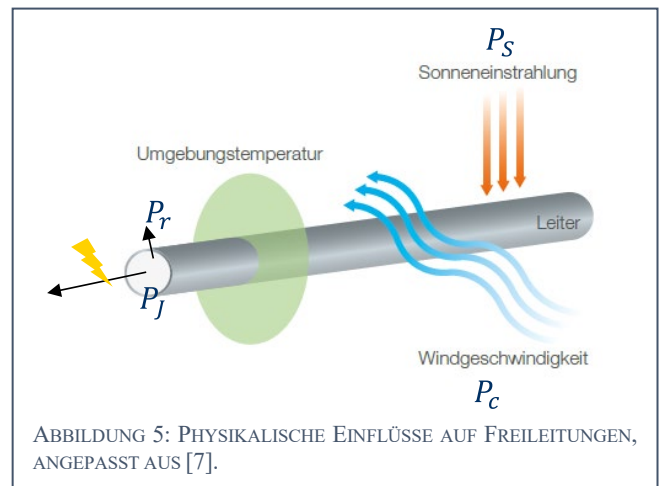
- Umgebungstemperatur: 35 °C
- Windgeschwindigkeit: 0,6 m/s rechtwinklig zum Leiter
- Sonneneinstrahlung: 900 W/m²

Die ABBILDUNG 5 zeigt den Einfluss von Umgebungsbedingungen also auch die physikalischen Einflüsse auf Freileitungen.

Der formeltechnische Zusammenhang in der CIGRE TB601 [6] zeigt, dass es ein Gleichgewicht zwischen Erwärmung und Kühlung gibt. Insbesondere Einflussfaktoren wie die Windgeschwindigkeit und -richtung, Umgebungstemperatur oder Sonneneinstrahlung sowie auch der durch die Leitung fließenden elektrischen Strom bestimmen die resultierende Leitertemperatur. Unter der vereinfachten Annahme, dass alle diese Parameter im Laufe der Zeit relativ konstant bleiben, kann der Leiter in einem stationären Zustand betrachtet werden, in dem sowohl der Strom als auch die Temperatur konstant sind. In diesem Fall ist die hauptsächlich durch Joulesche Verluste P_J und Sonneneinstrahlung P_S zugeführte Wärme gleich der hauptsächlich durch Konvektion P_C und Strahlung P_R an die umgebende Atmosphäre abgeführten Wärme. Unter Einbeziehung der sekundären Wärmequellen durch Koronaverluste P_I und magnetische Verluste in Stahlkernleitern P_M sowie der intermittierenden Wärmeverluste durch Verdampfung P_W kann die Wärmebilanzgleichung geschrieben werden:

$$P_J + P_S + P_M + P_I = P_C + P_R + P_W \quad (7)$$

Vereinfachen lässt sich diese Formel auf jeweils zwei Wärmetreiber und zwei Kühlungstreiber. Ausführungen hierzu finden sich in [6].



$$P_J + P_S = P_C + P_R \quad (8)$$

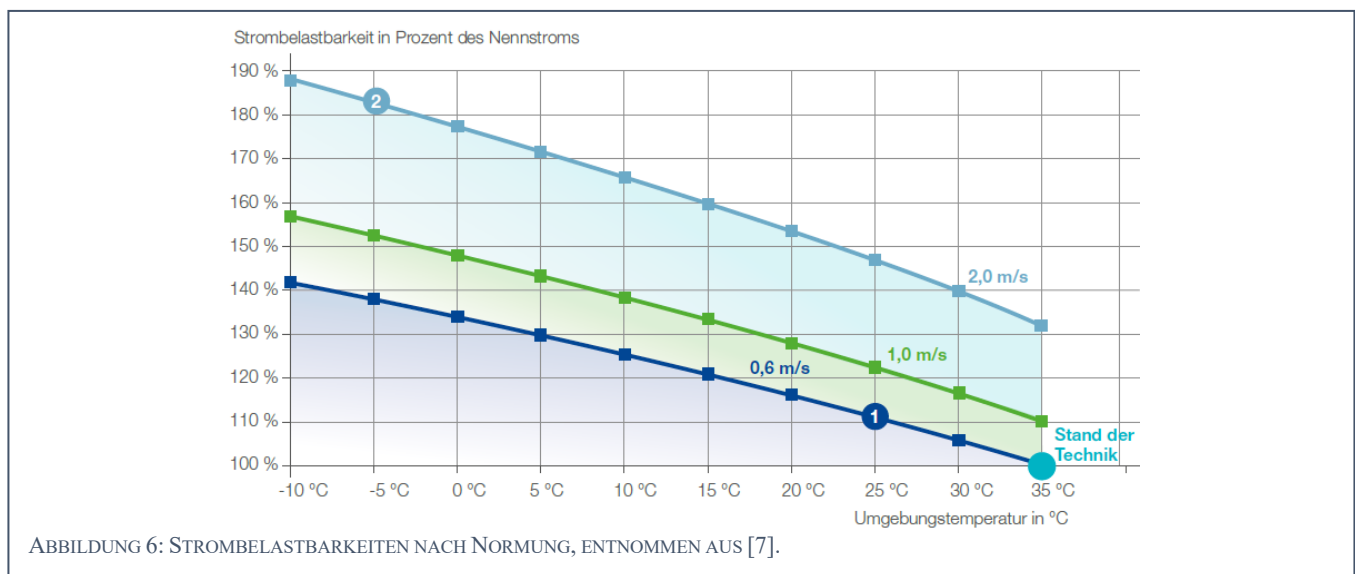
Bei diesen wiederum sind vor allem die Sonneneinstrahlung P_S und die Konvektion P_C die zu betrachtenden Größen.

