Ein Verfahren zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der
Universität Dortmund
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Dipl.-Ing. Werner Feilhauer
Schwerte

Referent:	Prof. Dr.-Ing. E. Handschin
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. C. Neumann
Tag der mündlichen Prüfung:	15. Februar 2005

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter von 1999 bis 2005 am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Universität Dortmund, der seit April 2004 Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft heißt.

Herr Prof. Dr.-Ing. E. Handschin, Inhaber des Lehrstuhls, begleitete die Arbeit stets mit großer Aufmerksamkeit und gab wertvolle Hinweise und Anregungen, die entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Für die Betreuung der Arbeit und die jederzeit sehr angenehme Zusammenarbeit bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Handschin.

Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Neumann danke ich für die intensiven Diskussionen und die freundliche Übernahme des Korreferats. Herr Prof. Dr.-Ing. C. Neumann begleitete die Arbeit im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Zustandsbewertung von Betriebsmitteln und Anlagen der elektrischen Energieversorgung" der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Der DFG danke ich für die Förderung meiner Arbeit durch Sachbeihilfen.

Bei allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft sowie den Studierenden an diesem Lehrstuhl bedanke ich mich für die kooperative Zusammenarbeit und ihre ständig vorhandene Diskussionsbereitschaft. Mein besonderer Dank gilt den Kollegen im ZEDO, Herrn Dr.-Ing. Christian Rehtanz, Herrn Dr.-Ing. Christian Becker, Herrn Dr.-Ing. Carsten Leder, Herrn Dipl.-Ing. Hendrik Neumann und Herrn Dipl.-Ing. Ingo Jürgens. Durch ihre kreative und freundschaftliche Zusammenarbeit haben sie in vielfältiger Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Schwerte, im Januar 2005

Werner Feilhauer

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ASP	Application Service Providing
C2H2	Ethin
C2H4	Ethen
C2H6	Ethan
C3H6	Propen
C3H8	Propan
CH4	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO2	Kohlendioxid
D1	Entladungen niedriger Energie
D2	Entladungen hoher Energie
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGA	Gas-in-Öl-Analyse (Dissolved gas analysis)
H2	Wasserstoff
LS	Leistungsschalter
O2	Sauerstoff
PD	Teilentladungen
PDA	Personal Digital Assistant
RCM	reliability centred maintenance
S	analytische Nachweisgrenze
SF_6	Schwefelhexafluorid
T1	Thermischer Fehler, $t < 300°C$
T2	Thermischer Fehler, $300°C < t < 700°C$
T3	Thermischer Fehler, $t > 700°C$
TS	Trennschalter
VLF-Diagnose	Verlustfaktormessung bei sehr niedriger Frequenz (very low frequency)
VV2+	Verbändevereinbarung 2 Plus

1 Einleitung

1.1 Motivation der zustandsorientierten Instandhaltung

Die Energieversorgungsunternehmen in Europa waren etwa bis in die Mitte der neunziger Jahre Monopolunternehmen mit festgelegten Versorgungsgebieten, die Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie durchgeführt haben. Die Strategie hat sich an den vier Grundforderungen Sicherheit, Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Qualität ausgerichtet. Sicherheit der Versorgung im technischen Sinne ist der Ausschluss einer Gefährdung von Personen, Anlagen und der Umwelt. Die Verwendung des Begriffs „Versorgungssicherheit“ im Sinne einer Energieversorgung mit einer geringen Unterbrechungshäufigkeit und -dauer, also einer größtmöglichen Verfügbarkeit der elektrischen Energie beim Kunden ist nicht korrekt. Stattdessen wird ausschließlich der Begriff „Versorgungszuverlässigkeit“ verwendet. Die Grundforderungen sind konkurrierend. Durch das EVU musste deshalb ein Kompromiss gefunden werden, der alle Ziele ausreichend berücksichtigt. In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt ausnahmslos bei der Versorgungszuverlässigkeit.

Mit der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes /19/ wird der Wettbewerb in der Energieversorgung eingeführt. Das Gesetz fordert die Entflechtung der Unternehmen und eine Trennung der Geschäftsbereiche Erzeugung, Übertragung und Verteilung. Der Zweck des Energiewirtschaftsgesetzes nennt weiterhin ausdrücklich die Ziele Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. Die Versorgungsqualität bleibt als Forderung der Kunden bestehen. Die Erlöse der Netzbetreiber bestehen fast ausschließlich aus Netznutzungsentgelten. Durch die Konkurrenzsituation, die durch Einführung des Vergleichsmarktprinzips in der Verbändevereinbarung 2 Plus (VV2+) /53/ noch verstärkt worden ist, entsteht ein starker Kostendruck auf die einzelnen Netzbetreiber. In der Folge sind die Netznutzungsentgelte und damit die Erlöse der Netzbetreiber sind gesunken.

Die Netzbetreiber sind aufgrund dieses Kostendrucks gezwungen, ihre Investitions- und Betriebskosten zu reduzieren. Ein Ansatz ist der Übergang zu vereinfachten Anlagen- und Netzkonfigurationen, was zu einer höheren Auslastung der vorhandenen Betriebsmittel führt. Ersatzinvestitionen werden verschoben, dadurch nimmt das Anlagenalter zu. Die Instandhaltungsaktivitäten werden vermindert. Durch alle diese Maßnahmen sind mittel- bis langfristig Auswirkungen auf die Anlagenverfügbarkeit, auf die Systemzuverlässigkeit und auf die Versorgungsqualität zu erwarten.

Die am häufigsten auch heute noch angewendete Instandhaltungsstrategie ist die zeitabhängige Instandhaltung, nach der in festen Zeitabständen im Voraus definierte Maßnahmen durchgeführt werden. Die Instandhaltungsintervalle sind eher zu kurz gewählt, um Auswirkungen auf Anlagenverfügbarkeit und Versorgungszuverlässigkeit zu vermeiden. Ein Ansatz, um in diesem Bereich Kosten einzusparen, ist der Übergang zur zustandsabhängigen Instandhaltung. Im Hoch- und Höchstspannungsnetz sind wertvolle Betriebsmittel installiert, die über umfangreiche Überwachungssysteme verfügen.

1.2 Struktur der Arbeit

Der Bereich der Instandhaltung ist mit etwa einem Drittel an den Gesamtkosten der Stromübertragung und -verteilung beteiligt. Die Kosten im Bereich der Instandhaltung werden von den Netzbetreibern aktuell stärker betrachtet. Zur Nutzung von Einsparmöglichkeiten wird von den Netzbetreibern der elektrischen Energieversorgungsnetze ein Asset Management System installiert. Kapitel 2 gibt einen Überblick über Inhalt und Umfang des Begriffs „Asset Management“ im Allgemeinen und über die Umsetzung bei Netzbetreibern der elektrischen Energieversorgung.

Die Instandhaltung ist eine der Kernkompetenzen des Asset Managements. In Kapitel 2.1 werden zunächst die im Bereich der Instandhaltung üblichen Begriffe und Definitionen erläutert und danach eine kurze Beschreibung der bekannten Instandhaltungsstrategien ereignisorientiert, zeitabhängig, zustandsorientiert und zuverlässigkeitsorientiert angegeben. Die Kapitel 2.2 bis 2.4 geben eine Zusammenfassung des Standes der Technik im Bereich der Instandhaltung von Hoch- und Höchstspannungsanlagen. Zuerst wird ein Verfahren auf der Basis der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung dargestellt, das sich als strategieübergreifendes Instandhaltungskonzept versteht, weil es Elemente der ereignisorientierten, zeitabhängigen und zustandsorientierten Strategie kombiniert. Jedem Betriebsmittel oder Betriebsmittelkollektiv wird die wirtschaftlichste Instandhaltungsstrategie zugewiesen. Darüber hinaus bietet es Unterstützung bei der Festlegung der Reihenfolge, in der die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen oder Austausche durchzuführen sind. Das zweite Verfahren zur Unterstützung der Instandhaltungsplanung basiert auf Expertensystemen und gibt Empfehlungen für den Umfang und Inhalt von Instandhaltungsmaßnahmen. Expertenwissen stellt häufig die wesentliche Entscheidungsgrundlage dar, weil nur eingeschränkt Alterungsmodelle der Betriebsmittel existieren und die Herstellervorgaben als zu restriktiv bewertet werden. Mit Hilfe eines Expertensystems wird das vorhandene Know-how auch bei Personalanpassungsmaßnahmen oder Personalwechsel im Unternehmen erhalten und ermöglicht so eine zielgerichtete Instandhaltung. Die Veranlassung von Instandhaltungsmaßnahmen kann sowohl auf der Basis fester Zeitzyklen als auch auf der Basis von Bewertungsfunktionen durchgeführt werden. Durch die Erfassung typischer Kosten ist eine Budgetierung von Instandhaltungsmaßnahmen möglich. Das dritte Verfahren stellt ein System zur integrierten Instandhaltungsplanung dar. Mit Hilfe von genetischen Algorithmen werden Instandhaltungspläne erstellt, die systemspezifischen Randbedingungen genügen und nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien optimiert sind. Für jedes betrachtete Betriebsmittel muss als Eingangsgröße der Instandhaltungsbedarf nach Art und Zeit angegeben werden.

Die Zustandsbewertung der Betriebsmittel ist die Grundlage, um zukünftigen Instandhaltungsbedarf festzulegen. Zur Zustandsbewertung stehen eine Vielzahl von Eingangsgrößen, angefangen von Warn- und Störmeldungen über Inspektionen und Offline-Prüfverfahren bis hin zu Online-Monitoring-Systemen zur Verfügung. Alle verfügbaren Eingangsgrößen müssen bei der Zustandsbewertung berücksichtigt und mit geeigneten Verfahren miteinander kombiniert werden, um die zutreffende Diagnose und das zulässige Instandhaltungsintervall zu ermitteln. Als Schwerpunkt dieser Arbeit wird ein Verfahren auf der Basis der Evidenztheorie von Dempster und Shafer, die eine Verallgemeinerung der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie ist, zur Ermittlung der zutreffenden Diagnose und des zulässigen Instandhaltungsintervalls vorgeschlagen. In Kapitel 3 werden zunächst die Grundidee der Evidenztheorie sowie ihre Vorteile gegenüber der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie erläutert, die sie als geeignet für die Anwendung in der Zustandsbewertung erscheinen lassen. Anschließend werden die grundlegenden Begriffe und Rechenverfahren der Evidenztheorie kurz erläutert. Eine zentrale Rolle kommt der Dempster'schen Regel als Verknüpfungsoperator der Evidenztheorie zu. Kapitel 3.4 beschreibt die Propagation von Evidenz in qualitativen Markovbäumen. Mit Hilfe dieses Ansatzes werden die Konsequenzen abgeleitet, die Hinweise einer Variablen auf andere Variablen aufgrund eines qualitativen Zusammenhangs haben. Dieses Verfahren wird später angewendet, um die zutreffende Diagnose zu ermitteln.

In Kapitel 4 wird das Verfahren zur Zustandsbestimmung am Beispiel eines Leistungstransformators als wertvolles Betriebsmittel mit hohen Investitionskosten, das über umfangreiche Schutz- und Monitoringsysteme verfügt, dargestellt. Kapitel 4.2 erläutert, wie ausgehend von dem qualitativen Zusammenhang zwischen Primärinformationen und möglichen Diagnosen ein qualitativer Markovbaum als Modell entwickelt werden kann. Im folgenden Kapitel 4.3 wird der quantitative Zusammenhang hergestellt, indem die Primärinformationen auf die Maßzahlen der Evidenztheorie, die als Massezahlen bezeichnet werden, abgebildet werden. Die Bestimmung der zutreffenden Diagnose durch Propagation von Evidenz in qualitativen Markovbäumen wird in Kapitel 4.4 dargestellt. Durch den Verlauf der Wahrscheinlichkeitsmaße der Evidenztheorie über der Zeit kann das zulässige Instandhaltungsintervall ermittelt werden. Zwei mögliche Verfahren dazu sind in Kapitel 4.5 angegeben. In Kapitel 4.6 erfolgt eine Erweiterung des Modells, so dass der Zeitpunkt der Erfassung der Primärinformationen bei der Zustandsbewertung berücksichtigt wird. Dies ist dadurch motiviert, dass neuere Informationen stärker gewichtet werden sollen als alte, weil sie ein aktuelleres Bild vom Zustand des Betriebsmittels wiedergeben. Die Vorstellung des Verfahrens ist bisher aus Gründen der Übersichtlichkeit anhand einer ausgewählten Komponente des Leistungstransformators, nämlich des Kühlsystems, durchgeführt worden. In Kapitel 4.7 werden die notwendigen Schritte der Modellierung und der Ablauf des Verfahrens zur Zustandsbewertung für den gesamten Leistungstransformator dargestellt. Eine Anwendung auf reale Daten wird in Kapitel 4.8 vorgestellt, um die Praxistauglichkeit des Verfahrens nachzuweisen. Als Beispiel wird die dazu die Interpretation der Gas-in-Öl-Analyse verwendet, die häufig zur Erkennung und Bewertung von Fehlern ölgefüllter, elektrischer Geräte eingesetzt wird.

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick auf weiterführende Arbeiten und Erweiterungen des Modells in Kapitel 5.

2 Asset Management in der elektrischen Energieversorgung

Das „Asset Management“ wird etwa seit der Liberalisierung der Energieversorgung bei den Netzbetreibern der elektrischen Energieversorgungsnetze eingeführt. Der Begriff wird im deutschsprachigen Raum schon seit längerem im Bankwesen für die Verwaltung von Vermögen benutzt. Diese Verwendung entspricht der wörtlichen Übersetzung „Vermögensverwaltung“. Die im Bereich der Energieversorgung verbreitete Übersetzung von „Asset Management“ ist „Anlagenmanagement“. Innerhalb dieser Arbeit wird der Begriff „Asset Management“ ohne Übersetzung beibehalten.

