BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Veenker Ingenieure

Verbundvorhaben:

Sektorenkopplung Integritätsmanagementsysteme – Entwicklung eines Verfahrens zur sektorengekoppelten Zustandsbewertung von Strom- und Gasnetzen

Schlussbericht zum Projekt: Sektorenkopplung Integritätsmanagementsysteme

Förderkennzeichen 03EI3041AB

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Wuppertal den 30. August 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek, Fabian Göbelsmann
Bergische Universität Wuppertal
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Roberto Ferrari
Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH
Heiligengeiststraße 19, 30173 Hannover

Verbundvorhaben:
Sektorenkopplung Integritätsmanagementsysteme – Entwicklung eines Verfahrens zur sektorengekoppelten Zustandsbewertung von Strom- und Gasnetzen

Kurzfassung Schlussbericht zum Projekt: Sektorenkopplung Integritätsmanagementsysteme

Förderkennzeichen 03EI3041AB

1 Aufgabenstellung und Stand der Technik

Zum Gelingen der Energiewende und zur effizienten Dekarbonisierung ist eine Kopplung der Sektoren unerlässlich. Während das Stromnetz in Deutschland durch eine flächendeckende Kapazitätsausbauplanung stetig verstärkt wird, erfährt das Gasnetz einen perspektivischen gezielten Rückbau. Der Kostendruck auf Verteilnetzbetreiber steigt immer weiter an. Um dieser Herausforderungen zu begegnen, wird es in Zukunft auf eine sehr effiziente Bewirtschaftung der Energienetze (hier Strom und Gas) ankommen.

Das Asset-Management bei Verteilnetzbetreibern arbeitet derzeit vielfach mit einer ereignis- oder zeitorientierten Strategie zur Bewirtschaftung der Betriebsmittel. Dies Vorgehen birgt die Gefahr, dass Betriebsmittel entweder zu spät nach einem Ausfall oder zu früh instandgehalten respektive erneuert werden. Dies führt zu Gefahren von Versorgungsunterbrechungen und ist ökonomisch ineffizient. Eine Lösung ist die zustandsorientierte Strategie, bei welcher Betriebsmittel kontinuierlich überwacht und geeignete Maßnahmen zur Verlängerung der Nutzungsdauer durchgeführt werden, sofern keine gänzliche Erneuerung angezeigt wird. Um den exakten IST-Zustand von Betriebsmitteln mittels Zustandshinweisen zu erfassen, geeigneter Bewertungssystematiken zu aggregieren und schlussendlich eine realitätsgerechte Zustandsbewertung in Form einer spezifischen Kennzahl auszugeben, existieren unterschiedliche Ansätze und Vorgehen.

Der Stand der Technik bei der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln im Strom- und Gasnetz ist in der Forschung weit fortgeschrieben, jedoch bei den Verteilnetzbetreibern noch nicht vollständig etabliert. Darüber hinaus sind die Bewertungsansätze insgesamt sehr heterogen zueinander, da diese auf jeweils ein Betriebsmittel speziell zugeschnitten sind. Diese resultiert in einer mangelhaften Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse sowohl bei den Betriebsmitteln zwischen den Sektoren als auch bei Betriebsmitteln innerhalb eines Sektors.

An dieser Stelle setzt das Verbundvorhaben an, um die strikte Trennung der Bewertungsergebnisse von Betriebsmitteln zu überwinden und eine ganzheitliche Betrachtungsmöglichkeit zu eröffnen. Diese ganzheitliche Betrachtung wird einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende beitragen.

2 Ablauf des Vorhabens

Zum Projektstart wurde zunächst ein Kickoff-Meeting durchgeführt. In diesem Meeting wurden die bisherigen Erkenntnisse der Verbundpartner zum Thema Zustandsbewertung vorgestellt. Darüber hinaus wurden erste Datengrundlagen bei den assoziierten Partnern abgefragt, um ein geeignetes Betriebsmittelportfolio zur Analyse einzugrenzen. Die Datenverfügbarkeit und Datenqualität sind für eine fundierte Zustandsbewertung als hoch einzustufen.

Im ersten Projektjahr wurde die Verschiedenartigkeit beim Vorgehen zur Zustandsbewertung und der resultierenden Zustandskennzahlen von Betriebsmitteln der beiden Sektoren herausgearbeitet. Es wurden verschiedenste Ansätze recherchiert und auf begrenzte Datensätze angewendet, um Vor- und Nachteile dieser Ansätze zu eruieren.

Zu Beginn des zweiten Projektjahres wurde sich im Projektkonsortium darauf verständigt, einen Ansatz zur übergreifenden Zustandsbewertung von Betriebsmitteln auszuwählen, welcher modular auf den bisherigen betriebsmittelscharfen Bewertungen aufsetzt. Dies ist dahingehend erforderlich, da perspektivisch fortlaufend weitere Betriebsmittel in ein sektorengekoppeltes Integritätsmanagementsystem eingepflegt werden sollen. Im weiteren Verlauf des Jahres wurde erfolgreich eine übergreifende Zustandsbewertung für die Betriebsmittel Netzstationen und Mittelspannungskabel im Stromsektor sowie Hoch- und Mitteldruckleitungen im Gassektor durchgeführt. Die Wahl der Betriebsmittel fiel dabei auf jene Betriebsmittel, welche bei den assoziierten Partnern eine große Datenbasis aufweisen und für den Netzbetrieb von großer Relevanz sind. In den halbjährigen Workshops wurde das Feedback, vor allem der assoziierten Partner, eingeholt. Diese sind mit der einfachen Interpretation und Handhabbarkeit der übergreifenden Zustandsbewertung zufrieden.

Im dritten Projektjahr wurde das sektorengekoppelte Integritätsmanagementsystem um ein Modul zur geeigneten Budgetierung von Instandhaltungs- und Erneuerungsbudgets erweitert, welcher das Gesamtsystem für einen ersten realitätsnahen Einsatz bei den assoziierten Partnern (in diesem Falle ausschließlich Verteilnetzbetreiber) vorbereitet hat. Für den realen Anwendungsfall wurde jeweils ein Untersuchungsgebiet pro assoziiertem Partner abgestimmt. In diesen Untersuchungsgebieten sind jeweils alle analysierten Betriebsmittel vertreten. Die dahinter liegende Stamm- und Messdatenbasis ist sehr hoch. In der Anwendung wurden alle Betriebsmittel in erster Instanz übergreifend bewertet. Ein Erkenntnisgewinn war gesichert, da zum ersten Mal eruiert werden konnte, welche Betriebsmittel (bezogen auf die Untersuchungsgebiete) das höchste technische Erfordernis zum Erhalt von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen aufweisen. Darüber hinaus konnten notwendig werdende Budgets zum Erhalt der hohen Versorgungsqualität der Untersuchungsgebiete berechnet werden. Da diese Budgets in der Realität nicht unmittelbar in voller Höhe zur Verfügung stehen, wurden begrenzte Budgets definiert. Diese wurden auf Basis verschiedener Kriterien, wie beispielsweise

technischer Zustand, Wiederbeschaffungswert oder eine Maximierung bzw. Minimierung gleichzeitiger Maßnahmen auf die verschiedenen Betriebsmittel der Untersuchungsgebiete verteilt. So sind priorisierte Listen entstanden, welche eine optimale Abfolge der Maßnahmendurchführung aufzeigen.
An dieser Stelle konnte zum ersten Mal ein sektorenübergreifendes Asset-Management anhand von realen Betriebsmitteln angewendet werden. Das System ist an dieser Stelle beliebig zu erweitern, sodass auch perspektivische weitere Betriebsmittel aus mitunter anderen Sektoren in die Gesamtsystematik eingepflegt werden können.

3 Wesentliche Erkenntnisse

Die Zustandsbewertung von Betriebsmitteln im Strom- und Gassektor ist zueinander komplett unterschiedlich. Diese Unterschiede zeigen sich auch bei der Betriebsmittelbewertung innerhalb eines Sektors. Eine Vergleichbarkeit der erzielten Bewertungsergebnisse ist somit nicht gegeben. Durch den Aufbau eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems, welches ein Normierungsverfahren für Zustandskennzahlen auf Basis der Z-Standardisierung beinhaltet, können die unterschiedlichen Zustandskennzahlen der Betriebsmittelbewertungen auf einer gemeinsamen Z-Wert-Skala vereinheitlicht werden. Dadurch ist eine unmittelbare Vergleichbarkeit gegeben, da direkt abzulesen ist, welche Betriebsmittel einen vergleichsweise besseren oder schlechteren Zustand aufweisen. Dies eröffnet übergreifende Betrachtungsmöglichkeiten, welche genutzt werden, um eine geeignete Allokation finanzieller und sekundär personeller Ressourcen durchzuführen. Dazu sind zwei Verfahren zur geeigneten Budgetverteilung etabliert worden. In einem ersten Modul des Bottom-Up Ansatzes werden durch vergleichbare Zustandskennzahlen der Betriebsmittel gesamt notwendige Budgets für Instandhaltung und Erneuerung berechnet. Dies spiegelt in der Anwendung einen tatsächlichen Budgetbedarf wider, um die Qualität der Energienetze auf einem konstant hohen Niveau zu halten. In einem weiteren Modul des Top-Down-Ansatzes wird ein vorgegebenes begrenztes Budget oder personelle Verfügbarkeiten geeignet auf jene Betriebsmittel konzentriert, welche das größte technische Erfordernis haben. Die Kenntnis des größten technischen Erfordernisses ist ebenfalls aus der übergreifenden Betrachtungsweise standardisierter Zustandskennzahlen gegeben. Da eine technische Betrachtungsweise für eine optimale Bewirtschaftung von Betriebsmitteln alleine nicht ausreichend ist, sind weitere Varianten zur Verteilung begrenzter Ressourcen eingeführt, welche beispielsweise Wiederbeschaffungswerte der Betriebsmittel oder weiche Faktoren wie die parallele Beantragung von Genehmigungen zum Aufbruch beim Tiefbau berücksichtigen. Diese weiteren Einflussfaktoren führen zu einer angepassten Abfolge bei der Durchführung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen an den Betriebsmittelkollektiven.

Inhaltsverzeichnis

1 AUFGABENSTELLUNG UND STAND DER TECHNIK II

2 ABLAUF DES VORHABENS III

3 WESENTLICHE ERKENNTNISSE IV

ABBILDUNGSVERZEICHNIS VI

4 EINGEHENDE DARSTELLUNG 1

4.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DAS ERZIELTE ERGEBNIS IM EINZELNEN MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER VORGEGEBENEN ZIELE 1

4.1.1 Arbeitspaket 1: Grundlagen bisheriger Integritätsmanagementsysteme 1

4.1.2 Arbeitspaket 2: Grundlagen eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems 5

4.1.3 Arbeitspaket 3: Bewertungssystematik eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems ... 7

4.1.4 Arbeitspaket 4: Anwendungsprüfung 13

4.1.5 Arbeitspaket 5: Projektorganisation 20

5 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES 21

6 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN 21

7 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES 22

8 BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN 23

9 ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES NACH NR. 5 DER NABF 23

9.1.1 Erfolgte, projektbezogene Veröffentlichungen 23

9.1.2 Geplante, projektbezogene Veröffentlichungen 24

10 LITERATURVERZEICHNIS 25

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ZUSTANDSKENNZAHLEN BISHERIGER INTEGRITÄTSMANAGEMENTSYSTEME 5
ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHER AUFBAU EINES SEKTORENGEKOPPELTEN INTEGRITÄTSMANAGEMENTSYSTEMS 6
ABBILDUNG 3: PROZESSABLAUF DES SEKTORENGEKOPPELTEN INTEGRITÄTSMANAGEMENTSYSTEMS 8
ABBILDUNG 4: VARIANTEN ZUR OPTIMALEN BEWIRTSCHAFTUNG VON BETRIEBSMITTELN 10
ABBILDUNG 5: PRIORISIERUNGSKRITERIEN FÜR DEN TOP-DOWN ANSATZ: 11
ABBILDUNG 6: SCHEMATISCHE ÜBERSICHT ÜBER EINES DER TESTNETZGEBIETE 13
ABBILDUNG 7: SEKTORENÜBERGREIFENDE ZUSTANDSBEWERTUNG 14
ABBILDUNG 8: QUANTIFIZIERUNG DES BEDARFS NACH MAßNAHMEN 15
ABBILDUNG 9: BETRIEBSMITTELSCHARFE MAßNAHMENKOSTEN 16
ABBILDUNG 10: PRIORISIERUNG AUF BASIS DER ZUSTANDSWERTE 17
ABBILDUNG 11: PRIORISIERUNG AUF BASIS DES ZUSTANDS 18
ABBILDUNG 12: UNTERSCHIEDLICHKEIT DER BUDGETVERTEILUNG 19
ABBILDUNG 13: RESULTIERENDE MAßNAHMENKOSTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER BUDGETIERUNGSKRITERIEN 20

4 Eingehende Darstellung

Dieses Kapitel liefert einen ausführlichen Bericht über das Projekt. Dabei wird die Verwendung der finanziellen Mittel und die erreichten Resultate im Detail dargestellt, einschließlich eines Vergleichs mit den gesetzten Zielen. Weiterhin werden die wichtigsten Posten des finanziellen Nachweises, die Erforderlichkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten, der zu erwartende Nutzen und die Anwendbarkeit der Ergebnisse, der Fortschritt in ähnlichen Projekten bei anderen Institutionen sowie die bereits erfolgten und noch geplanten Veröffentlichungen beschrieben.