$$P_S = a_S \cdot I_T \cdot D \quad (9)$$

$$P_C = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_S - T_a) \cdot Nu \quad (10)$$

Bei Gleichung 13 wird durch das Absorptionsvermögens der Oberfläche des Leiters a_S (liegt meist zwischen 0,5-0,9 bei älteren Leitern), die Globalstrahlungsintensität I_T und dem Außendurchmesser des Leiters D beurteilt. Durch die tendenzielle Zunahme von I_T steigt in einer statischen Analyse auch P_S . Der kühlende Einfluss der Konvektion P_C wird durch die Wärmeleitfähigkeit der Luft λ_f , der Temperatur der Leiteroberfläche T_S und Luft T_a sowie der Nusselt-Zahl Nu , die die Windgeschwindigkeit einschließt, ermittelt. Da für die Windgeschwindigkeit nach [8] keine Änderungen zu erwarten sind (die statistisch signifikant vorherbestimmt werden können), wird sich mittelfristig der thermische Einfluss auf die Leiter erhöhen. Die aktuelle Normung legt für Freileitungen die nach ABBILDUNG 6 aufgezeigten Strombelastbarkeiten an.

Es zeigt sich, dass nach aktuellem Stand nicht von Verknüpfungen zwischen $T \geq 35$ °C und $v \leq 0,6$ m/s ausgegangen wird. Um die Parameterzuordnung einschätzen



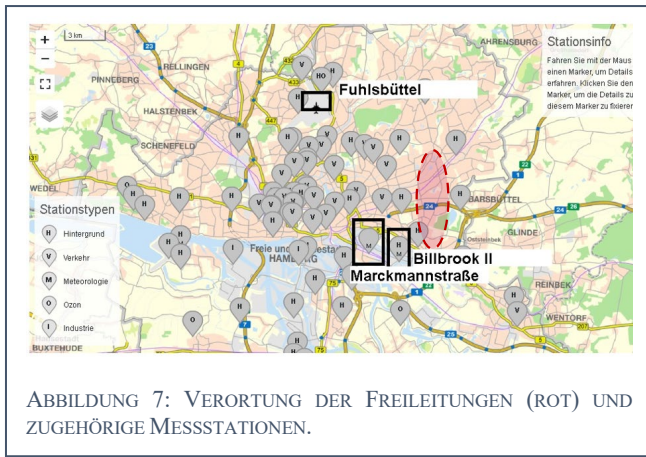


ABBILDUNG 7: VERORTUNG DER FREILEITUNGEN (ROT) UND ZUGEHÖRIGE MESSSTATIONEN.

zu können, wird in einem ersten Schritt eine Analyse der meteorologischen Messungen für Events $T \geq 30 \text{ °C}$ und $v \leq 1 \text{ m/s}$ in den letzten Klimaperioden durchgeführt. Die Verortung der Freileitung und ihre Ausrichtung werden bestimmt. Dies dient der Zuordnung relevanter Wetterstationen, die ortsnahe Messungen der Bedingungen ermöglichen (siehe ABBILDUNG 7).