Zurzeit ist es nicht möglich, eine Definition für Asset Management im Kontext der Netzbetreiber elektrischer Energieübertragungsnetze anzugeben, weil keine einheitliche Begrifflichkeit vorhanden ist. Asset Management wird in verschieden Unternehmen, z. T. auch innerhalb eine Unternehmens, unterschiedlich interpretiert /33/. Anhand von zwei Veröffentlichungen /8, 42/ wird im Folgenden eine Beschreibung der Ziele und Inhalte von Asset Management gegeben. Zunächst wird ein allgemeiner Ansatz für das Asset Management dargestellt, der dann für die Anwendung bei Netzbetreiber konkretisiert wird.

Zum Verständnis des allgemeinen Ansatzes für das Asset Management wird zunächst das Konzept des „Stakeholder Value“ erläutert. In der Betriebswirtschaft wird unter diesem Konzept die Erweiterung des „Shareholder Value“-Ansatzes verstanden. Als Shareholder werden die Kapitaleigentümer, also Anteilseigner oder Aktionäre, bezeichnet. Die Kapitaleigentümer haben eine Renditeerwartung an das Unternehmen, dem sie ihr Kapital zur Verfügung stellen. Die Ausrichtung der Unternehmensstrategie auf die Renditeerwartungen der Kapitaleigentümer wird als „Shareholder Value“-Ansatz bezeichnet. In vielen Unternehmen setzt sich allerdings die Erkenntnis durch, dass es weitere Interessengruppen gibt, die gewisse Ansprüche an das Unternehmen stellen. Die Gesamtheit der Interessengruppen mit Ansprüchen an das Unternehmen wird als „stakeholder“ bezeichnet. In /52/ wird folgende allgemeine Definition für „stakeholder“ angegeben: „a person with an interest or concern in something“. Eine genauere und detailliertere Definition ist in /1/ zu finden: „Anybody with some form of interest in a business. As well as shareholders, this includes directors, managers, other employees, customers, subcontractors, and even the general public in cases where the firm's activities impact on the environment.“ Für Unternehmen umfasst das alle am Wirtschaftsprozess Beteiligten, insbesondere alle Gruppen, die in die betrieblichen Prozesse involviert oder von ihnen betroffen sind. Dazu gehören Kapitaleigentümer, Arbeitnehmer, Zulieferer und Verbraucher. Mit diesem Ansatz wird versucht, das Unternehmen in seinem gesamten sozialen Kontext zu erfassen. Der Begriff deckt sich mit der Definition des Projektbeteiligten in DIN 69905. In dieser Arbeit wird der Begriff „Stakeholder“ beibehalten. Die Unternehmensstrategie berücksichtigt bei diesem Ansatz also nicht nur die Interessen der Kapitaleigentümer, sondern bezieht die Ansprüche der anderen Interessengruppen mit ein. Dabei ist immer eine Abwägung erforderlich, da die Interessen häufig in Konkurrenz zueinander stehen. Auf der Basis des „Stakeholder Value“-Ansatzes kann nun eine sehr allgemeine Interpretation von „Asset“ und „Asset Management“ angegeben werden. „Asset“ umfasst alles, was einen Wertzuwachs für die Stakeholder bewirken kann, „Asset Management“ das Management des Prozesses der Wertschöpfung durch die betroffenen Assets. Die Abwägung der konkurrierenden Interessen der Stakeholder ist eine Kernaufgabe des Asset Managements.

Bei der Anwendung auf die Netzbetreiber können folgende Stakeholder identifiziert werden: Eigentümer mit einer Renditeerwartung, Kunden mit Erwartungen an den Preis und die Zuverlässigkeit, Energiehändler mit Erwartungen an die Verfügbarkeit sowie Beschäftigte, Behörden sowie die Öffentlichkeit. Als Assets werden das Übertragungs- und Verteilungsnetz, bestehend aus Transformatoren, Leitungen, Schaltanlagen usw., betrachtet, die das Unternehmen für die Bereitstellung des Produktes Übertragungskapazität mit den dazugehörigen Systemdienstleistungen Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau und Betriebsführung benötigt. Einen wesentlichen Anteil seiner Erlöse erwirtschaftet der Netzbetreiber mit seinem Produkt Übertragungskapazität.

In diesem Kontext wird in /8/ folgende Zieldefinition des Asset Managements angegeben: Über die gesamte Nutzungsdauer ist eine dauerhaft angemessene Rendite unter Aufrechterhaltung definierter Service- und Sicherheitsstandards zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang werden folgende Kernkompetenzen des Asset Managements identifiziert:

- Anlagenstrategieentwicklung
- Investitionsmanagement
- Vertrags- und Auftragsmanagement
- Anlagengeschäftsmanagement

Diese Kernkompetenzen beinhalten Verantwortung des Asset Managements in den drei Feldern Management, Funktionsfähigkeit der Netze und Systemführung. Im Feld des Managements sind das strategische Asset Management einschließlich der Reinvestitionsstrategien und ggf. Rückbaustrategien, das Sicherheitsmanagement, das Risikomanagement, Kosten- und Erlösmanagement sowie die Entwicklung einer Informations- und Kommunikationsstrategie eingeordnet.

Im Risikomanagement sind technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte zu betrachten. Der technische Aspekt deckt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls ab, der in Abhängigkeit des Alters, des Zustands und der Problematik von Überspannungen zu bestimmen und zu bewerten ist. Die wirtschaftlichen Aspekte fassen die Kosten des Ausfalls zusammen, die sich aus Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen und den Kosten für den Ausfall, bestehend aus den Kosten für nicht zeitgerecht gelieferte Energie sowie eventuelle Pönalien, zusammen. Der gesellschaftliche Aspekt umfasst die Bestimmung und Bewertung der Zumutbarkeit von Ausfällen. Neben der Häufigkeit und den Auswirkungen des Ereignisses, die anhand der Anzahl und Wichtigkeit der betroffenen Anschlüsse und der Unterbrechungsdauer bewertet werden können, sind auch Image-Verluste in die Überlegungen einzubeziehen. Da im Asset Management langfristige Entscheidungen im Bereich mehrerer Jahrzehnte zu treffen sind, sind auch folgende Punkte beim Risikomanagement zu berücksichtigen /32/:

- Lastzuwachs
- Entwicklung der Netznutzungsentgelte
- regulatorische Rahmenbedingungen
- Inflationsrate
- Zinssatz
- Wirtschaftswachstum
- Umweltschutzauflagen
- öffentliche Meinung

Informationsmanagement ist ein Schlüssel für erfolgreiches Asset Management /48/. Ein Problem besteht heute darin, dass die erforderlichen Informationen verschiedenen Software-Tools verstreut sind und so dem Asset Manager nicht zur Verfügung zu stehen.

Die Verantwortung für die Funktionsfähigkeit des Netzes umfasst die Festlegung von Instandhaltungsstrategien, das Instandhaltungsmanagement, das Management der Arbeitssicherheit sowie das Ersatzteilmanagement. Im Feld des Betriebs obliegt dem Asset Management die Verantwortung für die Systemführung, das Management von Netzausfällen und anderen Notfällen und das Vertragsmanagement.

Ein wichtiger Aspekt bei der Implementierung des Asset Management Modells ist der organisatorische Aufbau des Unternehmens. Eine strikte organisatorische und strukturelle Trennung von Asset Owner, Asset Management und Service Provider oder Asset Service ist unabdingbar. Dabei ist es unerheblich, ob es Organisationseinheiten innerhalb eines Unternehmens sind oder ob sie als selbständige Unternehmen agieren. Jede dieser drei Einheiten leistet ihren eigenen Beitrag zur Erhöhung des Stakeholder Value. Der Asset Owner trägt zur Wertsteigerung bei, indem er die Bedürfnisse der Stakeholder identifiziert und Vorgaben für Geschäftsziele und Risikobereitschaft macht. Das Asset Management liefert beispielsweise einen Beitrag, indem der Abgleich des aktuellen Risikos mit den Vorgaben des Asset Owner durchgeführt wird oder indem Service Provider mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis beauftragt werden. Der Service Provider führt die spezifizierten Arbeiten zu minimalen Kosten aus und trägt damit zur Erhöhung des Stakeholder Value bei. Die unternehmerischen Steuerungsgrößen sind für das Asset Management die Anlagenrendite und für die Service

Provider die Umsatzrendite. Die dargestellte organisatorische Trennung von Asset Management und Service Provider entkoppelt Anlagerendite und Personalauslastung ermöglicht damit die unabhängige Steuerung und Optimierung. Zwischen Asset Management und Asset Service herrscht ein Auftraggeber-Auftragnehmer-Verhältnis bzw. das Besteller-Ersteller-Prinzip, das über Dienstleistungsvereinbarungen zu regeln ist. Diese Marktorientierung sorgt für eine Vergleichbarkeit mit externen Dienstleistern, sofern Asset Management und Service Provider organisatorische Einheiten desselben Unternehmens sind.

2.1 Instandhaltung

Das Instandhaltungsmanagement zählt zu den Kernkompetenzen des Asset Managements. Zur Unterstützung der Asset Management Entscheidungen sind Software-Tools heute unverzichtbar. Nach einigen grundlegenden Definitionen und Erläuterungen zu gängigen Instandhaltungsstrategien werden aktuelle Verfahren zum integrierten Asset- und Instandhaltungsmanagement vorgestellt. Zuerst wird ein Verfahren der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung beschrieben, das sich als übergeordnete Strategie über den bekannten Strategien ereignisorientiert, zeitorientiert und zustandsorientiert versteht. Anschließend wird ein Verfahren vorgestellt, dass die Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung durchführt und das vorhandene Expertenwissen personenunabhängig zur Verfügung stellt. Daraus lassen sich Empfehlungen für die Instandhaltungsstrategie ableiten. Den Abschluss bildet ein System zur integrierten Instandhaltungsplanung, das auf dem Konzept der zustandsabhängigen Instandhaltung basiert. Dadurch ergibt sich als Einsatzgebiet die Hoch- und Höchstspannungsebene mit teuren und umfangreich überwachten Betriebsmitteln. Die Bewertung des Zustands der Betriebsmittel, der die zustandsabhängige Instandhaltung erst ermöglicht, ist der zentrale Teil dieser Arbeit.

2.1.1 Begriffe und Definition

DIN EN 13306 /38/ und DIN 31051 /37/ definieren die zentralen Begriffe der Instandhaltung.

Instandhaltung

Unter Instandhaltung versteht man die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.

Inspektion

Zur Inspektion gehören alle Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung.

Wartung

Wartung umfasst alle Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats. Unter Abnutzungsvorrat versteht man den Vorrat der möglichen Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen, der einer Betrachtungseinheit aufgrund der Herstellung, Instandsetzung oder Verbesserung innewohnt.

Instandsetzung

Zur Instandsetzung gehören alle Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand, mit Ausnahme von Verbesserungen.

Verbesserung

Unter Verbesserung versteht man die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern.

2.1.2 Instandhaltungsstrategien

Die Instandhaltungsstrategie beschreibt, welche Maßnahmen an welchem Objekt aus welchem Anlass durchgeführt werden. Im Folgenden werden die Strategien definiert und erläutert, die aktuell bei der Instandhaltung von Netzen der elektrischen Energieversorgung angewendet werden. Die vier betrachteten Strategien sind:

- ereignisorientierte Strategie
- zeitabhängige Strategie
- zustandsorientierte Strategie
- zuverlässigkeitsorientierte Strategie

Ereignisorientierte Strategie

Instandhaltungsmaßnahmen werden erst dann ergriffen, wenn ein Schaden oder Ausfall des Betriebsmittels vorliegt. Es ist nicht das Ziel, einen Ausfall zu vermeiden, sondern erst beim Auftreten der Störung korrigierend einzugreifen. Ebenfalls gebräuchlich sind die Begriffe ausfallorientierte Strategie oder korrigierende Instandhaltung. Im internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „corrective maintenance“ verwendet. Die ereignisorientierte Strategie findet im Hoch- und Höchstspannungsnetz praktisch keine Anwendung.

Zeitabhängige Strategie

Die zeitabhängige Strategie sieht in regelmäßigen Zeitintervallen Inspektionen und Wartungen vor, um Instandsetzungen aufgrund von Schäden zu vermeiden. Der aktuelle Zustand der Betriebsmittel wird bei dieser Strategie nicht berücksichtigt. Das führt dazu, dass der Abnutzungsvorrat gering belasteter Betriebsmittel nicht ausgenutzt wird und die zeitabhängige Strategie damit im Regelfall wirtschaftlich nicht optimal ist. Die Begriffe vorbeugende oder planmäßige Instandhaltung sind für diese Strategie ebenfalls gebräuchlich. Im internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „time based maintenance“ verwendet.

Zustandsorientierte Strategie

Bei der zustandsorientierten Strategie werden Wartungen oder Instandsetzungen erst dann durchgeführt, wenn es der Zustand des Betriebsmittels erfordert. Die Wartungsintervalle, die sich aus dieser Strategie ergeben, sind nicht mehr konstant. Die Betriebsmittel werden besser ausgenutzt, als es bei Anwendung der zeitabhängigen Strategie der Fall ist. Häufig wird für diese Strategie die Abkürzung CBM des englischen Ausdrucks „condition-based maintenance“ verwendet.

Zuverlässigkeitsorientierte Strategie

Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung verbindet Elemente der ereignisorientierten, zeitabhängigen und zustandsabhängigen Strategie, um die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels in dem erforderlichen Maß sicherzustellen. Neben dem Zustand des Betriebsmittels wird auch seine Wichtigkeit im Netz berücksichtigt. Im Englischen wird der Begriff „reliability centred maintenance“ (RCM) für diese Strategie verwendet.