4.1 Verwendung der Zuwendung und das erzielte Ergebnis im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

4.1.1 Arbeitspaket 1: Grundlagen bisheriger Integritätsmanagementsysteme

In AP 1 wurde in erster Instanz das Strom- und Gasnetz der Bundesrepublik Deutschland (BRD) hinsichtlich der verwendeten Betriebsmittel detailliert analysiert. Dazu wurden Vergleiche über übliche Netzstrukturen, aktuelle und zukünftige Versorgungsaufgaben sowie Redundanzen und Sicherheitsmaßnahmen angestellt. Für das Projekt haben sich seitens des Stromsektors sowohl ein Punkt- als auch ein Linienobjekt als relevant und sehr geeignet zur Berücksichtigung herausgestellt. Seitens des Gassektors haben sich zwei Linienobjekte als höchst relevant und sehr geeignet für das vorliegende Projekt ergeben. Die verschiedenen ausgewählten Betriebsmitteltypen wurden darüber hinaus im gesamten Projektkonsortium abgestimmt. Die betrachteten Betriebsmittel sind:

- Netzstationen
- Mittelspannungskabel
- Hochdruckleitungen
- Mittel- und Niederdruckleitungen

Bei den assoziierten Partnern war außerdem der große Vorteil gegeben, dass zu den gewählten Betriebsmitteln auch große statistisch belastbare Datenmengen hinterlegt waren. Für das Projekt notwendige Daten bestanden aus Stammdaten (Typ, Alter, Bemessungsleistung, …) und Zustandshinweisen, bestehend aus visuellen Inspektionen und Ergebnissen von diagnostischen Messungen.

Die große Datenverfügbarkeit bei den assoziierten Partnern war jedoch nur eine wichtige Nebenbedingung bei der Auswahl geeigneter Betriebsmittelkollektive. Die Hauptargumente zur Fokussierung auf einzelnen Betriebsmitteln werden im Folgenden betriebsmittelscharf näher erläutert.

Netzstationen

In vorangegangenen Forschungsprojekten konnte nachgewiesen werden, dass der Gesamtbestand an Netzstationen in der BRD zu großen Teilen am prognostizierten Ende ihrer technischen Nutzungsdauer angekommen ist. Aktuell sind in der BRD 632.589 Netzstationen installiert [1]. Durch eine Knappheit an technischem Material und geschultem Personal ist eine komplette Erneuerung des kritischen Bestandes nicht umsetzbar. Es wird daher in den nächsten Jahren auf eine geeignete Priorisierung von Netzstationen, die zwingend erneuert werden müssen, ankommen. Das Etablieren einer geeigneten zeitlichen Reihenfolge ist damit unabdingbar. Ebenfalls ist ein gezielter Einsatz an Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sinnvoll, um nutzungsdauerverlängernde Maßnahmen gezielt auszurollen. Damit kann der Bestand an Netzstationen, welche in einem ähnlichen kleinen Zeitschritt parallel erneuert werden müssten, drastisch reduziert werden [2].

Mittelspannungskabel

Das Mittelspannungskabelnetz in der BRD hat eine Stromkreislänge von 446.818 km [1], was bei einem Vermuffungsgrad von 6,3 Muffen pro km Mittelspannungskabel zusammen mit den notwendigen Endverschlüssen an den Kabelenden ein riesiges Betriebsmittelkollektiv ergibt. Vor dem Hintergrund der stark gestiegenen Tiefbaukosten, welche bei der Kabelverlegung anfallen, sind die Mittelspannungskabelanlagen das wertwichtigste Einzelbetriebsmittel im Stromnetz [3]. Ferner wird das gesamte Störungsgeschehen im Stromnetz zu ca. 78 % durch das Ausfallverhalten von Mittelspannungskabelanlagen bestimmt [4], sodass die aktuelle hohe Versorgungszuverlässigkeit stark abhängig vom Zustand des Mittelspannungskabelnetzes ist. Um diese weiterhin hochzuhalten, müssen die Mittelspannungskabelanlagen in einem guten Zustand sein. Die Kombination aus maximaler Wertwichtigkeit sowie starkem Einfluss auf die Versorgungszuverlässigkeit ist eine exakte Zustandsbewertung sowie eine realitätsgerechte Prognose der verbliebenen restlichen technischen Nutzungsdauer von Mittelspannungskabelanlagen von primärer Relevanz. Darüber hinaus ist eine kosteneffiziente Bewirtschaftung des Mittelspannungskabelnetzes ein deutlicher Einflussfaktor auf die zukünftigen Netzentgelte. Eine Konstanthaltung der Netzentgelte hat einen positiven Einfluss auf den Erhalt des Wirtschaftsstandortes Deutschland.

Hoch-, Mittel- und Niederdruckleitungen

Das Gasnetz in der BRD erfährt im Rahmen der Energiewende und dem Streben nach Emissionsneutralität einen strategischen Rückbau. Davon sind besonders alle Rohrleitungssysteme der verschiedenen Druckstufen betroffen. Um den Rückbau so strategisch wie möglich abzuwickeln, ist hier eine flächendeckende Zustandsbewertung der Rohrleitungssysteme zwingend notwendig. Im Falle von Unkenntnis des Zustands werden im ungünstigsten Fall schlechte (bezogen auf den Zustand) Leitungen in Betrieb belassen, während gute Leitungen außer Betrieb gesetzt werden. Dies würde zu Erneuerungskosten

führen, welche vermeidbar sind. Des Weiteren wird aktuell der Aufbau eines H2-Backbones vorangetrieben, wobei bestehende Erdgasleitungen für eine Wasserstoffnutzung umgewidmet werden. Die Nutzung von Wasserstoff ist für industrielle Abnehmer als Substitut für Methan von hohem Interesse. Eine Umwidmung von Erdgasleitungen auf Wasserstoff kann in erster Instanz nur erfolgen, sofern der Werkstoff der Leitungen dafür geeignet ist. In nächster Instanz ist bei Stahlleitungen der Zustand der Leitung für eine Fähigkeit zu Umwidmung essenziell, da vorbelastete Stahlleitungen mit initialen, kleinen Rissen mit einer starken Rissfortbildung reagieren, wenn diese mit Wasserstoff beaufschlagt werden. Daher muss vor jeder Umwidmung zwangsläufig eine geeignete Zustandsbewertung der Leitung stattfinden. [5]

Das Vorgehen bei der Zustandsbewertung der verschiedenen Betriebsmittel ist sehr spezifisch ausgelegt. Es existieren verschiedene Ansätze und Bewertungssystematiken, welche Zustandshinweise geeignet zu aussagekräftigen Kennzahlen aggregieren. Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Zustandsbewertung von den im Projekt betrachteten Betriebsmitteln skizziert. Dabei ist festzuhalten, dass es auch noch andere Bewertungsansätze für die verschiedenen Betriebsmittel gibt. Die Bewertungssystematiken der Verbundpartner bei der Zustandsbewertung sind damit nicht gänzlich allgemeingültig diese können bei vergleichbaren Ansätzen auch anders ausgelegt sein [6].

Die Zustandsbewertung von Netzstationen erfolgt auf einer Aufnahme von Ergebnissen der visuellen Inspektion. Dabei wird mittels einer systematischen Checkliste die entsprechende Netzstation anhand von über 40 Kriterien bewertet. Diese Kriterien beziehen sich auf die Hauptkomponenten einer Netzstation, das Gebäude bzw. Gehäuse, die Mittelspannungsschaltanlage, der Verteiltransformator sowie die Niederspannungsverteilung. Die Bewertung der einzelnen Kriterien läuft in einem Schulnotensystem von Note 1 (sehr gut) bis Note 4 (sehr schlecht) ab. Zur Aggregation wird auf der Ebene der Hauptkomponenten mithilfe des Worst-Case-Operators das schlechteste Teilergebnis hoch aggregiert. Danach wird mittels geeigneter Gewichtungsfaktoren [7] aus den vier Noten auf der Hauptkomponentenebene eine resultierende Gesamtnote gebildet.

Da Mittelspannungskabel als Linienobjekte bis auf die Endverschlüsse vergraben sind, ist eine Zustandsbewertung auf Basis einer visuellen Inspektion nur sehr bedingt hilfreich. Daher werden für dieses Betriebsmittel diagnostische Messverfahren zur Kollektion von Zustandshinweisen genutzt. Einerseits wird die Teilentladungsmessung angewendet, welche einen Überblick über die verbliebene Isolationsqualität, respektive die Degradation dieser, über die gesamte Kabelstrecke in integraler Form ausgibt. Andererseits kommt die Teilentladungsmessung zum Einsatz, wodurch sich androhende Defektstellen in der Isolation sehr ortsaufgelöst analysieren lassen. Da die beiden Messergebnisse auf komplett unterschiedlichen Skalen abgebildet sind, werden diese zuerst in Massezahlen (Nutzungsvorrat, Substanzverlust und Unsicherheit) der Evidenz-Theorie übersetzt. Diese

übersetzten Massezahlen werden nun mittels geeigneter Kombinationsregeln zu einer resultierenden Massezahl auf Ebene des gesamten Mittelspannungskabels aggregiert. Ein Fehlen eines Messergebnisses wird mit einer vollständigen Unsicherheit (Massezahl für Unsicherheit bei 100 %) berücksichtigt. Um eine Zustandskennzahl zu erhalten wird die Nutzungsvorrat und die Hälfte der Unsicherheit, was einer risikoneutralen Anwendersicht entspricht, aufaddiert. Da die Hälfte der Unsicherheit zur Bildung der Zustandskennzahl inkludiert wird, wird diese schlussendlich mittlerer Zustandsindex genannt. [8]

Die untersuchten Hochdruckleitungen sind als Linienobjekte ebenfalls vergraben ausgeführt. Für die Zustandsbewertung werden gemäß der hinterlegten Systematik sowohl Daten aus Messungen als auch Stammdaten sowie Umgebungsdaten verwendet. Als Messung liefert die Inline-Inspektion detaillierten Aufschluss über die Beschaffenheit einer Stahlleitung im Inneren, wodurch sich Schwachstellen oder Risse detektieren lassen. Auswertungen des Systems zum kathodischen Korrosionsschutz können, da über Jahre aufgezeichnet, einen erhöhten Schutzstrombedarf und damit fortschreitende Korrosion detektieren. Dabei ist eine lokale Auflösung möglich. Zudem können Oberflächennutzungsdaten oder geologische Analysen anhand von Proben zur Bodenbeschaffenheit einbezogen werden. Diese Daten werden als Zusatzlasen klassifiziert. Diese einzelnen Zustandshinweise werden individuell mit geeigneten Verteilungen hinterlegt und numerisch in eine konsolidierte Versagenswahrscheinlichkeit aggregiert. Hochdruckleitungen sind das einzige hier analysierte Betriebsmittel wozu normative Grenzwerte vorliegen. Anhand dieser ist eine Zuordnung in verschiedene Sicherheitsklassen möglich. [9, 10]

Eine Zustandsbewertung von Mittel- und Niederdruckleitungen folgt im Wesentlichen der von Hochdruckleitungen, mit dem Unterschied, dass keine Messergebnisse (Inline-Inspektion und Schutzstromauswertung) aufgrund des geringeren Rohrdurchmessers und des Werkstoffs erhoben werden können. Jedoch können jegliche als Zusatzlasten definierten Bewertungspunkte angesetzt und eine Risikobewertung angestellt werden. Diese Risikobewertung vergleicht die Wahrscheinlichkeit eines Betriebsmittelausfalls mit den Neubaukosten für dieses, um so eine kostengewichtete Ausfallwahrscheinlichkeit auszugeben. Anhand dieser Kennzahl werden jegliche Leitungen der unteren Druckstufen bewertet. [11]

Die unterschiedlichen Zustandshinweise, welche bei der Betriebsmittelbewertung genutzt und mittels spezifischer Bewertungssystematik aggregiert werden, ergeben unterschiedliche Zustandskennzahlen. Ein kleiner Auszug der resultierenden Zustandskennzahlen ist in Abbildung 1 dargestellt.