Als Messzeitreihen in der Auflösung 1h werden folgende Wetterstationen und Zeiträume bestimmt und ausgewertet:

- Fuhlsbüttel: 01.01.1949 – 19.05.2022
- Billbrook II: 01.01.2012 – 26.11.2022
- Marckmannstraße: 01.01.2012 – 26.11.2022

Die Auswertung der am längsten aufzeichnenden Messstation Fuhlsbüttel verweist auf einen stetigen Anstieg der mittleren Temperaturen, in den beobachteten 30-Jahres-Zeiträumen – diese beschreiben eine Klimaperiode. Die mittlere Temperatur in $^{\circ}\text{C}$:

- 1951-1980 $\rightarrow 8,40 \text{ °C}$
- 1961-1990 $\rightarrow 8,53 \text{ °C}$ ($\Delta +0,13 \text{ °K}$)
- 1971-2000 $\rightarrow 8,89 \text{ °C}$ ($\Delta +0,49 \text{ °K}$)
- 1981-2010 $\rightarrow 9,26 \text{ °C}$ ($\Delta +0,86 \text{ °K}$)
- 1991-2020 $\rightarrow 9,71 \text{ °C}$ ($\Delta +1,31 \text{ °K}$)

Auch Messpunkte die $T \geq 30 \text{ °C}$ und $v \leq 2 \text{ m/s}$ bzw. jene die Werte $T \geq 30 \text{ °C}$ und $v \leq 1 \text{ m/s}$ aufweisen, steigen teilweise deutlich. Eine Zusammenfassung findet sich in TABELLE I zusammengefasst.

TABELLE I: TEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITS-EVENTS, AUSGEWERTET NACH DEN MESSDATEN DER MESSSTATION FUHLSBÜTTTEL.

Häufigkeiten	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
$T \geq 30 \text{ °C}$ $v \leq 2 \text{ m/s}$	12	18	26	41	54
$T \geq 30 \text{ °C}$ $v \leq 1 \text{ m/s}$	6	7	11	11	11

Die Auswertung in ABBILDUNG 8, die eine optische Weiterführung der TABELLE I ist, und die untersuchten Stationen auswerten, verdeutlicht ein ähnliches Bild. Alle Stationen zeigen einen Anstieg der mittleren und maximalen Temperaturevents. Da sich zum gleiche Betrachtungszeitraum jedoch die Windgeschwindigkeiten verändert haben, kann

keine relevante Zunahme der Events $T \geq 35 \text{ °C}$ und $v \leq 0,6 \text{ m/s}$ beobachtet werden. Eine Verknüpfung beider analysierter Events zeigt jedoch auch deutlich, dass die Häufigkeit des Auftretens von entsprechenden Messpunkten für den Bereich $T \geq 35 \text{ °C}$ und $v \leq 0,6 \text{ m/s}$ bei 1h-Messwerten bei 0 liegt. TABELLE II gibt hierzu einen Überblick.

TABELLE II: ANALYSE DER EVENTS IM BETRACHTUNGSZEITRAUM 1991-2020.

1991-2020	$T \geq 30 \text{ °C}$	$T \geq 35 \text{ °C}$
$v \leq 1 \text{ m/s}$	0,003 %	0,000 %
$v \leq 0,6 \text{ m/s}$	0,002 %	0,000 %

In einer höheren zeitlichen Auflösung in ABBILDUNG 9 – hier Messwerte alle 10 min – zeigt sich, dass die realistische Grenze der aktuellen Messwerte bei $T = 30 \text{ °C}$ und $v = 1,5 \text{ m/s}$ liegt. Einzig ein Messwert liegt über der Grenze. Da sich die Werte vor und nach dem Messwert geringfügig außerhalb des Rahmens bewegen, kann davon ausgegangen werden, dass aktuell noch keine kritischen Messwerte über einen Zeitraum der Beeinflussungen auf die FL hat, vorliege.

Anzumerken ist, dass dies nur die Vergangenheitswerte darstellt. Somit zeigt sich, dass nach aktuellem Stand keine kritischen Werte in diesem Wertebereich vorliegen. Nichtsdestotrotz sollte die Thematik aufgrund der ansteigenden Temperaturen weiterhin als ein realistisches Szenario betrachtet werden. Insbesondere die Normungsgremien müssen auf diese möglichen Events aufmerksam gemacht werden und Schritte diskutieren, die eine Anpassung und Erweiterung der bestehenden Regularien umfasst.