Die Festlegung einer Instandhaltungsstrategie ist eine der Kernaufgaben des Asset Managements. Dabei ist zu berücksichtigen, welche Anforderungen an die Informationen über das Betriebsmittel durch die einzelnen Strategien gestellt werden. In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Informationsquellen kann die Instandhaltungsstrategie nicht beliebig gewählt werden. In Bild 2.1 werden die zur Verfügung stehenden Eingangsdaten in die fünf Klassen

- Warn- und Störmeldungen,
- Störungs- und Schadensstatistik,
- Inspektionsergebnisse,
- Diagnoseverfahren und
- messtechnische Überwachung

eingeteilt.

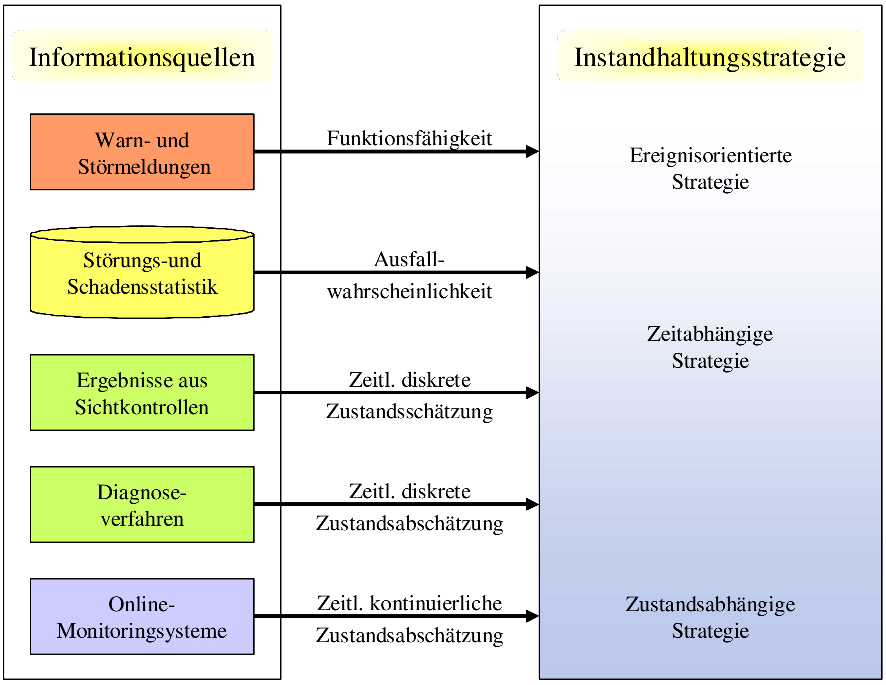

Bild 2.1: Strategie in Abhängigkeit der Informationsquellen

Warnmeldungen entstehen dann, wenn eine gemessene Größe die obere Warnschwelle überschreitet oder die untere Warnschwelle unterschreitet und das Betriebsmittel somit am Rand seines zulässigen Betriebsbereiches betrieben wird. Störmeldungen zeigen Gefahrenzustände, Fehler und Mängel der Betriebsmittel an. Das Verlassen des zulässigen Betriebsbereiches führt in der Regel zur Auslösung der zugeordneten Schutzeinrichtungen, wodurch dann eine Störmeldung ausgelöst wird. Warn- und Störmeldungen liefern also eine Information über die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels. Diese Information kann für alle angegebenen Instandhaltungsstrategien genutzt werden. Sind Warn- und Störmeldungen allerdings die einzig zur Verfügung stehende Informationsquelle, so kann auf der Basis dieser Daten nur eine ereignisorientierte Strategie durchgeführt werden.

Störmeldungen müssen als betriebswichtige Ereignisse im Betriebstagebuch protokolliert werden. Die systematische Auswertung dieser Ereignisse in Verbindung mit dem Protokoll über die Störungsbeseitigung führt zum Aufbau einer Störungs- und Schadensstatistik. Hieraus lassen sich Aussagen über die Ausfallwahrscheinlichkeit der Betriebsmittel ableiten. Diese Daten bieten eine Basis zur Abschätzung der Intervalle für die zeitabhängige Instandhaltungsstrategie.

Regelmäßige Sichtkontrollen, z. B. im Rahmen von Anlagenbegehungen, liefern eine zeitlich diskrete Abschätzung des Betriebsmittelzustands. Diese Informationen können genutzt werden, um die Intervalle der zeitabhängigen Instandhaltung zu optimieren, werden aber in der Regel nicht ausreichend sein, um eine zustandsabhängige Strategie durchzuführen. Die Sichtkontrollen stellen eine Inspektion im Sinne der Definition in DIN 31051 und damit selbst eine Instandhaltungsmaßnahme dar.

Ebenfalls unter die Definition der Inspektion fällt die Zustandserfassung mit Diagnoseverfahren. Mit Hilfe spezieller Prüfprozeduren werden Aussagen über den Zustand des Betriebsmittels abgeleitet. Die Prüfungen sind in der Regel technisch und zeitlich aufwändig und erfordern das Freischalten des Betriebsmittels. Beispiele für aktuell diskutierte Diagnoseverfahren an Transformatoren sind Teilentladungsmessungen /41/, die Relaxationsstromanalyse /27, 31/, und die Messung der Übertragungsfunktion /11, 28/. Für die Diagnose an Kabeln werden zum Teil die gleichen Messprinzipien beschrieben /23, 24/, aber auch andere Verfahren wie z. B. die Verlustfaktormessung bei sehr niedriger Frequenz (VLF-Diagnose) /7/. Die Diagnoseverfahren kommen zurzeit aus wirtschaftlichen Gründen nicht regelmäßig zur Anwendung. Ihr Einsatz erfolgt ereignisorientiert nach außergewöhnlichen Belastungen, z. B. Überströmen, Kurzschlüssen oder Überspannungen. Es gibt Ansätze, Diagnoseverfahren zur Befunderhärtung anhand der Ergebnisse einer Zustandsbewertung zu initiieren. /15, 51/.

Unter Online-Monitoring versteht man ein Verfahren, in Betrieb befindliche Betriebsmittel ständig messtechnisch zu überwachen, um daraus Rückschlüsse auf den ordnungsgemäßen Zustand zu erhalten, Fehler durch Früherkennung zu vermeiden und die Instandhaltungsintervalle dem Verschleiß anzupassen /35/. Dazu ist es erforderlich, die Messgrößen prozessnah zu erfassen, zu speichern, zu visualisieren und zu bewerten /18/. Monitoringsysteme sind für verschiedene Betriebsmittel heute kommerziell verfügbar. Ihr Einsatzgebiet sind in erster Linie wichtige und kapitalintensive Betriebsmittel wie Leistungstransformatoren und Leistungsschalter. Dabei ist der Trend zu erkennen, auch kleine und mittlere Baugrößen von Leistungstransformatoren in das Monitoring einzubeziehen /29/. Im Bereich der Verteilungsnetze sind Monitoringsysteme aufgrund der zusätzlichen Kosten die Ausnahme /35/. Um bei den Instandhaltungskosten im Verteilungsnetz Einsparungen zu erzielen, kommen Verfahren zur Anwendung, die mit einer großen Anzahl von Betriebsmitteln umgehen können /36, 50/. Mit Hilfe der zeitlich kontinuierlichen Überwachung der Betriebsmittel durch Monitoringsysteme wird die Durchführung der zustandsabhängigen Instandhaltungsstrategie ermöglicht /21, 43/. Trotzdem gibt es auch durch die Nutzung von Online-Monitoring-Systemen nicht die absolute Sicherheit, dass keine Ausfälle der Betriebsmittel auftreten.

2.2 Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung

Ausgehend von dem derzeitigen hochwertigen Netzausbauzustand in Europa werden die Kosten des Instandhaltungsbereichs, die etwa ein Drittel an den Gesamtkosten der Stromübertragung und –verteilung ausmachen, von den Netzbetreibern aktuell stärker betrachtet /2, 12/. Durch eine systemorientierte Instandhaltungsstrategie und ein effizientes Anlagenmanagement lässt sich das vorhandene Kostensenkungspotential ausnutzen, ohne die Verfügbarkeit der Netzinfrastruktur zu gefährden. In /5, 12, 54/ wird ein Strategie-Tool beschrieben, das dem Anwender die Möglichkeit gibt, die wirtschaftlich sinnvollste Instandhaltungsstrategie zu wählen.

Das Tool basiert auf der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung, die ein strategieübergreifendes Instandhaltungskonzept beschreibt, weil sie Elemente der ereignisorientierten, zeitabhängigen und zustandsorientierten Strategie kombiniert. Die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung ist ein Planungsprozess, der jedem Betriebsmittel oder Betriebsmittelkollektiv die wirtschaftlichste der genannten Instandhaltungsstrategien zuweist. Darüber hinaus wird auch festgelegt, in welcher Reihenfolge die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen oder Austausche durchzuführen sind. Grundvoraussetzung für die Anwendung der zuverlässigkeitsorientierten Strategie zur Erstellung eines optimalen Instandhaltungsprogramms ist die Kenntnis des technischen Zustands und der Wichtigkeit im Netz für alle betrachteten Betriebsmittel.

Die Eingangsdaten für die Bewertung des Zustands sollen kostengünstig und ohne großen Aufwand zu beschaffen sein, müssen andererseits aber auch eine ausreichende Aussagekraft haben. Als Beurteilungskriterien für den Zustand werden Vergleichsmessungen, z. B. im Rahmen zyklischer Inspektionen, visuelle Inspektionen und Beurteilungen durch das Instandhaltungspersonal verwendet. Neben diesen technischen Aspekten werden noch weitere Kriterien berücksichtigt, unter anderem /12/:

- Alter des Betriebsmittels
- Betriebserfahrungen mit typengleichen Geräten
- Art des Löschmediums und Antriebsprinzip bei Leistungsschaltern
- Know-How des Service-Personals
- Qualität der Ersatzteilversorgung für Altgeräte
- Betriebliche Umweltbedingungen
- Neue oder geänderte behördliche Auflagen, Vorschriften und Gesetze

Die Zustandsbewertung kann durch die geeignete Verknüpfung der Beurteilungskriterien mit Hilfe von Bewertungsbögen erfolgen. Die Vorgehensweise wird anhand eines Auszugs aus dem Zustandsbewertungsbogen eines Leistungsschalters nach /44/ gezeigt, der in Tabelle 2.1 dargestellt ist. Die Bewertung der einzelnen Beurteilungskriterien wird in den Bewertungsbogen eingetragen und mit Hilfe der angegebenen Skala auf Zahlen abgebildet. Der Zustand *c* des betrachteten Betriebsmittels ergibt sich dann aus der Summe der mit dem Gewichtungsfaktor *g* gewichteten Bewertungen. Für den so ermittelten Index *c* für den Zustand gilt, dass er umso größer ist, je schlechter der Zustand des betrachteten Betriebsmittels ist. Bedingt durch das Berechnungsverfahren besitzt der Index *c* einen Wertebereich von 0 bis 100.

Tabelle 2.1: Auszug aus dem Beurteilungsbogen für den Betriebsmittelzustand am Beispiel eines Hochspannungsleistungsschalters nach /44/

Kriterium	Skala S		Bewertung b	Gewichtung g
Alter (in Jahren)	< 20 20 - 25 26 - 30 31 - 35 36 - 40 > 40	1 2 3 4 5 6		5
Gesamtzahl von Schaltungen pro Jahr	normal ... hoch	1 ... 3		3
Anzahl von Kurzschluß-abschaltungen	normal ... hoch	1 ... 5		3
Ergebnis aus Messungen	gut ... schlecht	1 ... 6		10
			Zustand c	

Bei der Datenerfassung vor Ort kommen elektronische Organizer (Personal Digital Assistants, PDA) mit einer speziell für diesen Zweck entwickelten Software zum Einsatz /16, 17/. Damit ist eine rationelle Vorgehensweise bei der strukturierten Erfassung der großen Anzahl an Daten bei visuellen Inspektionen gewährleistet. Die bisher üblichen handschriftlich bearbeiteten und unflexiblen Checklisten entfallen. Die erfassten Daten werden elektronisch auf einen PC übertragen und dort verwaltet, archiviert und weiterverarbeitet.

Die Wichtigkeit der Betrachtungseinheit ist gleichbedeutend mit den Ausfallfolgen für das Netz. Sie werden durch die Funktion des Netzes sowie die umgebende Topologie festgelegt. Bei der Feststellung der Wichtigkeit werden unter anderem folgende Parameter verwendet /5/:

- Nichtverfügbarkeit der Energie
- Investitionskosten
- Entfernung zum Reparaturort
- Einfluss des Fehlers auf das ganze System
- Sozialer Einfluss einer Nichtverfügbarkeit, z. B. Krankenhäuser
- Geschäftlicher Einfluss, z. B. Pönale für nicht gelieferte Energie
- Imageschaden des Unternehmens

Zur Berechnung des Index i der Wichtigkeit werden einfache Berechnungsformeln zur Verarbeitung von Zahlenwerten sowie Beurteilungsbögen mit gewichteten Summen analog zur Zustandsbewertung eingesetzt. Ein großer Wert des Index i ist gleichbedeutend mit einer hohen Wichtigkeit des betrachteten Betriebsmittels. Der Index i besitzt genauso wie der Index c des Zustands einen Wertebereich von 0 bis 100.