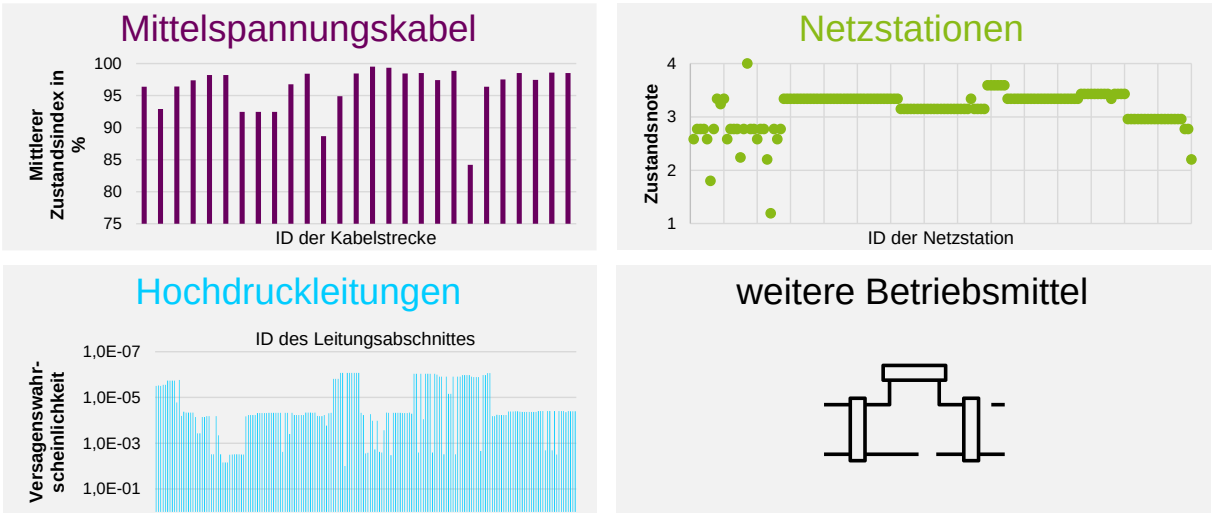

Abbildung 1: Zustandskennzahlen bisheriger Integritätsmanagementsysteme

Dabei wird die primär identifizierte Problemstellung schnell deutlich. Bei dem Versuch, die verschiedenen Zustandsbewertungsergebnisse vergleichend zu betrachten, ist keine Interpretierbarkeit gegeben. Es ist nicht ersichtlich, ob ein mittlerer Zustandsindex von 80 % bei einer Mittelspannungskabelbewertung besser oder schlechter als die Zustandsnote 1,7 einer Netzstation ist. Die resultierenden Versagenswahrscheinlichkeiten bei den Hochdruckleitungen können überhaupt nicht mit den Zustandsaussagen der Betriebsmittel im Stromsektor in Bezug gesetzt werden. Selbst wenn einschlägiges Expertenwissen vorliegt, können bestenfalls grobe Abschätzungen gemacht werden, welches Betriebsmittel vergleichsweise in einem besseren oder schlechteren Zustand ist. Werden dann noch weitere Betriebsmittel mit eigenen Bewertungen inkludiert, mit wiederum spezifischen Zustandskennzahlen, können auch keine rudimentären Abschätzungen vorgenommen werden.

4.1.2 Arbeitspaket 2: Grundlagen eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems

Zum Aufbau eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems standen am Anfang des Projekts zwei Varianten zur Prüfung. Der erste Ansatz bestand darin, eine vollumfängliche Bewertungssystematik aufzubauen, welche alle erfassten Zustandshinweise der einzelnen Betriebsmittel aufnimmt und mit einer einheitlichen Aggregationsvorschrift in gleichnamige Zustandskennzahlen übersetzt. Dadurch könnte eine Vergleichbarkeit der Zustandsbewertung über die betrachteten Betriebsmittel und Sektoren hinweg geschaffen werden. Jedoch bringt dieses Vorgehen zwei entscheidende Nachteile mit sich. Einerseits würden so die spezifischen Bewertungssystematiken redundant gemacht werden und Fach- sowie Detailwissen bezüglich der Bewertung einzelner Betriebsmittel würde verloren gehen. Dies führt unweigerlich zu einem Qualitätsverlust der Aussagekraft der Zustandskennzahlen. Andererseits würde ein solches System nur auf die im Projekt verwendeten Bewertungssystematiken der einzelnen

Betriebsmittel kalibriert sein. Sobald die spezifischen Bewertungssystematiken nachgeschärft werden oder das sektorenkoppelte Integritätsmanagementsystem um weitere Betriebsmittel ergänzt wird, würde ein erheblicher Anpassungsbedarf getriggert, welcher im Anwendungsfeld der Netzbetreiber nicht leistbar ist. Daher wurde dieser Ansatz nach eingehender Diskussion im Konsortium verworfen.

Ein deutlich zielführender Ansatz ist der Aufbau eines modularen, sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems. Dabei wird das Fachwissen um die Zustandsbewertung einzelner Betriebsmittel beibehalten und anpassungsfrei integriert. Ebenfalls bleiben die spezifischen Bewertungssystematiken betriebsmittelscharf erhalten, was die Aussagekraft und Tiefe der Zustandsbewertung vollkommen erhält. Eine Kopplung der Zustandsaussagen der verschiedenen Betriebsmittel wird erst auf der höchsten Ebene der Zustandskennzahlen vorgenommen, indem diese miteinander vergleichbar gemacht werden. Zudem eröffnet dies die Möglichkeit, beliebig weitere Sektoren und Betriebsmittel in diese Gesamtsystematik zu integrieren, sofern dedizierte Zustandskennzahlen für diese vorliegen. Ein schematischer Aufbau des entwickelten sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems ist in Abbildung 2 gezeigt.

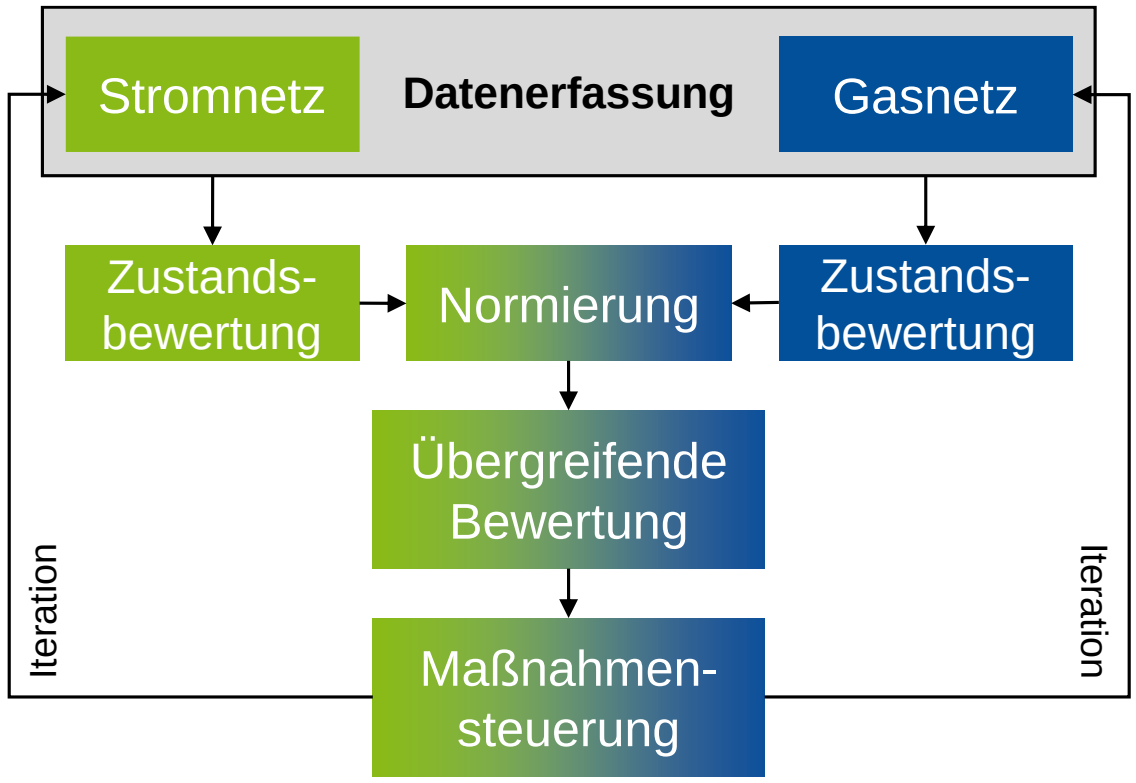

Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems

Ein sektorengekoppeltes Integritätsmanagementsystem soll auf dem Prinzip einer integrierten Gegenstromplanung aufgebaut sein. Im ersten Schritt werden für alle Betriebsmittel geeignete Zustandshinweise als Eingangsdaten erfasst. Danach erfolgt eine Aggregation zu einer

Zustandskennzahl mittels spezifischer Bewertungssystematiken. Diese Zustandskennzahlen finden indessen Eingang in ein Normierungsverfahren, welches die Möglichkeit einer übergreifenden Bewertung eröffnet. Auf dieser Basis werden Maßnahmen der Instandhaltung und Erneuerung geplant und durchgeführt. Das Ergebnis dieser Maßnahmendurchführung wird nun wieder in den Stamm- und Zustandsdatensatz integriert, da die übergreifende Zustandsbewertung ein iterativer Prozess ist, welcher kontinuierlich im Zeitverlauf durchgeführt werden muss.

Eine weitere wichtige Eigenschaft für ein sektorengekoppeltes Integritätsmanagementsystem ist die Fähigkeit, aus einer übergreifenden Zustandsbewertung gezielt Maßnahmen für die optimale Bewirtschaftung der Betriebsmittel abzuleiten. Das bedeutet, dass vergleichsweise schlechte Betriebsmittel sektorenübergreifend identifiziert und vorgezogen instandgehalten werden. Im Verlauf sind priorisierte Listen aufzubauen, welche die Maßnahmenabfolge der Betriebsmittelinstandhaltung in eine geeignete zeitliche Abfolge bringt, da finanzielle und personelle Ressourcen im Netzbetrieb nur begrenzt zur Verfügung stehen. Aus diesen als notwendig identifizierten Maßnahmen ergeben sich die resultierenden Budgets für die Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung, welche im Verlauf zielgerichtet allokiert werden müssen. Dieser ganze Prozess soll sektorenübergreifend stattfinden, was an dieser Stelle ein Novum für den Netzbetrieb darstellt.

4.1.3 Arbeitspaket 3: Bewertungssystematik eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems

Da in AP 2 beschlossen wurde, keine vollumfängliche Bewertungssystematik für alle betrachteten Betriebsmittel aufzusetzen, sondern ein System zur Normierung der betriebsmittelspezifischen Zustandskennzahlen aufzubauen, wird dieser Aufbau in kommenden Abschnitt näher erläutert.