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Paper zeigt zwei ausgewählte, anonymisierte Arbeitspakete aus der Zusammenarbeit mit der SNH im Rahmen des Projektes „Anpassungen an den Klimawandel“. Dieses hat eine große Zahl von Detailuntersuchungen initiiert und in Zusammenarbeit mit SNH umgesetzt [9]. Die beiden vorgestellten Arbeitspakete, zeigen wie vielfältig der Einfluss des Klimawandels auf Infrastrukturen und hier Assets eines Verteilnetzbetreibers sind. Nicht nur die Temperatur, auch Entwicklungen der Windgeschwindigkeit, Extremwetterereignisse, stetige Änderungen der Bodenfeuchtigkeit und –temperatur, Vegetationsveränderungen oder auch der Anstieg des Meeresspiegels bzw. der Meerestemperatur, die zu häufigeren Hochwasserereignissen führen können, haben Einfluss auf die Risikobewertung und Betriebsfähigkeit der Assets.

Im Projekt ist es gelungen, digitale Kartenwerke mit dem Netzdokumentationssystem der SNH zu verknüpfen, um auf zusätzliche Informationen zugreifen zu können. Weiterhin konnte im Projekt ein Informationsblatt entworfen werden, um Netzanschlussnutzern und Bürgern die Gefahren bei Starkregen und Überschwemmungen nahe zu bringen und Hinweise zur Beseitigung von Schäden in Kundenanlagen gegeben. Insbesondere das Interesse weiterer Verteilnetzbetreiber und Stadtwerke über den Verlauf des Projektes hat gezeigt, dass das Projekt bundesweit Vorbildcharakter hat. Zugleich kann weiterer Untersuchungsbedarf identifiziert werden.

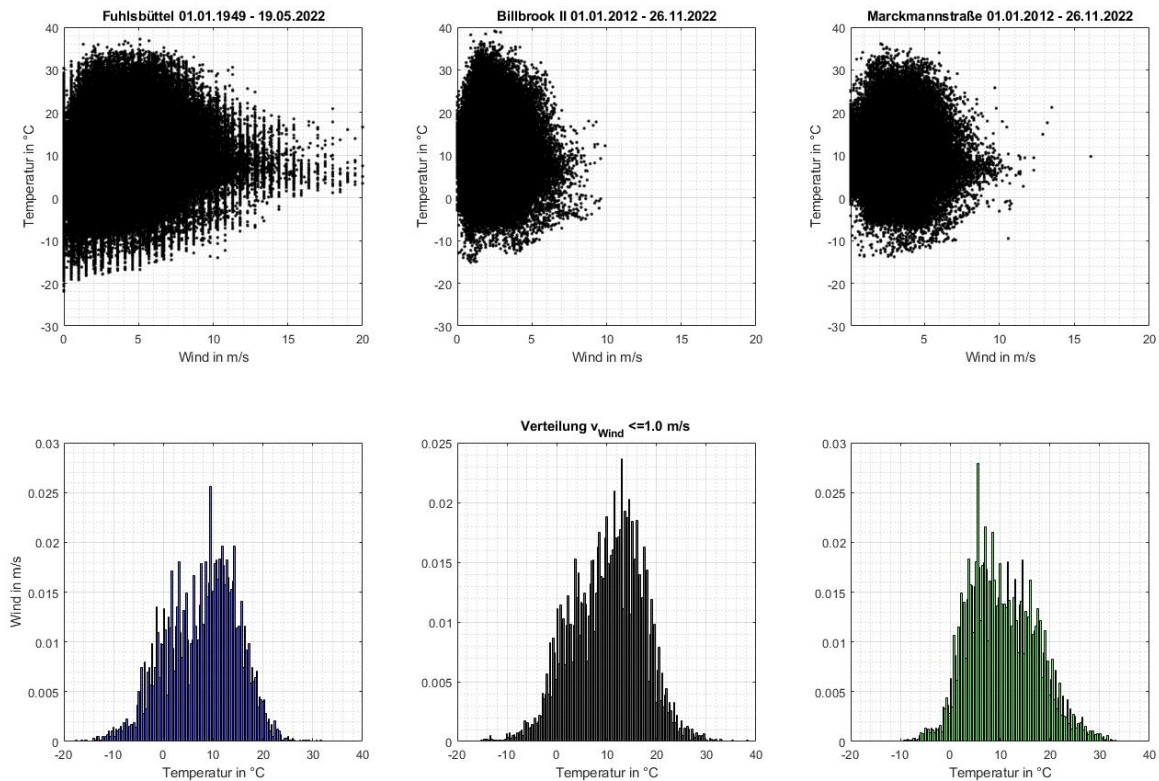


ABBILDUNG 8: VERGLEICH DER JEWEILIGEN STATIONEN UND MESSZEITRÄUME FÜR DIE ENTWICKLUNG DER TEMPERATUR UND WINDGESCHWINDIGKEIT (OBEN), VERTEILUNGSFUNKTION DER TEMPERATUR FÜR WINDGESCHWINDIGKEITEN $v \leq 1$ M/S.