Grundsätzlich ist es auch möglich, ein Programm zur probabilistischen Zuverlässigkeitsberechnung /3/ zur Bestimmung des Index i der Wichtigkeit einzusetzen. Ergebnisse dieser quantitativen Zuverlässigkeitsberechnung sind Werte wie

- Nicht zeitgerecht gelieferte Energie
- Unterbrochene Leistung
- Unterbrechungskosten, Pönalezahlungen, fehlende Einnahmen

Zur Bestimmung der Wichtigkeit wird bevorzugt der Beitrag des Betriebsmittels zur nicht zeitgerecht gelieferten Energie verwendet. Die Berechnung des Index *i* der Wichtigkeit muss nicht ausschließlich auf den Ergebnissen der quantitativen Zuverlässigkeitsberechnung basieren. Weitere Aspekte, die in der Zuverlässigkeitsberechnung keine Berücksichtigung finden, insbesondere nichttechnische Kenngrößen wie sozialer Einfluss oder Imageschaden, können in die Bestimmung der Wichtigkeit einfließen und gemeinsam mit dem Ergebnis der Zuverlässigkeitsberechnung den Index *i* bilden.

Die Gesamtbewertung und Interpretation der Ergebnisse erfolgt mit Hilfe eines zweidimensionalen Bewertungsdiagramms, s. Bild 2.2, durchgeführt. Auf der Abszisse des Koordinatensystems wird für jedes Betriebsmittel der Index *i* der Wichtigkeit aufgetragen, auf der Ordinate der Index *c* seines Zustands. In Bild 2.2 sind einige Betriebsmittel beispielhaft durch Kreuze eingetragen. Die Unterscheidung hinsichtlich der Art der erforderlichen Maßnahmen erfolgt durch eine Unterteilung der durch *c* und *i* aufgespannten Ebene. Die Betriebsmittel, deren Ausfallverhalten unwichtig für das Gesamtsystem ist, sollen künftig ereignisorientiert instand gehalten werden, weil sich aufgrund der geringen Ausfallfolgen eine Zustandserfassung nicht lohnt. In das Bewertungsdiagramm nach Bild 2.2 übertragen entspricht dies einer Parallelen zur Ordinate durch einen Grenzwert i_C. Die Betriebsmittel, die sich links von dieser Grenze befinden, sind von geringer Wichtigkeit und werden zukünftig unabhängig von ihrem Zustand ereignisorientiert instand gehalten.

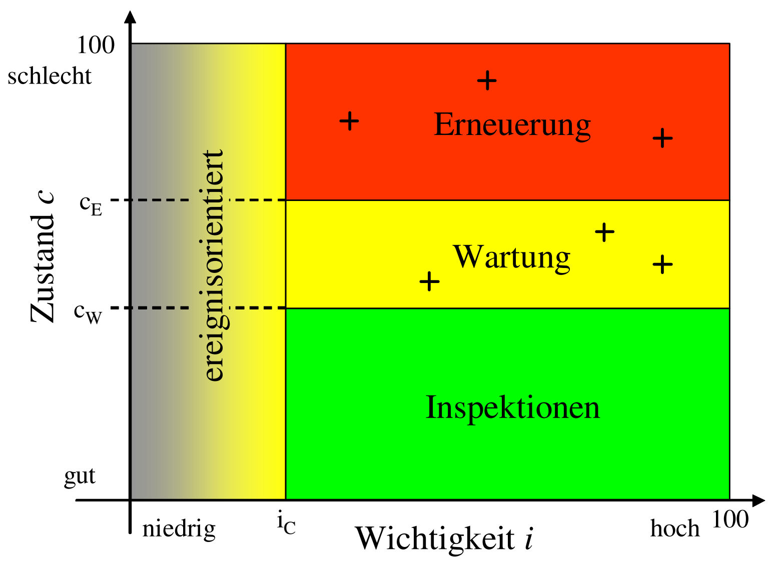

Bild 2.2: Zweidimensionales Bewertungsdiagramm nach /44/

Im Bereich rechts von i_C wird entsprechend dem zustandsorientierten Ansatz davon ausgegangen, dass Instandhaltungsmaßnahmen oder Erneuerung erst ab einem bestimmten technischen Zustand der Betriebsmittel erforderlich sind. Durch zwei Grenzwerte c_W und c_E entstehen für $i > i_C$ drei Bereiche, innerhalb derer folgende Maßnahmen angewendet werden sollen:

- $0 \le c \le c_W$: keine Wartungsmaßnahmen erforderlich, Durchführung von Inspektionen zur Überwachung des Betriebsmittels
- $c_W \le c \le c_E$: Durchführung von Wartungsmaßnahmen
- $c_E \le c \le 100$: Erneuerung des Betriebsmittels

Die Festlegung der Grenzwerte i_C, c_W und c_E erfolgt anhand der anwenderspezifischen Erfahrungen des Netzbetreibers. Ein Beispiel für in der Praxis angewendete Werte ist in /44/ dargestellt. Mit der dargestellten Vorgehensweise wird jedem Betriebsmittel anhand seiner Bedeutung im Netz und seines technischen Zustands mit Hilfe des zweidimensionalen Bewertungsdiagramms eine adäquate Instandhaltungsstrategie zugeordnet. Bei der großen Anzahl der im Netz vorhandenen Betriebsmittel, deren Instandhaltungsstrategie so festgelegt wird, werden sich im Allgemeinen mehrere Betriebsmittel in jedem Bereich des Bewertungsdiagramms befinden. Aufgrund der Personalkapazitäten und der eingeschränkten finanziellen Möglichkeiten können nicht an allen Betriebsmitteln eines Bereichs die festgelegten Maßnahmen gleichzeitig durchgeführt werden. Es ist notwendig, eine Reihenfolge der Betriebsmittel in jedem Bereich des Bewertungsdiagramms anzugeben. Die Festlegung der Reihenfolge kann ebenfalls anhand des Bewertungsdiagramms erfolgen. Dazu wird in das Diagramm zusätzlich die Gerade d als Winkelhalbierende des II. und IV. Quadranten mit der Geradengleichung

$$c = -i \tag{2.1}$$

eingezeichnet, s. Bild 2.3.

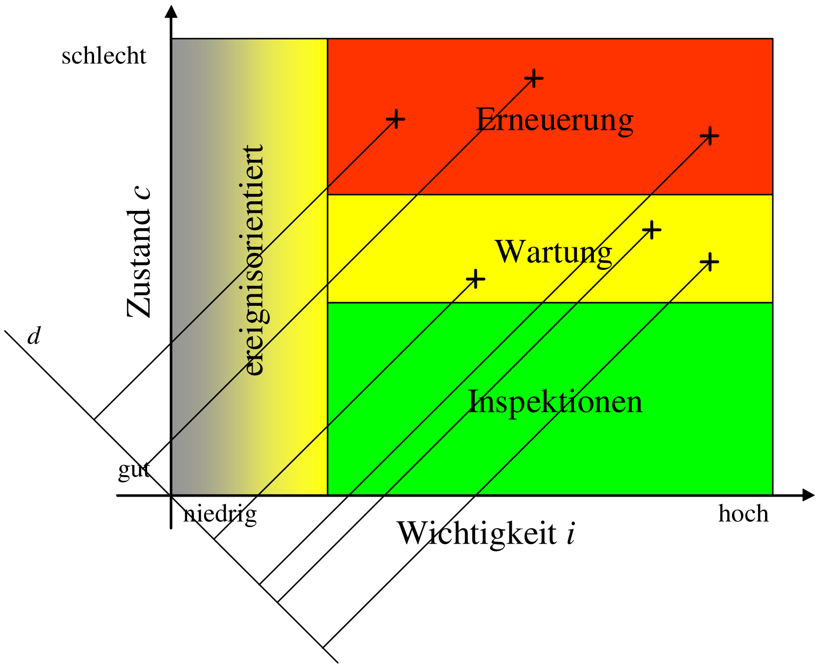

Bild 2.3: Priorität der Betriebsmittel nach /5/

Im nächsten Schritt wird der Abstand der Punkte in dem Diagramm, die die einzelnen Betriebsmittel repräsentieren, zur Geraden *d* bestimmt. Für jeweils drei exemplarische Betriebsmittel in den Bereichen „Erneuerung" und „Wartung" ist der Abstand in Bild 2.3 durch Strecken senkrecht zur Geraden *d* dargestellt. Die Länge der Strecke ist der Abstand des entsprechenden Punktes zur Geraden *d*. Die Reihenfolge der Betriebsmittel, an denen die Maßnahmen des zugehörigen Bereichs durchgeführt werden sollen, wird durch den Abstand zur Geraden *d* festgelegt. Je größer der Abstand, umso dringlicher müssen Maßnahmen ergriffen werden.

Bei der dargestellten Wahl der Geraden *d* gehen die Kriterien Zustand und Wichtigkeit gleichberechtigt in die Entscheidungsfindung ein. Ausgehend von der zuverlässigkeitsorientierten Strategie lassen sich die Instandhaltungsstrategien ereignisorientiert, zustandsorientiert und zeitabhängig durch eine andere Wahl der Geraden *d* in dem Bewertungsdiagramm darstellen /6/. In Bild 2.4a) fällt die Gerade *d* mit der Abszisse zusammen. Damit geht noch nur der Zustand *c* in den Abstand zur Geraden *d* ein, von der Wichtigkeit *i* ist er unabhängig. Dies entspricht der Durchführung der zustandsorientierten Instandhaltung. Die Maßnahmen in den Bereichen I bis III können analog zu Bild 2.2 festgelegt werden.

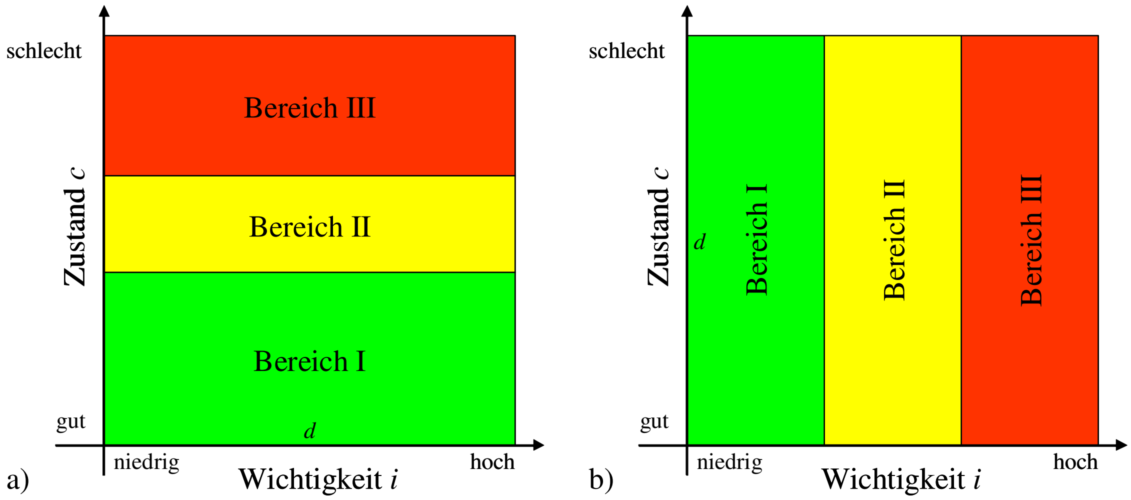

Bild 2.4: Interpretation der Strategien nach /6/

a) Zustandsorientierte Strategie

b) ereignisorientierte bzw. zeitorientierte Strategie

In Bild 2.4b) fällt die Gerade d mit der Ordinate zusammen. Der Abstand zur Geraden d hängt nur noch von der Wichtigkeit i ab und ist vom Zustand c unabhängig. Die Interpretation kann folgendermaßen aussehen /6/:

- Bereich I: keine Wartung
- Bereich II: Wartung alle zehn Jahre
- Bereich III: Wartung alle fünf Jahre

Das entspricht der Anwendung der ereignisorientierten Strategie, wenn die Bereiche II und III entfallen, bzw. der zeitabhängigen Instandhaltung, wenn der Bereich I entfällt. Bei der Berücksichtigung aller drei Bereiche wird eine Kombination von ereignisorientierter und zeitabhängiger Instandhaltung durchgeführt.

Das dargestellte Tool steht heute im Rahmen von Application Service Providing (ASP) zur Verfügung /2/. Es ist als Web-Applikation im Internet aufgesetzt und kann mit jedem Standardbrowser genutzt werden. Die Betriebsmitteldaten sind auf einem zentralen Internet-server in einer Datenbank gespeichert. Der Anwender muss sich nicht mehr mit der Verfüg-barkeit und Pflege der Datenbank beschäftigen. Es entsteht kein Aufwand mehr für die Administration der Hard- und Software. Für den Anwender entfällt der Nachteil, dass

Datenbankzugriffe und Auswertungen ausschließlich auf einem Computer durchgeführt werden können, sowie der Nachteil der Datenhaltung auf einer lokalen Festplatte. Für die Nutzung ist nur ein Computer mit Internetanschluss notwendig. Die Verantwortlichkeit für die Sicherstellung des laufenden Betriebs wechselt vom Anwender zum ASP-Anbieter.

2.3 Betriebsmittelbewertung mit Expertensystemen

Ein weiterer Ansatz zur Unterstützung der Instandhaltungsplanung ist in /20, 26/ dargestellt und soll im Folgenden kurz zusammengefasst werden. Die Software analysiert und bewertet die für den bedarfsgerechten Einsatz zur Verfügung stehenden Mittel und gibt Empfehlungen für den Umfang und Inhalt von Instandhaltungsmaßnahmen. Der Einsatz zielgerichteter Instandhaltungsmaßnahmen ist für den Netzbetreiber nur auf der Basis objektiver Entscheidungsgrundlagen möglich. Da derzeit nur eingeschränkt Alterungsmodelle von den Betriebsmitteln existieren und die Herstellerangaben häufig als zu restriktiv bewertet werden, steht als Entscheidungsgrundlage im Wesentlichen nur Expertenwissen zur Verfügung, das allerdings subjektiv geprägt ist. Durch Personalanpassungsmaßnahmen oder Personalwechsel bei den Netzbetreibern kann das vorhandene Know-how in Form von Betriebserfahrung über Schwachstellen sowie Wartungsumfang für Betriebsmitteltypen und –individuen verloren gehen. Die Aufgabe, dieses Wissen personenunabhängig verfügbar zu machen, ist somit eine Voraussetzung für eine zielgerichtete Instandhaltung.