Bei dem sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystem handelt es sich in erster Instanz um ein Verfahren zur Generation von übergreifenden Zustandskennzahlen. Dabei werden zur Normierung von betriebsmittelscharfen Zustandskennzahlen diverse Teilschritte notwendig. Die Modularität ist so stark ausgeprägt, dass dieses beliebig um weitere Betriebsmittel ergänzt und unmittelbar im Anwendungsfeld der Netzbetreiber eingesetzt werden kann. Der Prozessablauf im Kern des sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Ende des Prozesses ist hierbei das Ausgeben einer sektorenübergreifenden Zustandskennzahl. Jedoch findet diese Kennzahl Eingang in ein weiteres Modul zur optimalen Bewirtschaftung von Betriebsmitteln und der bestmöglichen Allokation von personellen und finanziellen Ressourcen. Das gerade definierte Asset-Management Modul ist ebenfalls modular aufgebaut, sodass auch eine Erweiterung und direkte Verwendung möglich ist.

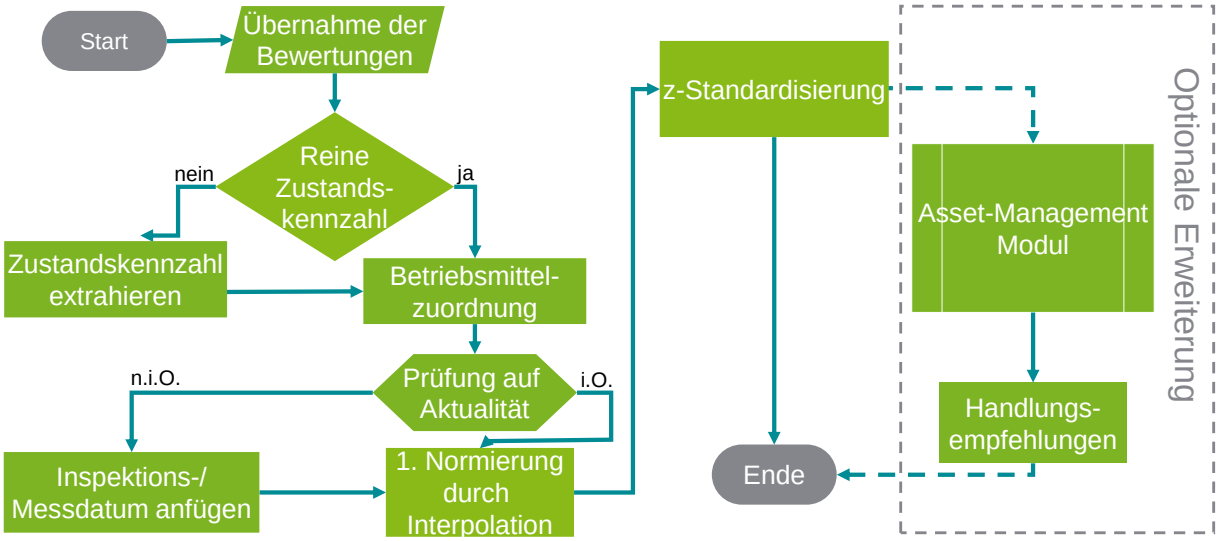

Abbildung 3: Prozessablauf des sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems

Der generelle Prozessablauf beginnt mit der Übernahme der finalen Zustandskennzahlen aus den vorgestellten betriebsmittelscharfen Bewertungssystematiken. Zuerst wird eine Prüfung vorgenommen, ob es sich hierbei um eine reine Zustandskennzahl handelt. Wenn das nicht der Fall ist, sind Korrekturen notwendig, welche diese Einflüsse wieder beseitigen. Daraufhin wird eine scharfe Zuordnung zu einem Betriebsmittel vorgenommen, um eine permanente Verknüpfung von Bewertungsergebnissen zu gewährleisten. Punktobjekte werden mit einer Bewertung pro Betriebsmittel bedacht. Linienobjekte werden in Abschnitte unterteilt. Jeder Abschnitt bekommt dann eine eigene Zustandskennzahl zugeordnet. Die Abschnittslängen und auch deren generelle -bildung sind spezifisch und werden beibehalten. Um dieses Vorgehen redundant abzusichern, ist eine erneute Prüfung implementiert. Als erster Kernschritt zur Normierung von Zustandskennzahlen ist eine Interpolation vorgesehen. Dabei wird der theoretisch besten Bewertung eine Kennzahl von 100 % zugeordnet und der schlechtesten Bewertung eine Kennzahl von 0 %. Dieser Schritt ist für die Anwendung der z-Standardisierung nicht zwingend notwendig, sortiert aber die Eingangsbewertungen in eine einfach interpretierbare Reihenfolge. Als Beispiel sei hier angefügt, dass bei Bewertungen im Schulnotensystem die kleinen Noten gute Ergebnisse repräsentieren, aber in anderen Skalen hohe Zahlenwerte die guten Ergebnisse spiegeln. Durch die Normierung wird dies angeglichen. Als Hauptaspekt zur Normierung wird eine z-Standardisierung pro Betriebsmittelgruppe durchgeführt. Dabei werden zuerst die Lageparameter arithmetisches Mittel sowie die Standabweichung des Kollektivs an Bewertungen berechnet. Daraufhin wird eine Subtraktion des arithmetischen Mittels von jeder Merkmalsausprägung (einzelne Bewertung) durchgeführt und die resultierende Differenz dann durch die Standardabweichung dividiert. Somit wird für jede Bewertung der Abstand vom Mittelwert basierend auf der durchschnittlichen Streuung der Verteilung betrachtet. Dadurch wird eine Unabhängigkeit von

der eingangs verwendeten Skala geschaffen. Die erzeugten Zustandskennzahlen werden als z-Werte bezeichnet und sind dimensionslos in einer übergreifenden Skala verortet. Die Ursprungsskala geht bei diesem Schritt verloren. Durch Anwendung der z-Standardisierung auf ganze Bewertungen von Betriebsmittelgruppen wird die Eingangsverteilung in eine Ausgangsverteilung mit dem Mittelwert von 0 und einer Standardabweichung von 1 überführt. Die relative Position der Werte sowie die ursprüngliche Verteilungsform bleiben dabei unangetastet und somit erhalten. Nach Fertigstellung dieses Schrittes sind normierte übergreifende Zustandskennzahlen entstanden, die eine direkte Vergleichbarkeit ermöglichen. Optional ist bereits noch ein Modul zur Einordnung und Bewertung der z-Werte implementiert, welches darauf abzielt, Handlungsempfehlungen zur Maßnahmenplanung abzuleiten. Das Scoring-Modell ordnet alle Bewertungen und damit Betriebsmittel in verschiedene Stufen ein. Diese Stufen sind abhängig vom z-Wert gewählt. Generell gilt, je kleiner der z-Wert desto schlechter das relative Ergebnis. Damit ist übersichtlich einzuordnen, welche Betriebsmittel priorisiert mit Maßnahmen der Instandhaltung oder gänzlicher Erneuerung zu versehen sind. Das Bilden von Grenzen, um die jeweiligen Bewertungsstufen voneinander zu differenzieren wird nicht allgemeingültig, sondern dynamisch in Abhängigkeit des vorliegenden Untersuchungsgebietes vorgenommen. Somit lassen sich entstehende priorisierte Listen für jeden Anwender individuell erzeugen und in die Asset-Strategie implementieren. Aus der Prozessabbildung ist ferner ersichtlich, dass für die Anwendbarkeit des Verfahrens nicht zwangsläufig eine tiefgreifende Kenntnis über die eingangs verwendete Bewertungssystematik vorliegen muss. Es ist in erster Instanz ausreichend zu wissen, wie sich die eingangs verwendete Zustandskennzahl zusammensetzt, sodass möglicherweise Korrekturen von Einflussfaktoren durchgeführt werden können.

In erster Instanz können übergreifende Kennzahlen generiert und mit fest definierten Grenzwerten in Bezug gesetzt werden. Zur optimalen Bewirtschaftung der Betriebsmittelkollektive wurden im Projekt zwei Ansätze entwickelt, welche es ermöglichen, finanzielle Bedarfe für Instandhaltung und Erneuerung zu ermitteln. Da der tatsächliche Budgetbedarf in der Praxis mitunter deutlich höher ist als die Verfügbarkeit finanzieller Mittel, muss eine geeignete Verteilung eines begrenzten Budgets stattfinden. Dies kann ebenfalls realisiert werden. In der Abbildung 4 sind die beiden Ansätze. Der Bottom-Up Ansatz ermöglicht die Ermittlung des eigentlichen Budgetbedarfs, welcher zur Aufrechterhaltung der hohen Versorgungszuverlässigkeit im Status Quo vorliegt. Dabei wird systematisch ein Budget berechnet, welches für Instandhaltung und Erneuerung benötigt wird. Der Top-Down Ansatz bietet die Möglichkeit, ein begrenztes Budget auf Basis verschiedener Kriterien zielgerichtet auf die Sektoren und Betriebsmittel zu allokieren. Dabei wird ein vorgegebenes Budget bestmöglich verwendet.

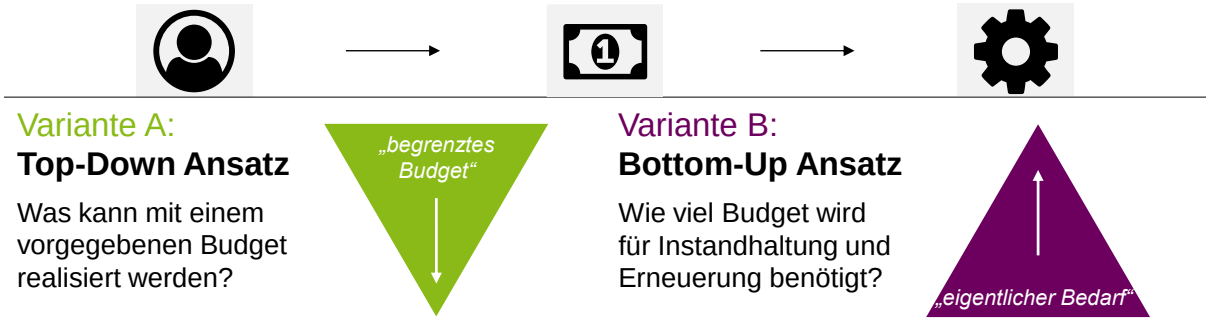

Abbildung 4: Varianten zur optimalen Bewirtschaftung von Betriebsmitteln

Bottom-Up Ansatz:

Beim Bottom-Up Ansatz soll aufgezeigt werden, welches strategische Budget tatsächlich erforderlich ist, um die Betriebsmittelkollektive in dem aktuellen guten Zustand zu erhalten. Dies gilt sowohl für kurzfristige Maßnahmen (Erneuerung) als auch langfristige Maßnahmen (Instandhaltung). Es wird eine Zustandsgrenze definiert, bis zu dieser Betriebsmittel mit Maßnahmen der Instandhaltung oder Erneuerung versehen werden. Diese Grenze liegt aktuell bei einem z-Wert von 0, da ab dort aufwärts die guten Betriebsmittel einzuordnen sind, welche im Status Quo keinerlei Maßnahmen bedürfen. Nun werden alle Betriebsmittel aufsteigend nach deren Zustand (z-Werten) sortiert, um eine Priorisierungsliste zu erhalten. Diese Liste wird mit den Tagesneuwerten verschnitten, sodass eine Gewichtung der reinen Zustandskennzahlen vorgenommen wird. Als Resultat entsteht ein Zustandswert pro Betriebsmittel, welcher Informationen über sowohl den Zustand als auch die Wichtigkeit enthält. Auf dieser Basis werden anschließend die realen Kosten, welche für Erneuerung (bei besonders kritisch bewerteten Betriebsmitteln) und Instandhaltung (bei weniger kritischen Betriebsmitteln) entstehen, berechnen und aufaddiert. Im Ergebnis entsteht das notwendige Budget pro Betriebsmittel und in Summe für alle Betriebsmittel das notwendige Gesamtbudget.