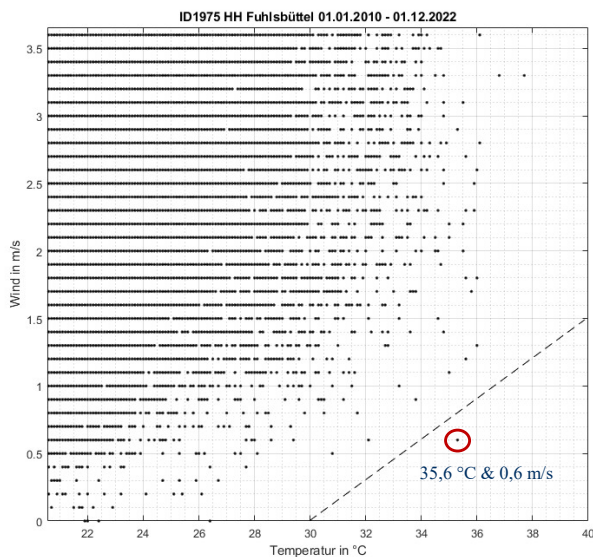


ABBILDUNG 9: TEMPERATUR UND WINDGESCHWINDIGKEIT IN 10-MIN AUFLÖSUNG FÜR DIE MESSSTATION FUHSBÜTTEL.

LITERATUR

- [1] Plenz, M.; Heider, F.; Schulz, D. (2022): *Multivariate Analyseverfahren zur Bewertung der Einflüsse des Klimawandels auf umbaute Umspannwerke*, In: Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz – Analyse, Digitalisierung und Flexibilisierung von Energiemärkten, Elektromobilität, Sektorenkopplung, Elektroenergienetzen und Wasserstoffsystemen, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Professur für Elektrische Energiesysteme, Hamburg, Dezember 2022, Bd. 4, S. 107-115, ISSN (Druck) 978-3-86818-252-1, ISBN (Druck) 2698-8798, ISSN (Online) 2698-8801, ISBN (Online) 978-3-86818-253-8, DOI: 10.24405/14597.
- [2] Weiser, U. (2012): *Methode zur Korrektur von Neigungsfehlern bei der zeitlichen Albedo-Messung an wolkenlosen Tagen*, MSc thesis, University of Vienna, Vienna, Austria, 2012..
- [3] Warren S. & Wiscombe W. (1980): *A Model for the Spectral Albedo of Snow, II: Snow Containing Atmospheric Aerosols*, Journal of the Atmospheric Sciences 37, 273.
- [4] Hoffmann, C., Geissler, A. (2022) : *Baumaterialien für Städte im Klimawandel – Materialkatalog mit Empfehlungen*, Kanton Basel
- [5] MGBC (Hrsg.), THERMAL PROPERTIES & SOLAR REFLECTANCE INDEX BASED ON MS2680, URL: http://www.mgbc.org.my/Downloads/20180130-GBI-Pro-MS-2680-Advance-OTTV/05_Thermal_Properties_&_Solar_Reflectance_Index_%28Nic_Chin_Yee_Choong%29.pdf, [Abgerufen am: 18.11.2022]
- [6] CIGRE (Hrsg.) (2014) : *Guide for thermal rating calculations of overhead lines*, Cigré TB 601, December 2014.
- [7] Tennet (Hrsg.): *Freileitungsmonitoring Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb*, URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjno4ukov8AhWwQ_EDHad5CjEQFnoECB4QAQ&url=https%3A%2F%2Fnetztransparenz.tennet.eu%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FCompany%2FPublications%2FCorporate_Brochures%2FFreileitungsmonitoring.pdf&usq=AOvVaw3qAk7DmB66g88F7TzZ8LuH, [Abgerufen am: 18.11.2022]
- [8] DWD (2021): *Klimareport Hamburg*; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 56 Seiten.
- [9] Niechziol, R., Plenz, M. (2023): *Stromnetz Hamburg passt sich dem Klimawandel an*. Zeitschrift für Kommunale Wirtschaft (ZFK), Juli 2023, Ausgabe 7, S.13.