Das Instandhaltungssystem lässt sich funktional in die typischen Funktionsbausteine

- Stammdatenverwaltung
- Dokumentenmanagement
- Störungserfassung
- Lebenslauf-Beschreibung
- Instandhaltung

gliedern /14/.

In der Stammdatenverwaltung werden alle relevanten Informationen zu den eingesetzten technischen Anlagen erfasst. Aufbauend auf den Stammdaten werden die Objekte typisiert, indem Betriebsmittel zu Gruppen zusammengefasst werden, die aus Sicht der Instandhaltung gleichartig behandelt und bewertet werden. In der Regel werden die Betriebsmittel nach Hersteller und Herstellertyp typisiert, es sind aber auch gröbere Kategorien, z. B. Betriebsmittel unabhängig vom Hersteller mit gleichem Konstruktionsprinzip, denkbar.

Mit dem Dokumentenmanagement werden ergänzende Informationen zu den Betriebsmitteln verwaltet und bei Bedarf dem Anwender zur Verfügung gestellt. Dazu zählen z. B. Arbeitsanweisungen, Gebrauchsanleitungen und Datenblätter. Das Dokumentenmanagement kann mit unterschiedlichen Datenformaten wie Text-, Tabellen- oder Bilddateien verarbeiten.

Zur systematischen Ursachenanalyse von Störungen und zur einfacheren Identifizierung von Schadenschwerpunkten ist eine Erfassung der aufgetretenen Störungen an den Betriebsmitteln durchzuführen. Dazu stellt das Modul zur Störungserfassung vordefinierte Formulare bereit, mit denen neben der betriebsgerechten Aufzeichnung des Störungsereignisses auch der Ablauf der Störungsbeseitigung erfasst wird. Die Schadenanalyse bildet die Basis zur Ableitung geeigneter Instandhaltungsmaßnahmen und zur Optimierung des Störungsmanagements.

Der Lebenslauf dokumentiert für jedes Betriebsmittel sämtliche durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen und relevanten Ereignisse in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht. Eine rechnergestützte Verwaltung des Lebenslaufs erleichtert die fachliche Beurteilung und sorgt für Rechtssicherheit bei Prüfungen. Anhand der gespeicherten Daten lassen sich die Kosten über die gesamte Lebensdauer des Betriebsmittels (Life Cycle Costs) ermitteln. Die Kostenkontrolle wird durch die Gegenüberstellung von geplanten und tatsächlich angefallenen Kosten erleichtert.

Das Modul Instandhaltung ermöglicht die Festlegung, Planung und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen einschließlich der Kosten. Die Inhalte der Instandhaltungsmaßnahmen werden beim Netzbetreiber in Form von Instandhaltungsprotokollen für einzelne Maßnahmen festgelegt. Die Veranlassung von Instandhaltungsmaßnahmen kann sowohl auf der Basis fester Zeitzyklen im Rahmen vorbeugender Instandhaltung als auch zustandsorientiert auf der Basis von Bewertungsfunktionen durchgeführt werden. Die Budgetierung von Instandhaltungsmaßnahmen wird durch die Erfassung typischer Kosten ermöglicht.

Das Bewertungsverfahren weist die in Bild 2.5 dargestellte Struktur auf. Die Eingangsdaten werden von den Komponenten des Instandhaltungssystems oder über externe Schnittstellen zur Verfügung gestellt und einer zweistufig organisierten Bewertung sowie einer nachgeschalteten Verdichtung zugeführt.

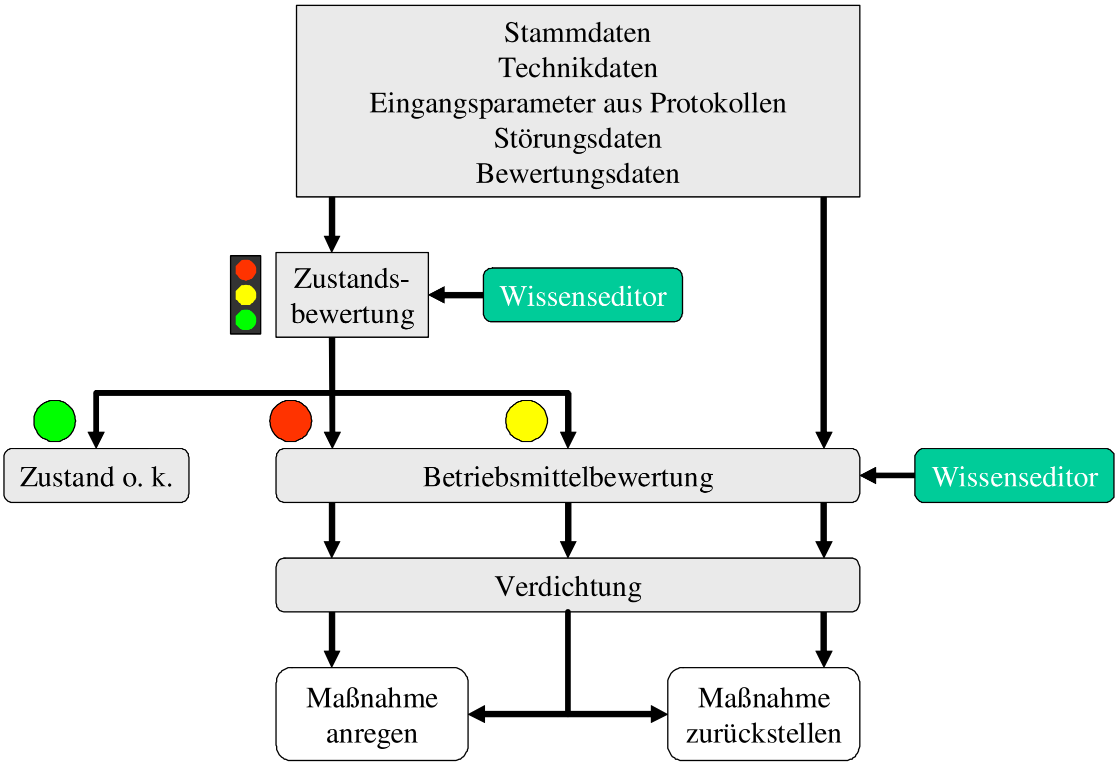

Bild 2.5: Struktur des Bewertungssystems nach /25/

Zunächst wird eine Bewertung des Betriebsmittels aus rein technischer Sicht durchgeführt. Dazu werden die im Rahmen der Diagnostik erfassten Messwerte sowie gegebenenfalls automatisch aus dem Netzleitsystem übertragenen Werte genutzt. Das Ergebnis der Zustandsbewertung wird dreistufig in Form von Ampelwerten „rot“, „gelb“ und „grün“ dargestellt. Die Werte haben folgende Bedeutung:

- rot: Das Betriebsmittel kann seine Funktion im System nicht erfüllen, so dass auf jeden Fall Instandhaltungsmaßnahmen notwendig sind.
- gelb: Das Betriebsmittel kann seine Funktion noch erfüllen, es kündigt sich aber trotzdem Instandhaltungsbedarf an.
- grün: Aufgrund des technischen Zustands sind keine Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich.

Die Erfassung des zur Bewertung erforderlichen Expertenwissens erfolgt mittels eines Wissenseditors. Da das Wissen stetigen Veränderungen unterworfen ist, ermöglicht der Wissenseditor eine flexible Erfassung und Verwaltung. Darüber hinaus ist die Verarbeitung aller Entscheidungsgrundlagen, neben dem Expertenwissen vor allem Herstellervorgaben und Alterungsmodelle, gewährleistet. Die Eingangsdaten werden über parametrierbare Funktionen (Parser) zu Kriterien verdichtet. Für die Kriterien können vom Anwender Grenzwerte angegeben werden. Damit ist die Zustandsbewertung weitgehend flexibel.

Die Bewertungsergebnisse mit den Werten rot oder gelb werden einer weiteren Bewertung unterzogen, die als „Betriebsmittelbewertung" bezeichnet wird. Die Betriebsmittel werden anhand verschiedener, vom Anwender angebbarer Kriterien mit parametrierbarer Gewichtung hinsichtlich der Bewertungsklassen Substanzverlust, Bedeutung und Wirtschaftlichkeit bewertet. Diese Parameter werden normiert und in einem dreidimensionalen Koordinatensystem aufgetragen. Für jedes Betriebsmittel ergibt sich ein Punkt innerhalb eines Würfels. Mit einer Ebene, die entsprechend der gewählten Instandhaltungsstrategie ausgerichtet ist, wird im Sinne einer Priorisierung die Reihenfolge der Betriebsmittel, an denen Wartungsmaßnahmen durchzuführen sind, festgelegt.

Im Anschluss an die dargestellte Bewertung werden die erforderlichen Maßnahmen mit Hilfe der Verdichtung konkretisiert. Dem Asset Manager stehen folgende Funktionen als Entscheidungshilfe zur Verfügung:

- Ermittlung des wirtschaftlich maximal sinnvollen Aufwands für eine Instandsetzungsmaßnahme
- Gegenüberstellung der voraussichtlichen Kosten bei Erneuerung bzw. Instandsetzung
- Betrachtung des zukünftig zu erwartenden Erneuerungsaufwands auf Basis der Altersstruktur

Das Instandhaltungssystem ist mit einer anwendungsfreundlichen Benutzeroberfläche ausgestattet, die auf herkömmlichen Webbrowsern dargestellt wird. Damit ist zum einen ein plattformunabhängiger Einsatz gewährleistet, zum anderen wird die Vor-Ort-Erfassung von Daten und die rechnergestützte Protokollierung von Instandhaltungsmaßnahmen unterstützt. Weiterhin sind umfangreiche Schnittstellen zu vorhandenen rechnergestützten Systemen der Netzbetreiber vorhanden. Diese sind nicht nur aus Kostengründen, sondern auch zur Vermeidung redundanter Datenhaltung wünschenswert.

Das dargestellte Verfahren wird erfolgreich in der Instandhaltung von Hoch- und Mittelspannungsanlagen eingesetzt. In /25/ wird die Anwendung bei der Instandhaltung von Windenergieanlagen und Windparks unter Einsatz von Online-Diagnoseverfahren beschrieben. Die Anwendung des Instandhaltungssystems ist jedoch nicht auf die elektrische Energieversorgung beschränkt, sondern bietet vorkonfigurierte Lösungen für typische Aufgabenstellungen aller Ver- und Entsorgungsbereiche wie z. B. Gas, Wasser, Abwasser und Fernwärme /14/.

2.4 Integrierte Instandhaltungsplanung

2.4.1 Motivation

Wenn für die Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen die ereignisorientierte Strategie gewählt wird, wird in Kauf genommen, dass die Maßnahmen nicht planbar sind. Sobald eine Störung oder ein Schaden an einem Betriebsmittel auftritt, werden unmittelbar Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich. Die erforderliche Freischaltung kann unter ungünstigen Umständen in Abhängigkeit des aktuellen Schaltzustands und der Netzlast zur Überlastung weiterer Betriebsmittel führen. Weiterhin muss ein umfangreiches Materiallager mit Ersatzteilen oder Ersatzbetriebsmitteln ständig zur Verfügung stehen, um im Störungsfall ausreichend schnell reagieren zu können. Das Personal muss aus dem Tagesgeschäft herausgelöst werden, um die Störungsbehebung durchzuführen. Eine Planung des Personaleinsatzes ist im Voraus nicht möglich.

Bei den anderen bereits genannten Instandhaltungsstrategien sind die Maßnahmen koordinierbar und planbar. Dadurch werden die Nachteile, die bei der Anwendung der ereignisorientierten Strategie auftreten, weitestgehend vermieden. Die erforderlichen Freischaltungen können in eine Zeit mit geringer Netzlast verschoben werden, oder die Topologie des Netzes kann im Voraus so verändert werden, dass keine Überlastungen auftreten. Die Anzahl der Freischaltungen kann minimiert werden, indem mehrere Betriebsmittel, die gleichzeitig von einer Freischaltung betroffen sind, in die Instandhaltungsmaßnahmen einbezogen werden. Dies trifft beispielsweise auf Leistungsschalter und die zugehörigen Trennschalter zu. Der Materialeinsatz ist planbar, so dass die kostenintensive Lagerhaltung entfällt. Die Maßnahmen können so geplant werden, dass das Personal gleichmäßig ausgelastet ist.

In /22, 34/ wird ein System zur integrierten Instandhaltungsplanung vorgestellt, dessen grundlegendes Funktionsprinzip mit den wesentlichen Eigenschaften im Folgenden zusammengefasst dargestellt wird.

2.4.2 Beschreibung des Systems

Das System zur integrierten Instandhaltungsplanung nach /34/ ist in Bild 2.6 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass für die betrachteten Betriebsmittel gemäß Kapitel 2.1.2 ausreichend Informationen über den Zustand der Betriebsmittel zur Verfügung stehen, die die Anwendung einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie ermöglichen.