Top-Down Ansatz:

Bei der Verwendung des Top-Down-Ansatzes wird ein festes Budget für die Durchführung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen vorgegeben, welches im Optimalfall durch den Bottom-Up Ansatz vorher bestimmt wurde. Die Festlegung des zur Verfügung stehenden Budgets erfolgt auf der strategischen Managementebene des Unternehmens. Die Übergabe erfolgt an den Asset-Manager, welcher spartenübergreifend für die einzelnen Betriebsmittel verantwortlich ist. Durch das sektorengekoppelte Integritätsmanagementsystem ist die Priorisierungsliste auf der ersten Ebene ausschlaggebend für die Reihenfolge der Maßnahmendurchführung. Auf der zweiten Ebene sind die tatsächlichen Maßnahmenkosten pro Betriebsmittel gegeben, sodass auf dieser Basis so viele Betriebsmittel mit Maßnahmen versehen werden, bis das vorgegebene Budget verbraucht ist. Dabei wird eine additive

Verknüpfung der tatsächlichen Maßnahmenkosten durchgeführt, welche auf theoretischer Berechnung basiert. Es ist daher nach jeder durchgeführten Maßnahme pro Betriebsmittel zu prüfen wie viele Kosten tatsächlich, bedingt durch unvorhersehbare Ereignisse entstanden sind. Diese tatsächlichen Kosten werden eingepflegt und bei der Berechnung des restlich vorhandenen Budgets angesetzt. Der Prozess ist nach jeder Durchführung pro Betriebsmittel iterativ durchzuführen.

Für die Durchführung des Top-Down Ansatzes und speziell den Aufbau der Priorisierung stehen verschiedene Kriterien zur Verfügung. Eine Entscheidung, welches der Kriterien als Priorisierungsreihenfolge herangezogen wird, ist immer unternehmens- und strategiespezifisch zu ermitteln. Die im Projekt betrachteten Priorisierungskriterien sind in der Abbildung 5 illustriert. Diese Liste kann in der Praxis auch beliebig um weitere Kriterien ergänzt werden, hat sich aber im Projekt als geeignet anwendbar gezeigt.

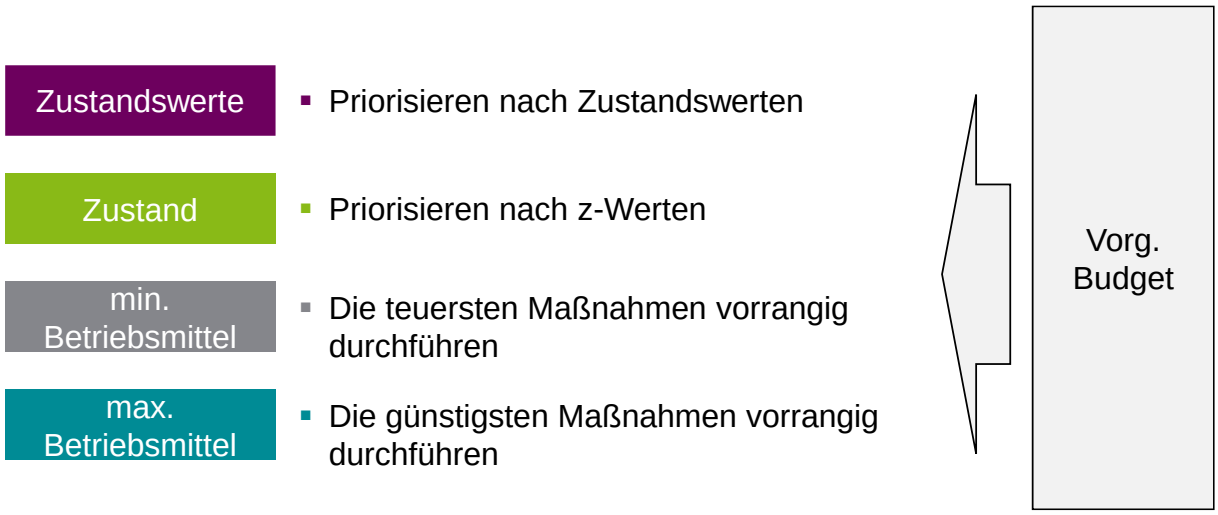

Abbildung 5: Priorisierungskriterien für den Top-Down Ansatz:

Das erste Kriterium zur Priorisierung von Betriebsmitteln für notwendige Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen ist der Zustandswert. Der Zustandswert wurde als neue Kennzahl definiert, um abzubilden, dass nicht nur ein technischer Zustand entscheidend sein kann, sondern auch die Wertwichtigkeit des jeweiligen Betriebsmittels. Die Wertwichtigkeit eines Betriebsmittels wird über dessen Tagesneuwert definiert. Für Punktobjekte ist dieser pro Stück zuzüglich Montagekosten fest definiert, während für Linienobjekte eine Längengewichtung zuzüglich Verlegungskosten berücksichtigt wird. Da der maßnahmenbedingende technische Zustand von Betriebsmitteln über die negativen z-Werte abgebildet wird und der Tagesneuwert ein Betrag in Euro ist, erfolgt eine multiplikative Verknüpfung der beiden Kennzahlen. Dabei wird in erster Instanz eine Gleichgewichtung der beiden Kennzahlen vorgenommen. Im Ergebnis entsteht eine priorisierte Liste, wobei die Betriebsmittel absteigend nach den berechneten Zustandswerten sortiert sind. Für die realitätsgerechten Annahmen von

verschiedenen Kostenpositionen (Material und Verlegung bzw. Montage) konnten Zahlen der assoziierten Partner genutzt werden.

Das zweite Kriterium ist eine Priorisierung auf Basis der z-Werte, welche detailliert den technischen Zustand der betrachteten Betriebsmittel spiegeln. Dabei werden die Betriebsmittel aufsteigend vom schlechtesten hinterlegten Bewertungsergebnis bis zum besten hinterlegten Bewertungsergebnis sortiert und in dieser Reihenfolge mit Maßnahmen versehen. Dieses Kriterium wurde eingeführt, um einen Fokus auf den Zustand der Betriebsmittel zu legen, mit dem Ziel die Versorgungszuverlässigkeit der Netze zu maximieren. Da es keine weiteren Einflussfaktoren gibt, werden die vergleichsweise schlechtesten Betriebsmittel, welche die potenziell höchste Ausfallwahrscheinlichkeit aufweisen, zuerst mit Maßnahmen der Instandhaltung oder Erneuerung versehen.

Das dritte Kriterium (min. Betriebsmittel) zielt darauf ab, eine minimale Anzahl an Betriebsmitteln im gleichen oder dicht gefolgten Zeitschritt mit Maßnahmen zu versehen. Daher werden die teuersten Betriebsmittel bezogen auf die notwendigen Maßnahmenkosten zuerst priorisiert. Dazu müssen konkrete Maßnahmenkosten bestimmt werden, welche notwendig werden. Ob eine generelle Erneuerung oder auch Reparatur respektive Wartung zur Verlängerung der technischen Nutzungsdauer angesetzt wird, muss vorher abgestimmt werden. Eine Verlängerung der Nutzungsdauer von Betriebsmitteln ist in Zeiten der Nachhaltigkeit natürlich zu empfehlen, jedoch bringt eine Erneuerung mit der Abschreibungsmöglichkeit dem Unternehmen unter Umständen mehr finanzielle Vorteile. Als generelles Ziel dieses Kriteriums wird eine Minimierung der Anzahl an Baustellen ausgesprochen. Dadurch, dass nur vorrangig die teuersten Betriebsmittel mit Maßnahmen versehen werden, ist das vorgegebene Budget vergleichsweise schnell aufgebraucht und generiert eine minimale Anzahl an parallelen Baustellen. Dies hat den Vorteil, dass eine begrenzte Personalverfügbarkeit effizient genutzt werden kann und der bürokratische Aufwand sinkt, da beispielsweise nicht so viele Aufbruchgenehmigungen eingeholt werden müssen.

Das vierte Kriterium (max. Betriebsmittel) ist gegenläufig zum dritten Kriterium. Denn dabei sollen so viele Betriebsmittel wie möglich mit Maßnahmen der Instandhaltung oder Erneuerung versehen werden. Die Motivation dahinter ist, alle als tendenziell schlecht bewerteten Betriebsmittel gleichzeitig zu betrachten und mit dem vorgegebenen Budget möglichst viel zu bewirtschaften. Sofern genug Ressourcen zur Verfügung stehen, kann so in kurzen Zeitschritten viel an der Netzinfrastruktur sektorenübergreifend instandgehalten oder erneuert werden. Dieses Kriterium kann für tendenziell kleinere Verteilnetzbetreiber, welche eine junge Altersstruktur in ihren Betriebsmittelkollektiven haben, eine zielführende Variante sein.

Durch die vier verschiedenen Kriterien zur Durchführung des Top-Down Ansatzes ergeben sich unterschiedliche priorisierte Listen, je nach Anwenderneigung und Betrachtungswinkel.

Dies bedeutet, dass sich der Fokus auf einzelne Betriebsmittelkollektive deutlich verschieben kann. Eine Vorzugsvariante kann nicht pauschal ausgesprochen werden, sondern liegt im Ermessen, den Zielen und der vorliegenden Betriebsmittelstruktur eines jeweiligen Netzbetreibers.

4.1.4 Arbeitspaket 4: Anwendungsprüfung

Im AP 4 wurde das sektorenübergreifende Integritätsmanagementsystem auf reale Netzgebiete angewendet. Die Netzgebiete wurden mit den assoziierten Partnern so gewählt, dass diese sowohl alle betrachteten Betriebsmittel punktuell sowie konzentriert beinhalten als auch sehr repräsentativ für die gesamte Netzinfrastruktur sind.

Exemplarisch ist in der Abbildung 6 ein kleiner Auszug aus einem der Testnetzgebiete dargestellt. Dabei sind Hochdruckleitungen in hellblau, Mittelspannungskabel in lila und Netzstationen in grün dargestellt.

Abbildung 6: Schematische Übersicht über eines der Testnetzgebiete

Das gezeigte Testnetzgebiet weist eine typische Struktur für Betriebsmittel des Strom- und Gassektors auf. Die Mittelspannungskabel sind in offenen Halbringen ausgeführt, verbunden mit den Netzstationen. Die Netzstationen versorgen die unterlagerten Niederspannungsnetze

und streuen hier über den gesamten Kartenausschnitt. Das Hochdruckleitungsrohrnetz ist als Ring mit deutlichem Abstand zur Wohnbebauung ausgeführt, was in Sicherheitsaspekten begründet liegt. In diesem Testnetzgebiet ist kein Mittel- oder Niederdrucknetz verlegt. In der Abbildung sind nur Betriebsmittel eingezeichnet, welche im Rahmen einer Zustandsbewertung bewertet werden können, weil die Datenmenge ausreichend ist. Dabei wird deutlich, dass Netzstationen als obertägig installierte Punktobjekte eine fast vollständige Datenbasis aufweisen, während bei Mittelspannungskabeln nur die relevantesten Kabel in unmittelbarer Nähe der Wohnbebauung gemessen wurden.

Anwendung des sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems

Es konnte aufgezeigt werden, dass durch die Unterschiedlichkeit bei dem Vorgehen zur Zustandsbewertung von Betriebsmitteln keine Vergleichbarkeit der resultierenden Zustandskennzahlen gegeben ist. Ferner konnte das sektorengekoppelte Integritätsmanagementsystem aufgebaut werden, um diese unterschiedlichen Zustandskennzahlen zu normieren. Eine Anwendung des Systems auf ein exemplarisches Testnetzgebiet in Form von normierten Zustandskennzahlen, z-Werten, ist in Abbildung 7 dargestellt.