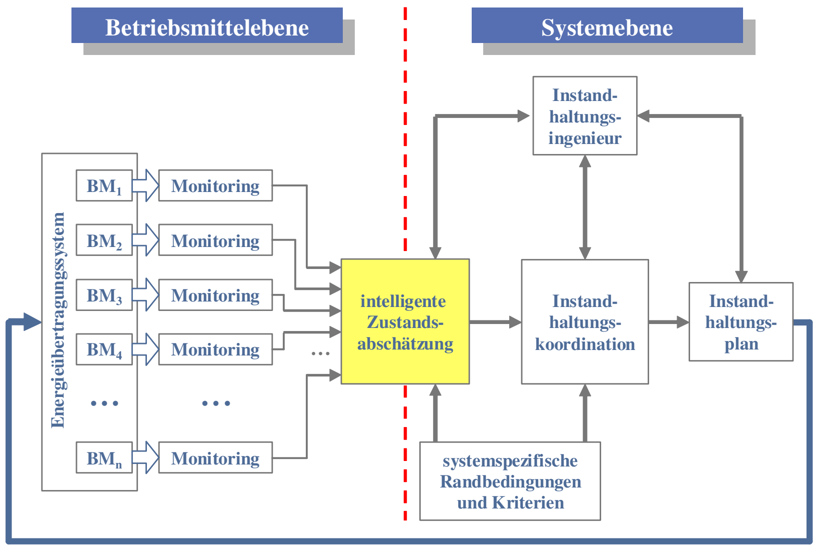

Bild 2.6: Integrierte Instandhaltungsplanung

Das System sieht eine Zweiteilung in Betriebsmittelebene und Systemebene vor. Auf der Betriebsmittelebene sind alle n Betriebsmittel BM_1 bis BM_n eines Energieversorgungssystems dargestellt, die in die Instandhaltungsplanung einbezogen werden soll. Die Betriebsmittel werden wie bereits dargestellt durch Monitoringsysteme, spezielle Diagnoseverfahren und visuelle Inspektionen überwacht mit dem Ziel, den individuellen Instandhaltungsbedarf für jedes Betriebsmittel zu bestimmen.

Auf der Systemebene erfolgt die Grobterminierung der anhand des Instandhaltungsbedarfs ermittelten Maßnahmen für alle Betriebsmittel. Der Instandhaltungsplan stellt das Ergebnis der Terminierung übersichtlich dar (Bild 2.7). Auf der Ordinate sind die einzelnen Betriebsmittel dargestellt, in diesem Beispiel drei Leistungsschalter (LS) und sieben Trennschalter (TS). Die Abszisse ist eine Zeitachse. Die grünen Blöcke kennzeichnen für jedes Betriebsmittel das zulässige Instandhaltungsintervall. Das zulässige Instandhaltungsintervall gibt den Zeitraum an, in dem die Instandhaltungsmaßnahmen begonnen werden müssen. Dagegen ist es nicht erforderlich, die Arbeiten innerhalb dieses Zeitraums abzuschließen. Die roten Blöcke kennzeichnen für jedes Betriebsmittel den Zeitraum, in dem die Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden. Deutlich erkennbar ist die unterschiedliche Dauer der Maßnahmen für Leistungsschalter und Trennschalter.

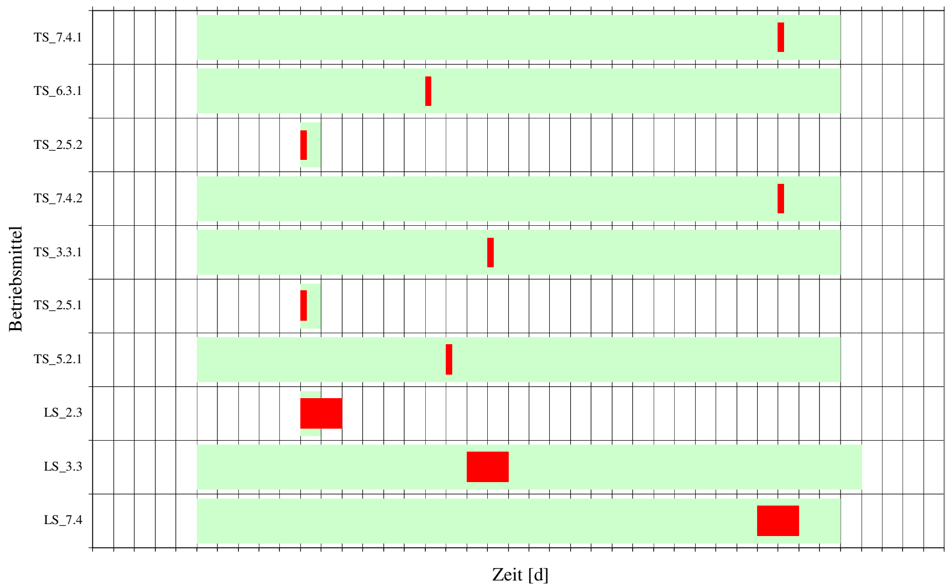

Bild 2.7: Darstellung des Instandhaltungsplans

Der für jedes Betriebsmittel ermittelte Instandhaltungsbedarf besteht aus der Art der notwendigen Maßnahmen und einer Abschätzung des Zeitpunktes, wann diese Maßnahmen durchgeführt werden müssen. Um überhaupt eine Koordinierung der Maßnahmen zu ermöglichen, kann der Zeitpunkt der Maßnahmen nicht als fester Termin angegeben werden, weil der Instandhaltungsplan damit dann bereits eindeutig bestimmt ist. Daher wird für die Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen ein erlaubtes Zeitintervall angegeben, das aus dem frühesten Beginn und dem spätesten Beginn der Maßnahmen besteht. Die Dauer der Instandhaltungsmaßnahmen ist bereits durch die Art der durchzuführenden Arbeiten festgelegt.

Bei der Erstellung der Instandhaltungspläne müssen systemspezifische Randbedingungen und Kriterien eingehalten werden. Solche Randbedingungen sind beispielsweise:

- Einhaltung des zulässigen Instandhaltungsintervalls
- keine Betriebsmittelüberlastungen
- Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes
- Verfügbarkeit von Personal
- Verfügbarkeit von Material

Zur Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen ist in der Regel die Freischaltung des betroffenen Betriebsmittels erforderlich. Es wird im Vorfeld mit Hilfe von Lastflussrechnungen geprüft, ob durch die Freischaltungen andere Betriebsmittel überlastet werden und ob das zulässige Spannungsband an allen Knoten eingehalten wird. Dazu muss zumindest eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Netzlast zum Zeitpunkt der Durchführung der Instandhaltungsmaßnahme vorliegen. Wird bei dieser Rechnung eine Betriebsmittelüberlastung oder eine Verletzung des zulässigen Spannungsbandes festgestellt, ist der vorgesehene Termin für die Instandhaltungsmaßnahme unzulässig und muss verschoben werden.

Mit dem zur Verfügung stehenden Personal kann nur eine begrenzte Anzahl von Instandhaltungsmaßnahmen zeitlich parallel ausgeführt werden. Bei der Erstellung der Instandhaltungspläne muss daher überprüft werden, ob die zeitgleich geplanten Arbeiten mit dem vorhandenen Personal durchgeführt werden können. Dabei müssen auch vorübergehende Verringerungen der Personalstärke, z. B. durch Urlaub, berücksichtigt werden, sofern sie im Vorfeld bekannt sind.

Die Berücksichtigung des notwendigen Materials ist im Allgemeinen weniger kritisch. Neben der Lagerhaltung sind für nicht oder nicht in ausreichender Menge im Lager vorhandene Materialien die üblichen Lieferzeiten zu berücksichtigen.

Alle möglichen Instandhaltungspläne, die die vorgegebenen Randbedingungen erfüllen, sind gültige Instandhaltungspläne. Sofern die zulässigen Instandhaltungsintervalle nicht zu eng gewählt sind, lassen sich stets mehrere gültige Instandhaltungspläne finden. Zur Auswahl des besten Plans ist es erforderlich, die Pläne zu bewerten. Bei der Bewertung der gültigen Instandhaltungspläne werden wirtschaftliche und unternehmensspezifische Kriterien verwendet. Die Instandhaltungsmaßnahmen sollen aus wirtschaftlichen Gründen so spät wie möglich durchgeführt werden. Ein Plan ist nach diesem Kriterium also besser, wenn die erforderlichen Maßnahmen zum Ende des zulässigen Instandhaltungsintervalls durchgeführt werden. Zur Vermeidung unnötiger Fahrzeit und -kosten sind Instandhaltungsmaßnahmen an mehreren Betriebsmitteln in einer Station möglichst gleichzeitig durchzuführen. Ein weiteres Kriterium ist die Auslastung des Personals. Es ist anzustreben, das Personal über den Betrachtungszeitraum möglichst gleichmäßig auszulasten. Instandhaltungspläne, die Zeiträume mit einer großen Anzahl parallel auszuführender Maßnahmen und Zeiträume ohne Maßnahmen aufweisen, sind demzufolge schlechter zu bewerten als Pläne, die die Instandhaltungsmaßnahmen gleichmäßig verteilen. Für den verantwortlichen Instandhaltungsingenieur besteht eine direkte Eingriffsmöglichkeit, indem er nach unternehmensspezifischen Kriterien Zeiträume definieren kann, in denen die Instandhaltungsmaßnahmen bevorzugt durchzuführen sind.

Die Zusammenfassung der einzelnen Bewertungskriterien zu einer Maßzahl wird durch ein Fuzzy-Verfahren realisiert. Der Instandhaltungsingenieur hat hier eine weitere direkte Eingriffsmöglichkeit, indem er die Wichtigkeit der einzelnen Bewertungskriterien durch linguistische Werte „sehr niedrig“, „niedrig“, „mittel“, „hoch“ und „sehr hoch“ angeben kann. Abschließend werden die Pläne anhand ihrer Bewertung sortiert und dem Instandhaltungsingenieur zur Verfügung gestellt. Er kann und muss dann aus dieser Menge der bewerteten Instandhaltungspläne einen zur Ausführung auswählen. Die Ausführung des gewählten Plans hat im Sinne einer Rückkopplung direkte Auswirkungen auf die Betriebsmittel des Energieübertragungssystems, s. Bild 2.6.

Die Erstellung der Instandhaltungspläne geschieht vollautomatisch durch das System zur integrierten Instandhaltungsplanung anhand des Instandhaltungsbedarfs der berücksichtigten Betriebsmittel. Um eine Auswahl optimaler Instandhaltungspläne zu generieren, wird ein genetischer Algorithmus verwendet. Ausgehend von einer Menge zufällig generierter gültiger Instandhaltungspläne wird durch Mutation, Rekombination und Selektion eine neue Menge von Plänen generiert. Dabei entstehende, ungültige Pläne werden verworfen. Die Bewertung der gültigen Pläne, die für die Selektion erforderlich ist, erfolgt anhand der bereits dargestellten Kriterien.

Bisher nicht implementiert ist die Berücksichtigung der Wichtigkeit der Betriebsmittel im Netz z. B. anhand von Zuverlässigkeitsanalysen. Diese Erweiterung ist erforderlich, wenn das dargestellte System zur zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung eingesetzt werden soll. Auf der Systemebene kann die Wichtigkeit der Betriebsmittel als systemspezifisches Kriterium bei der Bewertung und Optimierung der Instandhaltungspläne berücksichtigt werden.

Das Bindeglied zwischen der Betriebsmittelebene und der Systemebene stellt ein System zur intelligenten Zustandsabschätzung dar. Anhand der Daten der Betriebsmittelüberwachung muss die Zustandsabschätzung die Eingangsdaten für die Instandhaltungsplanung liefern. Diese bestehen zum einen aus den erforderlichen Maßnahmen. Damit ist direkt die Dauer sowie der erforderliche Personal- und Materialeinsatz festgelegt. Zum anderen muss das zulässige Zeitintervall für den Beginn der Instandhaltungsmaßnahmen abgeschätzt werden. Derzeit gibt es keine Lösung, wie die Daten der Betriebsmittelüberwachung auf die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen und das zulässige Instandhaltungsintervall abgebildet werden können. In dieser Arbeit wird ein Lösungsansatz für diese Fragestellung auf der Basis der Evidenztheorie nach Dempster und Shafer vorgestellt.

Das leistungsfähige Programm zur Koordinierung der Instandhaltungsmaßnahmen und Optimierung der Instandhaltungspläne lässt sich ohne Modifikationen auch einsetzten, wenn die zeitabhängige Instandhaltungsstrategie angewendet wird (Bild 2.8).

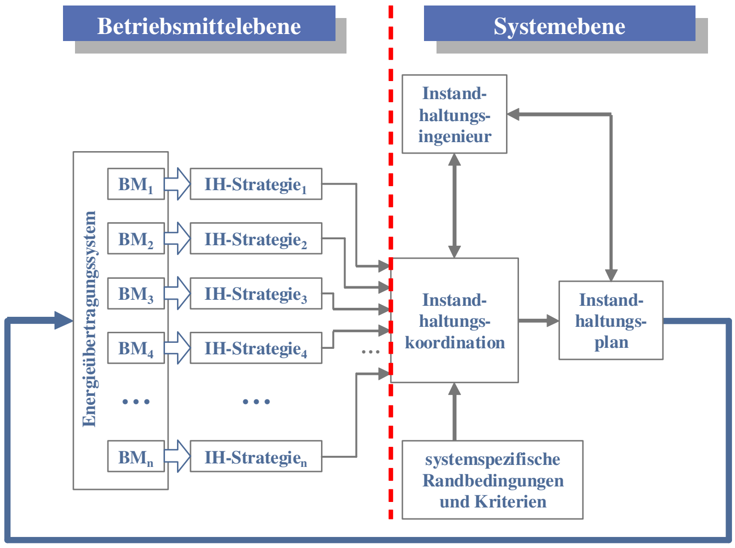

Bild 2.8: Instandhaltungsplanung bei zeitabhängiger Strategie

Für jedes Betriebsmittel wird die Instandhaltungsstrategie festgelegt, die bestimmt, in welchen festen Zeitabständen welche Maßnahmen durchzuführen sind. Zusätzlich muss noch die Länge des zulässigen Instandhaltungsintervalls als fester Wert vorgegeben werden. Aus diesen Angaben kann dann für die nächste fällige Instandhaltungsmaßnahme das zulässige Instandhaltungsintervall bestimmt werden. Damit liegen alle erforderlichen Eingangsdaten für die Koordinierung und Optimierung der Instandhaltungsmaßnahmen vor.