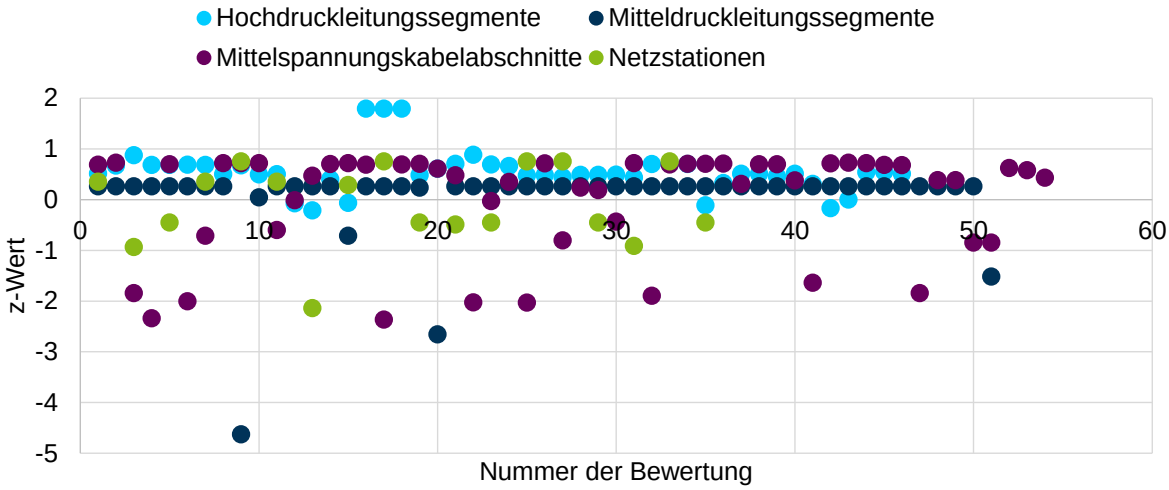

Abbildung 7: Sektorenübergreifende Zustandsbewertung

Bei der Analyse der generierten z-Werte ist eine direkte Interpretation gegeben. Während alle Betriebsmittel mit Bewertungen oberhalb von $z\text{-}Wert = 0$ gute Ergebnisse repräsentieren, zeigen alle Bewertungen mit negativem Vorzeichen schlechte Bewertungen auf. Da sich die Betriebsmittel mit positiven Werten ausnahmslos in einem guten Zustand befinden, sind diese nur noch nachrangigem Interesse, da an diesen keine Maßnahmen der Instandhaltung oder Erneuerung durchgeführt werden. Fokussiert wird sich demnach auf die schlechten Betriebsmittel, welche Maßnahmen bedürfen. Dabei wird direkt ersichtlich, dass ein Mitteldruckleitungssegment den vergleichsweise schlechtesten Zustand aufweist und stark

nach unten abweicht, wodurch ein direkter Handlungsbedarf ausgelöst wird. Dieses Mitteldruckleitungssegment ist unmittelbar zu erneuern. Generell zeigt sich, dass die Hochdruckleitungssegmente in diesem Testnetzgebiet den besten Zustand aufweisen und nur wenige Segmente Handlungsbedarf aufweisen. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Mitteldruckleitungssegmenten, wobei ein paar ausgewählte von diesen einen ausgeprägten Handlungsbedarf haben. Bei der Betrachtung von Netzstationen und Mittelspannungskabeln zeigen sich viele dieser Betriebsmittel in einem guten Zustand, während jedoch ein nicht unerheblicher Anteil in einem schlechten Zustand ist und Maßnahmen an diesen durchgeführt werden müssen. Allgemein sind die Betriebsmittel des Gassektors in diesem Testnetzgebiet in einem deutlichen besseren Zustand als die Betriebsmittel des Stromsektors. Eine bildliche Quantifizierung des Bedarfs nach Maßnahmen der Instandhaltung und Erneuerung ist in Abbildung 8 dargestellt.

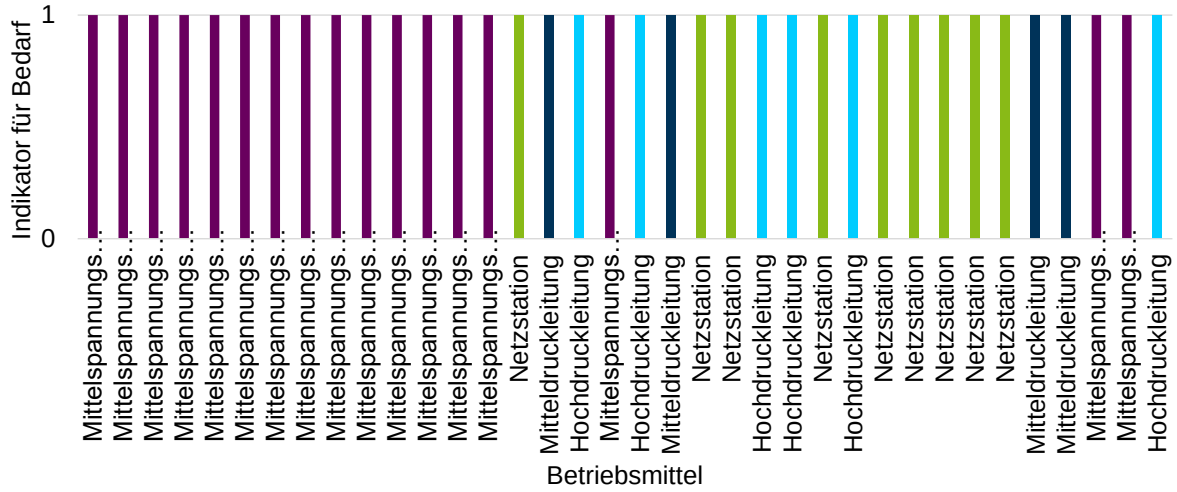

Abbildung 8: Quantifizierung des Bedarfs nach Maßnahmen

Dabei werden alle Betriebsmittel mit schlechten Bewertungen (negativen z-Werten) betrachtet. Es zeigt sich, dass in dieser Liste der Bedarfe siebzehn Mittelspannungskabel, neun Netzstationen, vier Mitteldruckleitungen und sechs Hochdruckleitungen enthalten sind. Ein Fokus für die Budgetbestimmung und -verteilung wird daher auf diese Betriebsmittel gelegt. Ferner bestätigt sich anhand dieser Analyse, dass die Strombetriebsmittel einen vergleichsweise schlechteren Zustand aufweisen. Eine Korrelation zur Altersstruktur wurde untersucht, jedoch konnte dort kein Zusammenhang festgestellt werden. Die Gründe für den vergleichsweise schlechteren Zustand sind in einer übergreifenden Betrachtung nicht im Detail zu erfassen, was aber für die Maßnahmenplanung und Budgetierung dieser nicht weiter von Relevanz ist. Das System zielt für die Verwendung auf der Management-Ebene ab, für Einzelfallbetrachtung sind die spezifischen Bewertungssysteme auf der Ebene der Service-Provider zu nutzen.

Im nächsten Schritt sind die Bedarfe nach Instandhaltung in konkrete Maßnahmen mitsamt den resultierenden Kosten für diese zu übersetzen. Eine Aufstellung der betriebsmittelscharfen Maßnahmenkosten ist in der Abbildung 9 dargestellt.

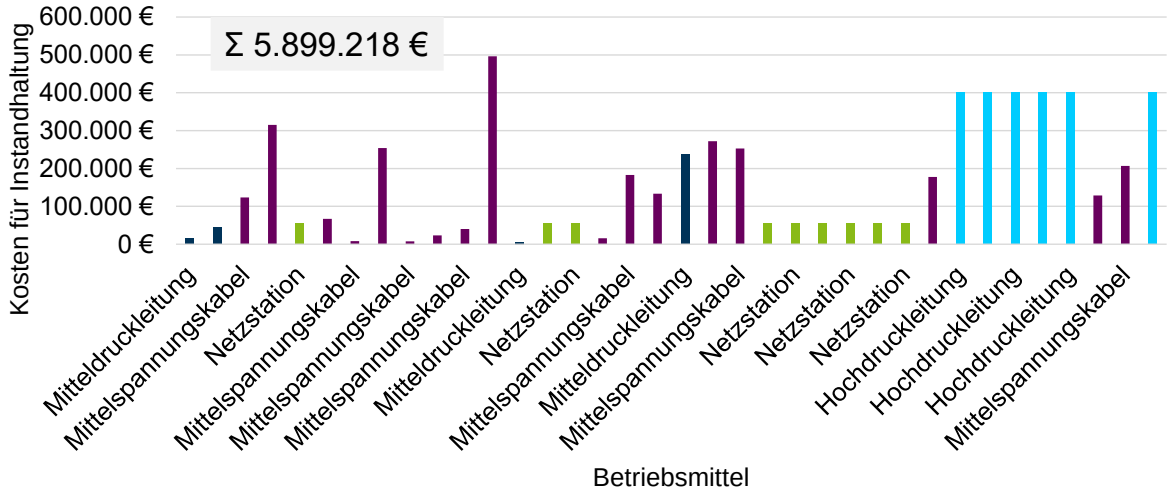

Abbildung 9: Betriebsmittelscharfe Maßnahmenkosten

In dieser Aufstellung werden realen Maßnahmenkosten für Instandhaltung angesetzt. Dies erfordert zuerst eine genaue Betrachtung der notwendigen Maßnahmen. Bei Linienobjekten wird generell eine Erneuerung angesetzt, jedoch nur des kritischen Bereiches. Sofern das Linienobjekt über seine gesamte Länge einen kritischen Zustand aufweist, wird dies auch über seine gesamte Länge hinweg erneuert. Durch diese Detailbetrachtung mit Längengewichtung ergeben sich für die Mittelspannungskabel unterschiedliche Maßnahmenkosten, obgleich die Kosten für Erneuerung pro Meter Mittelspannungskabel nahezu konstant sind. Leichte Unterschiede ergeben sich durch verschiedene Materialkosten in Abhängigkeit des Querschnitts, welche aber mit Blick auf die Tiefbaukosten in guter Näherung zu vernachlässigen sind. Bei Punktobjekten wird analysiert, ob eine gesamte Erneuerung des Objektes notwendig ist oder auch Wartung, respektive Teilerneuerung einzelner Hauptkomponenten zielführend sein kann. Bei diesen betrachteten Netzstationen kommt nur eine gesamte Erneuerung zum Tragen, da diese allesamt in einem kritischen Zustand sind. Die einzelnen Kostenpositionen werden zu einem konsolidierten Gesamtbetrag aggregiert, welcher in dieser Betrachtung bei gerundet 5,9 Millionen Euro liegt. Dieser Betrag entspricht dem notwendigen Gesamtbudget, welches benötigt wird, um alle kritischen Betriebsmittel mit Maßnahmen zu beaufschlagen und die Qualität sowie die Versorgungssicherheit des Netzgebiets auf dem aktuellen hohen Stand zu erhalten.

Vor dem Hintergrund des steigenden Kostendrucks auch bei Netzbetreibern durch die stark gestiegenen Preise für Betriebsmittel und Verlegung sowie Installation steht in der Realität im

Regelfall nicht das vollständig notwendige Budget zur Verfügung. An dieser Stelle wird in Rücksprache mit den assoziierten Partnern die Annahme getroffen, dass stark gerundet zwei Drittel des Budgets 4 Millionen Euro für die Instandhaltung der Betriebsmittel in diesem Testnetzgebiet bereitgestellt werden können. Die Herausforderung besteht nun darin, das zur Verfügung stehende Budget bestmöglich auf die Betriebsmittel und Sektoren zu verteilen. Dazu werden die für den Top-Down Ansatz definierten Kriterien herangezogen. In der Abbildung 10 ist die Priorisierungsreihenfolge auf Basis der (fiktiven) Zustandswerte dargestellt.

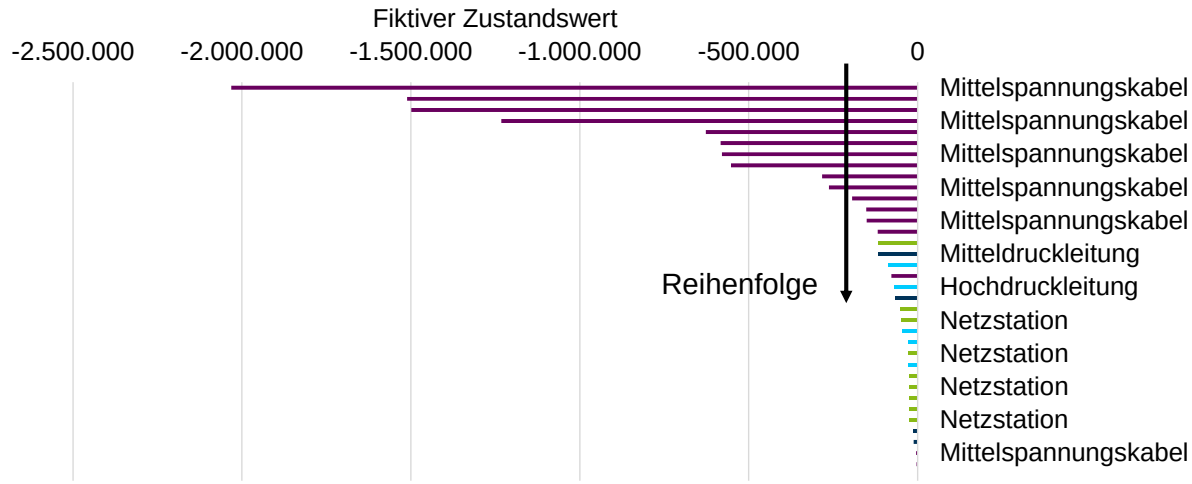

Abbildung 10: Priorisierung auf Basis der Zustandswerte

In dieser Betrachtung wird deutlich, dass ausgewählte Mittelspannungskabel die höchste Priorität aufweisen, gefolgt von Mittel- und Hochdruckleitungen. Erst dann kommen die Netzstationen in der Priorisierung vor. Dieser deutliche Fokus auf die Linienobjekte der beiden Sektoren ist auf die Beschaffenheit des Zustandswertes zurückzuführen, da bei diesem eine Gleichgewichtung zwischen Wiederbeschaffungswert und technischem Zustand vorliegt und der Wiederbeschaffungswert der Linienobjekte in diesem Testnetzgebiet deutlich höher als der von Punktobjekten (Netzstationen) ist. Zur Durchführung des gesamten Ansatzes werden indessen solange Betriebsmittel nach ihrer Priorität mit Maßnahmen der Instandhaltung und Erneuerung versehen, bis das vorgegebene Budget vollständig erschöpft ist. Dabei wird sich auf die realen Maßnahmenkosten bezogen, die erforderlich sind und nicht den Zustandswert als fiktive Kennzahl.

Da sich bei dem Zustandswert der technische Zustand eines Betriebsmittels durch den Einfluss des Wiederbeschaffungswertes nicht durchdrückt, ist das Kriterium Zustand mit Fokus auf den übergreifenden Zustandskennzahlen definiert. Der Hintergrund ist, dass bei dieser Betrachtung vorrangig jene Betriebsmittel mit Maßnahmen versehen werden, welche den schlechtesten Zustand aufweisen und gleichzeitig die höchste Gefahr eines Ausfalls haben. Dabei werden die Betriebsmittel absteigend nach deren übergreifenden Zustandskennzahlen

(z-Werten) angeordnet. Die Priorität ist wieder Top-Down anzuwenden, dabei hat das vergleichsweise schlechteste Betriebsmittel die höchste Priorität, während das relativ betrachtet beste Betriebsmittel die geringste Priorität aufweist. In der Abbildung 11 ist die

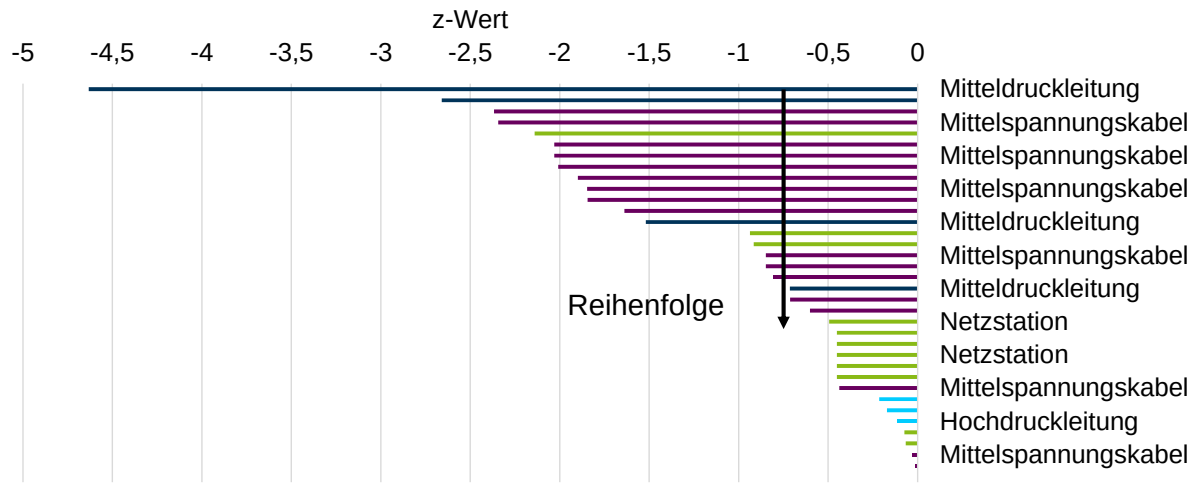

Abbildung 11: Priorisierung auf Basis des Zustands

Priorisierungsreihenfolge auf Basis des Zustands der Betriebsmittel dargestellt.

Die Priorität der Betriebsmittel folgt dabei der in Abbildung 7 dargestellten übergreifenden Zustandsbewertung. Die als maximal kritisches Betriebsmittel identifizierte Mitteldruckleitung weist dabei die höchste Priorität auf. Darauf folgen weitere Mittelspannungskabel. Es gilt weiterhin, dass sich die Hochdruckleitungen im vergleichsweise besten Zustand in diesem Testnetzgebiet befinden. Insgesamt sind die Strombetriebsmittel in einem schlechteren Zustand als die Gasbetriebsmittel, wodurch das Budget vorrangig auf diese verteilt wird. Analog zu Vorgehen bei dem Kriterium Zustandswert, werden die Betriebsmittel gemäß ihrer Priorität solange mit Maßnahmen der Instandhaltung und Erneuerung versehen, bis das vorgegebene Budget vollkommen erschöpft ist.

Die resultierenden Prioritäten der verschiedenen Betriebsmittel sind stark abhängig von dem verwendeten Kriterium zur Budgetierung. In Abbildung 10 und Abbildung 11 wurden die Reihenfolgen der Betriebsmittel zur Beaufschlagung mit Maßnahmen der Instandhaltung und Erneuerung aufgezeigt. Dabei haben sich signifikante Unterschiede ergeben, da das Budget aus verschiedenen Betrachtungswinkeln verteilt wird. Diese Reihenfolgen der Prioritäten ändern sich nochmals, wenn die beiden weiteren Verteilungskriterien (min. und max. Betriebsmittel) angesetzt werden. Es ergibt sich jeweils ein anderer Fokus auf verschiedene Betriebsmittelkollektive und Sektoren. Welches Kriterium als Vorzugsvariante definiert werden kann, liegt im Ermessensspielraum des Unternehmens. Grundsätzlich ist zu beachten, dass durch die verschiedenen Prioritäten und ein begrenztes Budget verschiedene Betriebsmittel auch nicht mit Instandhaltungsmaßnahmen versehen werden können. Die Unterschiedlichkeit

der Budgetverteilung ist in der Abbildung 12 dargestellt. Dabei ist der jeweils prozentuale Anteil aller Betriebsmittel aufgezeigt, welche gemessen am Gesamtbestand mit Maßnahmen der Instandhaltung versehen werden können.

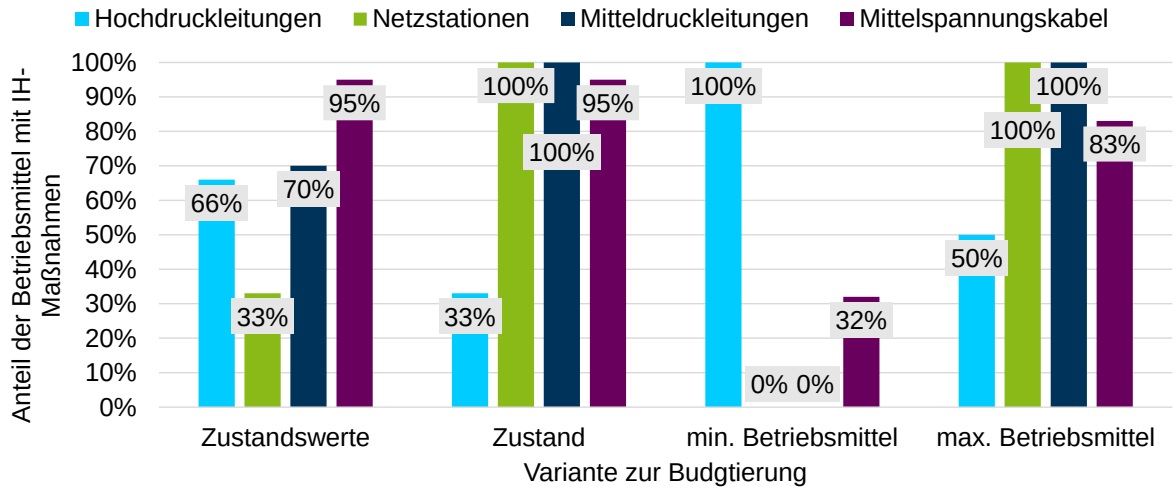

Abbildung 12: Unterschiedlichkeit der Budgetverteilung

Bei Verwendung des Kriteriums des Zustandswertes können 66 % aller Hochdruckleitungen mit Maßnahmen versehen werden, 33 % aller Netzstationen, 70 % aller Mitteldruckleitungen und 95 % aller Mittelspannungskabel. Eine Fokussierung auf die wertwichtigsten Betriebsmittel ist dabei erkennbar, da die wenigstens Netzstationen eingebunden werden, da diese das bezogen auf den Wiederbeschaffungswert günstigste Betriebsmittel in diesem Kollektiv sind. Bei einer Priorisierung auf Basis des technischen Zustands werden die schlechtesten Betriebsmittel bevorzugt, was darin resultiert, dass alle Netzstationen und Mitteldruckleitungen und 95 % der Mittelspannungskabel mit Maßnahmen versehen werden. Die Hochdruckleitung mit einem Maßnahmenanteil von 33 % haben die geringste Beachtung, da diese insgesamt in diesem Testnetzgebiet in dem besten Zustand sind. Gleichzeitig werden die Unterschiede der Erneuerungskosten deutlich, dass im Vergleich zum Kriterium der Zustandswerte der Anteil aller erneuerter Hochdruckleitungen halbiert wird, wodurch genügend Budget frei wird, um alle anderen Betriebsmittel in diesem Testnetzgebiet mit Maßnahmen zu versehen. Bei Verwendung des Kriteriums der minimalen Betriebsmittel werden vornehmlich alle Hochdruckleitungen und folgend 32 % der Mittelspannungskabel mit Maßnahmen versehen. Dabei wird der Fokus auf die teuersten zu erneuernden Linienobjekte klar deutlich. Für Instandhaltungsmaßnahmen an Netzstationen und Mitteldruckleitungen steht kein Budget mehr zur Verfügung. Dadurch ist die Prämisse erfüllt, die Anzahl der Maßnahmen und damit Baustellen zu minimieren. Im Gegensatz dazu werden bei dem Kriterium der maximalen Betriebsmittel, möglichst viele Betriebsmittel mit Maßnahmen versehen. Werden die Betriebsmittelkollektive aggregiert betrachtet, können somit gerundet 83 % alle

notwendigen Maßnahmen auf die Betriebsmittel in diesem Testnetzgebiet ausgerollt werden. Diese Maximierung wurde durch kein anderes Kriterium erreicht.

Zur Validierung, dass die teilautomatisierte Anwendung der verschiedenen Kriterien das vorgegebene Budget nicht überschreiten, sind die resultierende, Maßnahmenkosten in Abhängigkeit der Kriterien in Abbildung 13 dargestellt.

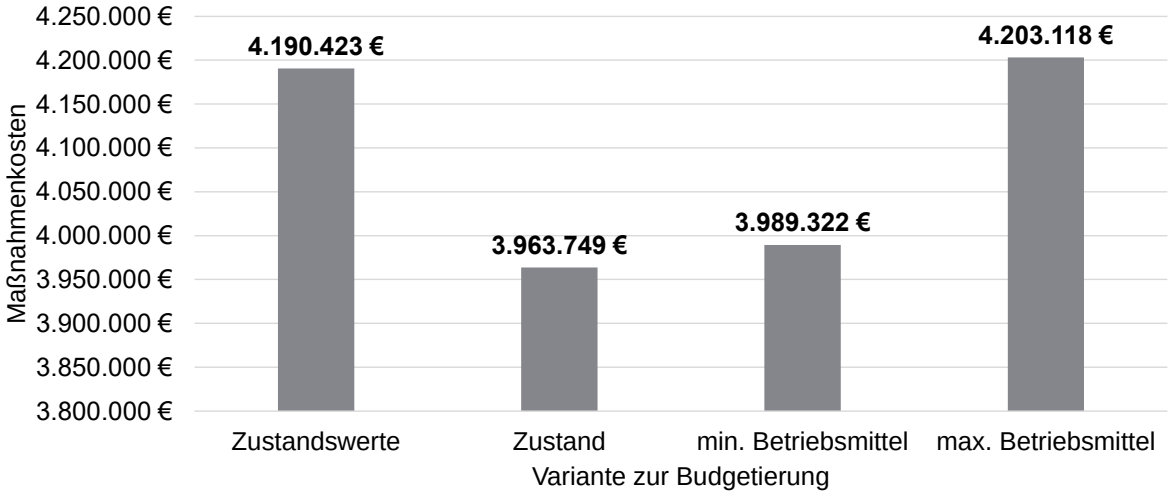

Abbildung 13: Resultierende Maßnahmenkosten in Abhängigkeit der Budgetierungskriterien

Das vorgegebene Budget von 4 Millionen Euro wurde in guter Näherung bei jedem Kriterium eingehalten. Die leichten Abweichungen nach oben von 4,8 % bei dem Kriterium Zustandswert und 5 % bei dem Kriterium der maximalen Betriebsmittel sind in der Erneuerung von Linienobjekten begründet. Sofern eine harte Budgetgrenze angesetzt werden würde, könnte nicht die gesamte notwendige Strecke erneuert werden, was im Anwendungsfall aber nicht sinnvoll wäre. Jeder Netzbetreiber wird in der Realität eine Strecke nicht Teilerneuern und den Rest im derzeitigen schlechten Zustand verbleiben lassen, sondern das Budget marginal überreizen, um die Strecke komplett auszutauschen.