3 Evidenztheorie

3.1 Motivation

Wenn in der technischen Anwendung Aussagen nicht exakt bestimmbar, sondern mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind, bedient man sich regelmäßig der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Damit lassen sich Eintrittswahrscheinlichkeiten für Ereignisse bestimmen, die die Grundlage weiterer Entscheidungen sind. Mathematisch gründet sich die Theorie auf die drei Axiome von Kolmogoroff und wird auch als Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie bezeichnet. Eine anschauliche Ableitung der Wahrscheinlichkeitstheorie kann durch die Betrachtung der relativen Häufigkeit zufälliger Ereignisse erfolgen. Allerdings lassen sich nicht alle Typen unsicheren Wissens mit Hilfe der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie adäquat modellieren. Die Abbildung des Fehlens von Wissen, also der Unwissenheit, ist in der Wahrscheinlichkeitstheorie nur möglich, wenn den zugrunde liegenden Ereignissen bestimmte Eigenschaften unterstellt werden. Ebenso kann gezeigt werden, dass es nicht sinnvoll ist, die Plausibilität von Ereignissen durch Wahrscheinlichkeiten darzustellen /49/.

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 dargestellt, wird die Anwendung der zustandsabhängigen Instandhaltungsstrategie erst durch die Nutzung der umfangreichen Eingangsdaten möglich. Andererseits besteht mit zunehmender Datenmenge die Gefahr, dass der aus allen Eingangsgrößen gebildete Datensatz inkonsistent wird oder einzelne Größen widersprüchliche Aussagen liefern. Als Ursachen sind beispielsweise die Querempfindlichkeiten der Sensoren, die Fehleranfälligkeit der Sensoren, z. B. in /10/ für Dichtewächter von SF_6-Schaltern dargestellt, sowie Fehler in der Datenübermittlung und -verarbeitung zu nennen. Aus den gleichen Gründen besteht die Möglichkeit, dass der Datensatz unvollständig ist. Ein weiterer Grund für die Unvollständigkeit besteht darin, dass die Daten zum Teil zeitdiskret und zum Teil kontinuierlich erfasst werden. Wenn nicht alle Eingangsdaten zur selben Zeit vorliegen, ist der Datensatz, der aus allen Eingangsdaten gebildet wird, unvollständig. Die Betrachtung der Qualität und Aussagekraft der Eingangsdaten lässt deutliche Unterschiede erkennen. Statistische Aussagen aus Schadens- und Störungsstatistiken müssen zusammen mit subjektiven und qualitativen Aussagen, wie sie z. B. aufgrund visueller Inspektionen anfallen, und quantitativen Größen, die durch die Anwendung von Diagnoseverfahren oder in Monitoringsystemen entstehen, zu einer konsistenten Diagnose kombiniert werden.

Aus dieser Betrachtung der miteinander zu verknüpfenden Daten ergeben sich die Anforderungen an das System zur intelligenten Zustandsbestimmung: Es muss mit einer großen Menge von Daten umgehen können, die zeitlich sowohl kontinuierlich als auch diskret zur Verfügung stehen. Die Verarbeitung von widersprüchlichen sowie unvollständigen Datensätzen muss möglich sein und die gegenseitigen Abhängigkeiten sowohl der Primärinformationen untereinander als auch der Primärinformationen und der Diagnosen müssen adäquat abgebildet werden. Als Ansatz wird im Folgenden die Evidenztheorie nach Dempster und Shafer dargestellt.

Die von Shafer /47/ auf einer grundlegenden Arbeit von Dempster /13/ entwickelte Evidenztheorie ist zur Darstellung von Unwissenheit und Plausibilität geeignet. Die Evidenztheorie wird auch als Dempster-Shafer-Theorie bezeichnet. Sie stellt ein probates Modell für plausibles Schließen dar. Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie und Evidenztheorie sind nicht völlig unabhängig voneinander. Es kann gezeigt werden, dass die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie als ein Spezialfall in der Evidenztheorie enthalten ist. Die Evidenztheorie stellt damit eine Verallgemeinerung der Wahrscheinlichkeitstheorie dar. Eine anschauliche Interpretation der Evidenztheorie mittels relativer Häufigkeiten ist analog zur Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie möglich. Während in der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie punktwertige Zufallsvariablen verwendet werden, sind die Zufallsvariablen der Evidenztheorie mengenwertig. In der Mathematik werden mengenwertige Zufallsvariablen auch kurz „zufällige Mengen" genannt.

Die mathematische Darstellung der Evidenztheorie findet sich in den bereits genannten Werken von Dempster /13/ und Shafer /47/. Eine anschauliche Einführung in die Anwendung der Evidenztheorie wird in /49/ gegeben. Im Folgenden werden die für das Verständnis der folgenden Kapitel notwendigen Grundlagen anhand der drei genannten Werke zusammengefasst.

3.2 Grundlagen und Begriffe

Eine grundlegende Schwierigkeit der Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie ist, dass sie nicht zwischen dem Fehlen von Informationen und Informationen, die eine Aussage widerlegen, unterscheiden kann. Anders ausgedrückt, die Theorie erlaubt nicht, einer Aussage Unterstützung zu verweigern, ohne ihrer Gegenaussage genau diese Unterstützung zukommen zu lassen. Zur Verdeutlichung sein die Grundmenge Ω betrachtet, die nur aus den beiden Ereignissen A und $\overline{A}$ besteht:

$$\Omega = \{A, \overline{A}\} \tag{3.1}$$

Dem Ereignis A sei eine Wahrscheinlichkeit $\mathrm{p}(A)$ zugeordnet. Die Wahrscheinlichkeit des Gegenereignisses $\overline{A}$ lässt sich unmittelbar aus den Axiomen von Kolmogoroff berechnen:

$$\mathrm{p}(A) + \mathrm{p}(\overline{A}) = 1 \tag{3.2}$$

Das impliziert, dass $\mathrm{p}(\overline{A})$ nicht einen kleinen Wert annehmen kann, ohne dass $\mathrm{p}(A)$ einen großen Wert annimmt. Fehlende Unterstützung für A bedingt Unterstützung für $\overline{A}$.

Darüber hinaus kann die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie nicht einfach mit Unwissenheit umgehen. Dazu sei noch mal die in Gleichung (3.1) eingeführte Grundmenge Ω betrachtet. Die Darstellung der Unwissenheit erfolgt üblicherweise so, dass jedem der beiden Ereignisse die Wahrscheinlichkeit von ½ zugeordnet wird.

$$\mathrm{p}(A) = \mathrm{p}(\overline{A}) = \frac{1}{2} \tag{3.3}$$

Durch diesen Ansatz wird eine Gleichverteilung der Ereignisse unterstellt. Sowohl die Annahme einer Gleichverteilung als auch die daraus folgende Tatsache, dass die Zufallsvariable in der Hälfte der Fälle einen der Zustände annimmt, haben mit Unwissenheit über die Zufallsvariable nicht viel zu tun. Noch problematischer wird es, falls die Grundmenge mehr als zwei Elemente enthält. Zur Repräsentation der Unwissenheit wird auch in diesem Fall üblicherweise eine Gleichverteilung der Elementaraussagen unterstellt. Daraus folgt dann unmittelbar, dass zusammengesetzte Aussagen nicht gleichverteilt sind. Eine zusammengesetzte Aussage wird um einen konstanten Betrag wahrscheinlicher, wenn ihr eine weitere Elementaraussage hinzugefügt wird.

Ein Ansatz zur Vermeidung dieser Probleme stellt Dempster-Shafer's Evidenztheorie dar. Zum Verständnis ist die Erläuterung der grundlegenden Begriffe der Evidenztheorie erforderlich. Während die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie punktwertige Zufallsvariablen verwendet, sind die Zufallsvariablen der Evidenztheorie mengenwertig. Mengenwertige Zufallsvariablen werden in der Mathematik kurz als „zufällige Mengen" bezeichnet. Die Menge aller Objekte, die eine zufällige Menge als Wert annehmen kann, wird als Betrachtungsrahmen (frame of discernment) bezeichnet. Der Betrachtungsrahmen entspricht der Grundmenge in der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie. Über einen tiefer liegenden Wahrscheinlichkeitsmechanismus, z. B. Würfeln mit einem idealen Würfel, nimmt die zufällige Menge einen Wert aus dem Betrachtungsrahmen an, ohne dass dadurch Wahrscheinlichkeiten auf dem Betrachtungsrahmen selbst definiert werden. Durch diese Abbildung nimmt die zufällige Menge mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ein Objekt des Betrachtungsrahmens als Wert an. Diejenigen Objekte des Betrachtungsrahmens, die mit einer positiven Wahrscheinlichkeit von der zufälligen Menge als Wert angenommen werden, werden als fokale Elemente bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein fokales Element als Wert der zufälligen Menge auftritt, wird als Massezahl bezeichnet. Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang folgendermaßen formulieren. Bei einem gegebenen Betrachtungsrahmen Θ beschreibt das Symbol 2^{Θ} die Menge aller Teilmengen von Θ. Eine Funktion

$$\mathrm{m}: \quad 2^{\Theta} \rightarrow [0,1] \tag{3.4}$$

wird als grundlegende Wahrscheinlichkeitszuweisung bezeichnet, wenn die folgenden beiden Bedingungen

$$\mathrm{m}(\varnothing) = 0 \tag{3.5}$$

und

$$\sum_{A \subseteq \theta} \mathrm{m}(A) = 1 \tag{3.6}$$

erfüllt sind.

Die Größe $\mathrm{m}(A)$ heißt Massezahl von A und ist das Maß für die Unterstützung, die exakt der Menge A entgegengebracht wird. Nach Gleichung (3.5) kann die leere Menge $\varnothing$ nicht unterstützt werden. Die gesamte Unterstützung hat entsprechend Gleichung (3.6) das Maß Eins. Ein kompletter Satz von Massezahlen für einen gegebenen Betrachtungsrahmen, der Gleichung (3.6) erfüllt, heißt Evidenzkörper (body of evidence). Für einen Evidenzkörper werden auch die Begriffe Evidenzquelle oder Hinweis gebraucht. Die Evidenztheorie liefert keine Vorschriften, wie die Massezahlen zu bestimmen sind. Sie erlaubt jedoch, völlig unterschiedliche Evidenzkörper miteinander zu kombinieren. Die Vorschrift, wie verschiedene Evidenzquellen, die als zufällige Mengen modelliert werden können, zu kombinieren sind, ist die Dempster'sche Regel.

Der Glaubensgrad (degree of belief) einer vorgegebenen Menge A drückt die relative Häufigkeit aus, mit der die zufällige Menge einen Wert annimmt, der ganz in A enthalten ist. Die in der Literatur übliche Abkürzung Bel für den Glaubensgrad wird auch hier verwendet. Um den Glaubensgrad der Menge A zu erhalten, müssen die Massezahl $\mathrm{m}(A)$ und die Massezahlen $\mathrm{m}(B)$ aller echten Teilmengen B von A addiert werden:

$$\mathrm{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} \mathrm{m}(B) \tag{3.7}$$

Dabei müssen nur fokale Elemente berücksichtigt werden, weil die Massezahl für alle anderen Objekte des Betrachtungsrahmens gleich null ist. Im Glaubensgrad werden also die Massezahlen derjenigen Mengen berücksichtigt, die ganz in A liegen.

Der Plausibilitätsgrad (degree of plausibility) einer vorgegebenen Menge A drückt die relative Häufigkeit aus, mit der in der zufälligen Menge ein Objekt enthalten ist, das auch zur Menge A gehört. Die übliche Abkürzung für den Plausibilitätsgrad ist Pl. Zur Ermittlung des

Plausibilitätsgrades für die Menge A sind die Massezahlen aller Mengen B aufzusummieren, deren Durchschnitt mit der Menge A nicht leer ist:

$$\mathrm{Pl}(A) = \sum_{B \cap A \neq \varnothing} \mathrm{m}(B) \tag{3.8}$$

Alle Hinweise, die in den Glaubensgrad eingehen, gehen auch in den Plausibilitätsgrad ein, da A selbst und alle echten Teilmengen von A einen nichtleeren Durchschnitt mit A aufweisen. Darüber hinaus werden im Plausibilitätsgrad noch die Massezahlen der Mengen erfasst, die nicht ganz in A liegen, sondern sich nur zum Teil mit A überschneiden. Daraus folgt unmittelbar:

$$\mathrm{Bel}(A) \leq \mathrm{Pl}(A) \tag{3.9}$$

Der Plausibilitätsgrad drückt aus, in welchem Maß A nicht angezweifelt werden kann, oder, in welchem Maß A glaubwürdig oder plausibel ist. Während der Glaubensgrad ein Maß für die Unterstützung der Menge A durch grundlegende Wahrscheinlichkeitszuweisungen ist, enthält der Plausibilitätsgrad alle Massezahlen, welche die Menge A nicht widerlegen. Glaubens- und Plausibilitätsgrad sind nicht unabhängig voneinander. Der Zusammenhang ist durch die Kerngleichung der Dempster-Shafer-Theorie gegeben:

$$\mathrm{Pl}(A) = 1 - \mathrm{Bel}(\overline{A}) \tag{3.10}$$

Der Plausibilitätsgrad eines Elementes des Betrachtungsrahmens ist das Komplement zur Zahl Eins des Glaubensgrades des mengentheoretischen Komplements desselben Elementes. Damit ergibt sich quantitativ ein Unsicherheitsintervall aus dem Unterschied zwischen den Hinweisen, die ein Ereignis unmittelbar unterstützen, und den Hinweisen, die dasselbe Ereignis nicht ausschließen. Das Intervall

$$[\mathrm{Bel}(A), \mathrm{Pl}(A)] \tag{3.11}$$

wird in der Literatur als Plausibilitätsintervall, Verdachtsintervall oder Unterstützungsintervall (support interval) bezeichnet. Bild 3.1 zeigt die graphische Darstellung des Plausibilitätsintervalls.