4.1.5 Arbeitspaket 5: Projektorganisation

Das AP 5 diente dazu, einen strukturierten Rahmen für das Projekt zu gewährleisten und erreichte dabei folgende Ziele:

- Koordination der Bearbeitung der Arbeitspakete
- Koordination von regelmäßigen Konsortialtreffen
- Koordination von Öffentlichkeitsarbeit
- Koordination der Berichtspflichten und der Außendarstellung der Projektinhalte gegenüber dem Projektträger Jülich, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz sowie der Öffentlichkeit (siehe auch Veröffentlichungen in Kapitel 9)

5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bergische Universität Wuppertal:

Insgesamt sind Ausgaben in Höhe von 471.802,19 € entstanden, wobei die Ausgaben gemäß Gesamtfinanzierungsplan in Höhe von 549.028,00 € nicht überschritten wurden.

Es wurden 470.440,59 € an Personalmitteln verwendet, wodurch die ursprünglich geplanten Personalausgaben in Höhe von 473.907,00 € nicht überschritten wurden.

Es wurden 1.361,60 € an Reisemitteln verwendet, wodurch die ursprünglich geplanten Reisemitteln in Höhe von 27.730,00 € nicht überschritten wurden.

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH:

Insgesamt sind Ausgaben in Höhe von 619.796,00 € entstanden, wobei die Ausgaben gemäß Gesamtfinanzierungsplan in Höhe von 639.796,00 € nicht überschritten wurden.

Es wurden 619.796,00 € an Personalmitteln (60 v. H. der zuwendungsfähigen Selbstkosten) verwendet, wodurch die ursprünglich geplanten Personalausgaben in Höhe von 619.796,00 € nicht überschritten wurden.

Es wurden 0,00 € an Reisemitteln verwendet, wodurch die ursprünglich geplanten Reisemittel in Höhe von 20.000,00 € nicht überschritten wurden.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Das Projekt „Sektorenkopplung Integritätsmanagementsysteme“ hat auf den Erkenntnissen der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln der beiden Verbundpartner aufgesetzt. Teilweise wurden die dazu geschaffenen Grundlagen in vorher geförderten Projekten gelegt. Durch das Projekt konnte zum ersten Mal die strikte Trennung der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln innerhalb der Sektoren Strom und Gas überwunden werden. Nun ist die Möglichkeit einer sektorenübergreifenden Betrachtung geschaffen. Die Modularität des Gesamtsystems ist so ausgeprägt, dass dieses auch angewendet werden kann, sofern ein anderes Vorgehen bei der betriebsmittelscharfen Zustandsbewertung Anwendung findet. Eine dedizierte und robuste betriebsmittelscharfe Zustandsbewertungssystematik bleibt dabei immer Grundvoraussetzung. Darüber hinaus konnte ein Modul zur sektorenübergreifenden

Berechnung von Budgets für Instandhaltung und Erneuerung von Betriebsmitteln entwickelt werden. Da notwendige Gesamtbudgets oder das notwendige fachkundige Personal zur Durchführung der Maßnahmen nicht in Gänze unmittelbar zur Verfügung stehen, wurde eine Methode zur bestmöglichen Allokation der vorhandenen Ressourcen unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien erarbeitet. Das Asset-Management von Verteilnetzbetreibern kann von den gewonnenen Erkenntnissen sehr profitieren, da zum ersten Mal vollumfängliche sektorenübergreifende Betrachtungen möglich sind.

Der Verlauf der Arbeit im Projekt folgte im Wesentlichen der im Projektantrag formulierten Planung. Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da alle wesentlichen im Projektantrag formulierten Aufgaben bearbeitet wurden und keine zusätzlichen Ausgaben über den Gesamtfinanzierungsbedarf hinaus erforderlich waren.

7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Durch die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse ergeben sich perspektivische Vorteile im Asset-Management, speziell bei Verteilnetzbetreibern. Mithilfe des sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems können unterschiedliche Zustandskennzahlen der Betriebsmittel einzelner Sektoren vergleichbar gemacht werden. Dadurch werden übergreifende Betrachtungsmöglichkeiten erzielt. Seitens der beteiligten assoziierten Partner, welche beides Verteilnetzbetreiber sind, wurde gespiegelt, dass die betriebsmittelscharfe Zustandsbewertung in ihren Unternehmen im fortgeschrittenen Aufbau ist, jedoch ein Modul zur übergreifenden Betrachtung bisher gefehlt hat. Dieses fehlende Modul konnte im Projekt erarbeitet werden und soll nun in den beteiligten Unternehmen etabliert werden. Darüber hinaus sollen die beiden Ansätze zur Budgetierung in erster Instanz Anwendung finden, um die bisherige Verteilung von Instandhaltungs- und Erneuerungsbudgets im Asset-Management der Unternehmen zu validieren oder eine Diskussionsgrundlage zu schaffen, um diese geeignet nachzuschärfen. Einschränkend ist zu erwähnen, dass die Einführung eines sektorengekoppelten Integritätsmanagementsystems nur für Verteilnetzbetreiber unmittelbar durchführbar ist, welche eine solide Datenbasis in Bezug auf Stamm- und Zustandsdaten ihrer Betriebsmittel aufweisen. Da das Gesamtsystem jedoch beliebig auf weitere Betriebsmittelkollektive erweiterbar ist, kann eine Anwendung beispielsweise im Wärmesektor problemlos erfolgen.

8 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf Basis ausgiebiger Informations- und Literaturrecherchen ist festzuhalten, dass sich auch andere Studien, respektive Projekte mit der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln beschäftigt haben oder beschäftigen. Diese sind im Gegensatz zu diesem Projekt insgesamt auf einer betriebsmittelscharfen Ebene geblieben, was bedeutet, dass jeweils nur ein ausgewähltes Betriebsmittel tiefergehend analysiert wurde. Dieses Resultat gilt sowohl für den Strom- als auch den Gassektor. Es gibt keine ansatzweisen parallelen Arbeiten, welche sich mit einer betriebsmittelübergreifenden Zustandsbewertung beschäftigen. Daher gibt es auch keine vergleichbaren Ergebnisse in Bezug auf eine sektorenübergreifende Zustandsbewertung. Auch eine Allokation von Ressourcen im Kontext des Asset-Management wurde nur in diesem Projekt betriebsmittel- und sektorenübergreifend durchgeführt. An dieser Stelle existieren ebenfalls keine parallelen Arbeiten.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF

9.1.1 Erfolgte, projektbezogene Veröffentlichungen

- Göbelsmann, F.; Tichelkamp, T.; Zdrallek, M.; Ferrari, R.; Piskun, S.: **Sektorenübergreifende Zustandsbewertung von Strom- und Gasnetzen,** gwf Gas + Energie 10/2021, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, (2021)

- Göbelsmann, F.; Reske, T.; Dalamaras, P.; Zdrallek, M.; Ferrari, R.: **An approach for comprehensive condition assessment of equipment in electrical distribution grids based on the theory of evidence for managing grid expansion measures in the best conceivable way** VDE Hochspannungstechnik 2022, Berlin (2022)

- Göbelsmann, F.; Bondorf, M.; Zdrallek, M.; Ferrari, R.: **Transformation of condition indicators for a cross-sectoral assessment of equipment in the electricity and gas distribution grid for an enhanced asset management,** 12th International Ruhr Energy Conference (INREC) 2023, Essen (2023)

- Göbelsmann, F.; Bondorf, M.; Zdrallek, M.; Ferrari, R.: **Entwicklung eines Verfahrens zur sektorenübergreifenden Zustandsbewertung und Bewirtschaftung von Betriebsmitteln,** gwf Gas + Energie 04/2024, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, (2024)

- Göbelsmann, F.; Zdrallek, M.: **Prognose des Instandhaltungsbedarfs in Verteilnetzen,** netzpraxis, Ausgabe 7-8 2024, ISSN 1611-0412 – D 7656 E

9.1.2 Geplante, projektbezogene Veröffentlichungen

- Göbelsmann, F.; Bondorf, M.; Zdrallek, M.; Ferrari, R.; Plötz, S.; Wahl, M.: **Comprehensive Assessment of the Condition and Importance of Equipment in the Electricity and Gas Sector for the Optimal Extent of Technical Lifespans and Management of Maintenance Measures,** VDE Hochspannungstechnik 2024, Berlin (2024)

- Göbelsmann, F.: **Zustandsbewertung von Betriebsmitteln für ein sektorenübergreifendes Asset-Management,** Neue Energie aus Wuppertal, Wuppertal (2025)

10 Literaturverzeichnis

[1] Becker, M.; Wintzek, P.; Weber, J.; Tichelkamp, N.; Bondorf, M.; Zdrallek, M.: Netzstrukturdatenbank deutscher Verteilnetzbetreiber des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal (Stand 2020/2021, ausschließlich aus öffentlich zugänglichen Quellen), Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal, Wuppertal (2021)

[2] Dalamaras, P.: „Realitätsgerechte Alterungsmodelle von Mittelspannungs-Netzstationen als Basis optimierter Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien“ Band 43, der Schriftenreihe "Neue Energie aus Wuppertal", Verlag epubli GmbH, Berlin (2022), ISBN 978-3-7565-1604-9

[3] Reske, T.: „Alterungsverhalten von Mittelspannungskabelanlagen“ Band 57 der Schriftenreihe "Neue Energie aus Wuppertal", Verlag epubli GmbH, Berlin (2023), ISBN 978-3-7575-7618-9

[4] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN): Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik, Berlin, Berichtsjahre 2004-2018

[5] Brauer, H.; Henel, M.; Großmann, A.: IN WITH THE NEW, REPURPOSING THE USED: H2-PIMS or how to safely transport hydrogen blends, H2-international – the e-journal on hydrogen and fuel cells, (2020)

[6] Balzer, G.; Schorn, C.: Asset Management für Infrastrukturanlagen-Energie und Wasser. Springer-Verlag (2014)

[7] Beerboom, D.: „Objektive Zustandsbewertung von Mittelspannungsnetzen als Grundlage der Asset-Optimierung“, Band 11 der Schriftenreihe „Neue Energie aus Wuppertal“, Verlag epubli GmbH, ISBN 9783741895395, Berlin (2017)

[8] Tichelkamp, N.; Reske, T.; Hopfer, N.; Zdrallek, M.: Realitätsgerechte Zustandsbewertung von Mittelspannungskabeln unter Verwendung der Evidenz-Theorie, Tagungsband zur VDE-Fachtagung "Hochspannungstechnik", Berlin (2020)

[9] Veenker, C.: DIN EN ISO 16708:2006.: Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Re-liability-based limit state methods, Bonn (2006)

[10] DIN EN ISO 16708:2006.: Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Re-liability-based limit state methods, Bonn, 2006

[11] Piskun, S.; Ferrari, R.: TIMS – Technical-Integrity-Management-System für einen sicheren und effizienten Anlagenbetrieb am Beispiel eines Untertage-Gasspeichers, ERDÖL ERDGAS KOHLE, 133 Jg. 2017 Heft 11