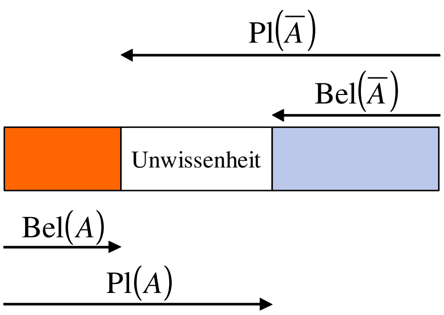

Bild 3.1: Darstellung des Plausibilitätsintervalls

Obwohl Glaubensgrad und Plausibilitätsgrad offensichtlich auf relativen Häufigkeiten beruhen, können sie nicht als Wahrscheinlichkeiten interpretiert werden.

Angenommen, das Ereignis A bezieht sich auf die Aussage „Die Diagnose trifft zu“ und das Gegenereignis $\overline{A}$ auf „Die Diagnose trifft nicht zu“. Das Balkendiagramm auf der linken Seite von Bild 3.2 zeigt entsprechend der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie die Wahrscheinlichkeit $\mathrm{p}(A)$ für das Ereignis A in rot und die Wahrscheinlichkeit $\mathrm{p}(\overline{A})$ des Ereignisses $\overline{A}$ in hellblau. Die Länge des gesamten Balkendiagramms ist immer gleich eins. Auf der rechten Seite in Bild 3.2 ist eine graphische Darstellung von Glaubensgrad Bel und Plausibilitätsgrad Pl der Evidenztheorie von Dempster und Shafer gezeigt. $\mathrm{Bel}(A)$ ist rot, $\mathrm{Pl}(A)$ in hellblau eingefärbt. Der weiße Balken stellt ein Maß für die Unwissenheit dar. Analog zur der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie ist die Länge des gesamten Balkendiagramms immer gleich eins. Die gleiche Darstellung von Glaubensgrad Bel, Plausibilitätsgrad Pl und Unwissenheit wird der gesamten Arbeit verwendet.

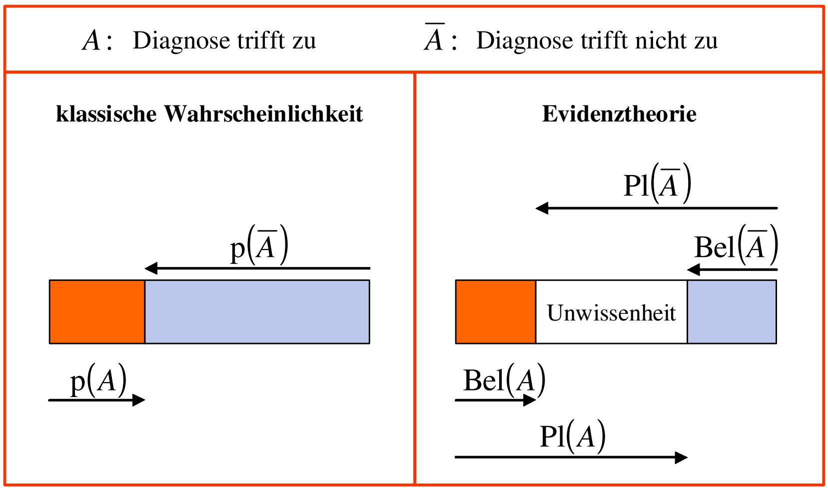

Bild 3.2: Grundidee der Evidenztheorie

3.3 Dempster'sche Regel

Die Dempster'sche Regel erlaubt die Kombination von unterschiedlichen Evidenzkörpern. Dabei wird ähnlich wie in der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie die Unabhängigkeit der zugrunde liegenden Evidenzquellen vorausgesetzt. Die Dempster'sche Regel lautet:

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{\sum\limits_{B_1 \cap B_2 = A} m_1(B_1) \cdot m_2(B_2)}{1 - \sum\limits_{B_1 \cap B_2 = \varnothing} m_1(B_1) \cdot m_2(B_2)} \tag{3.12}$$

Die Massezahl der Menge A, die sich durch die Kombination der beiden zugrunde liegenden Evidenzkörper ergibt, wird durch $m_1 \oplus m_2(A)$ bezeichnet und steht auf der linken Seite von Gleichung (3.12). Die Massezahlen der beiden zu kombinierenden Evidenzkörper werden mit $m_1(B_1)$ bzw. $m_2(B_2)$ bezeichnet. Im Zähler werden diejenigen Produkte der Massezahlen aufsummiert, wenn der Durchschnitt der zugehörigen Objekte der Betrachtungsrahmen B_1 und B_2 gerade die Menge A ergibt. Im Nenner gehen die Produkte der Massezahlen dann ein, wenn der Durchschnitt der zugehörigen Objekte der Betrachtungsrahmen B_1 und B_2 leer ist. Um den Evidenzkörper für die Kombination zu erhalten, muss diese Operation für alle Teilmengen des gemeinsamen Betrachtungsrahmens durchgeführt werden. Die Anwendung der Dempster'schen Regel wird im Folgenden mit einem anschaulichen graphischen Verfahren für ein einfaches Beispiel gezeigt. Dafür werden zwei Betrachtungsrahmen X und Y mit jeweils zwei Elementen definiert:

$$X = \{x, \bar{x}\} \tag{3.13}$$

$$Y = \{y, \bar{y}\} \tag{3.14}$$

Als Beispiel für eine technische Anwendung dieser einfachen Definition wird eine SF_6-Schaltanlage betrachtet. Bei Schaltanlagen dieses Konstruktionstyps wird die Dichtigkeit des mit Schwefelhexafluorid (SF_6) gefüllten Gasraums mit Hilfe von Druckaufnehmern überwacht. Sinkt der Druck der Gasfüllung, so besteht die Möglichkeit, dass eine Leckage vorliegt. Die Überwachung der Dichtigkeit ist üblicherweise redundant ausgeführt, indem mehrere Druckaufnehmer an der Anlage angebracht sind. Aufgrund von Toleranzen oder eines Defekts der Druckaufnehmer können die von ihnen gelieferten Aussagen in Bezug auf die Dichtigkeit voneinander abweichen oder widersprüchlich sein. Eine geeignete Verarbeitung dieser Informationen kann durchgeführt werden, indem der erste Druckaufnehmer als Betrachtungsrahmen X gemäß Gleichung (3.13) und der zweite Druckaufnehmer als Betrachtungsrahmen Y gemäß Gleichung (3.14) betrachtet wird. Das Element x des Betrachtungsrahmens X beschreibe dabei, dass der Gasraum dicht ist, das Element $\bar{x}$, dass der Gasraum undicht ist. Die Elemente des Betrachtungsrahmens Y werden entsprechend definiert.

Das kartesische Produkt dieser beiden Mengen bildet einen zweidimensionalen Betrachtungsrahmen, der aus vier Elementen besteht:

$$X \times Y = \{(x, y), (x, \bar{y}), (\bar{x}, y), (\bar{x}, \bar{y})\} \tag{3.15}$$

Der Betrachtungsrahmen lässt sich folgendermaßen graphisch darstellen, s. Bild 3.3. In senkrechter Richtung sind die Elemente des Betrachtungsrahmens X aufgetragen, in horizontaler Richtung die Elemente von Y. Jedes Feld innerhalb dieser zweidimensionalen Anordnung repräsentiert somit ein Element von $X \times Y$.

	y	$\overline{y}$
x	(x, y)	$(x, \overline{y})$
$\overline{x}$	$(\overline{x}, y)$	$(\overline{x}, \overline{y})$

Bild 3.3: Zweidimensionaler Betrachtungsrahmen

Die Massezahlen des zweidimensionalen Betrachtungsrahmens werden für die Elemente der Menge $2^{X \times Y}$ angegeben. Die Darstellung der Massezahl $m(A)$ erfolgt durch ein vereinfachtes Piktogramm, bei dem die Elemente von A farbig gekennzeichnet sind. Die Darstellung von $m(\{(x, y)\}) = 0{,}5$ ist in Bild 3.4 gezeigt.

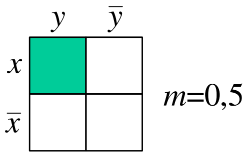

Bild 3.4: Darstellung der Massezahlen

Der erste Evidenzkörper wird mit folgenden Massezahlen angenommen:

$$\begin{aligned} m_1(\{(x, \overline{y})\}) &= 0{,}4 \\ m_1(X \times Y) &= 0{,}6 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Für den zweiten Evidenzkörper gilt:

$$\begin{aligned} m_2(\{(\overline{x}, y)\}) &= 0{,}2 \\ m_2(X \times Y) &= 0{,}8 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Mit Hilfe der in Bild 3.4 eingeführten Darstellungsweise ergibt sich folgendes Bild 3.5:

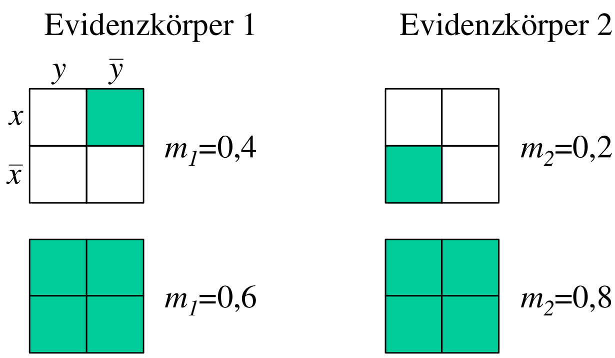

Bild 3.5: Darstellung der Evidenzkörper

In dem technischen Beispiel der SF_6-Schaltanlage entspricht jeder Evidenzkörper einem Messpunkt. Die beiden Evidenzkörper können z. B. zwei Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten darstellen. Der Evidenzkörper 1 gibt einen Hinweis, dass im Grad m_1=0,4 der Dichtewächter X den Gasraum für dicht und gleichzeitig der Dichtewächter Y den Gasraum für undicht hält. Entsprechend gibt der Evidenzkörper 2 einen Hinweis, dass im Grad m_2=0,2 der Dichtewächter X den Gasraum für undicht und gleichzeitig der Dichtewächter Y den Gasraum für dicht hält.

Zur Anwendung der Dempster'schen Regel werden jetzt die Schnittmengen aller fokalen Elemente des ersten Evidenzkörpers mit allen fokalen Elementen des zweiten Evidenzkörpers sowie die Produkte der zugehörigen Massezahlen gebildet, s. Bild 3.6.

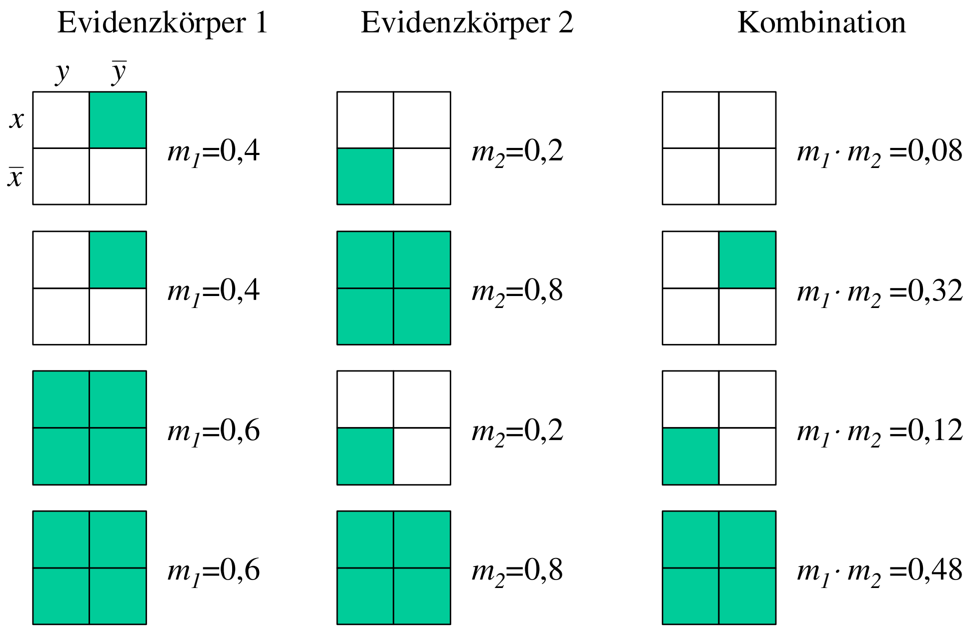

Bild 3.6: Bildung der Schnittmengen

Sofern sich bei der Bildung der Schnittmengen identische Mengen ergeben, was in der graphischen Darstellung leicht zu erkennen ist, sind die zugehörigen Produkte der Massezahlen zu addieren. Für jede nichtleere Schnittmenge, die auf diese Weise entstanden ist, ist die Dempster'sche Regel auszuwerten. Dabei gehen die Produkte der Massezahlen, die zu leeren Schnittmengen gehören, in den Nenner ein. Das Ergebnis des Beispiels stellt sich folgendermaßen dar (Bild 3.7):

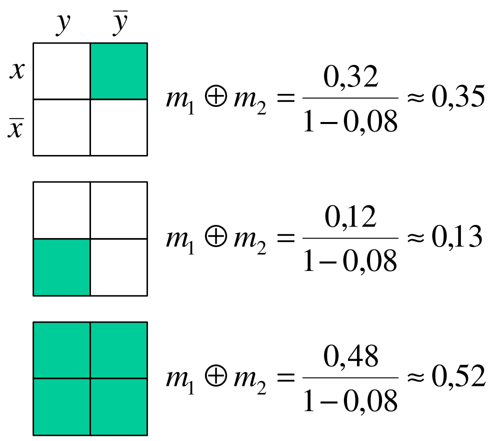

Bild 3.7: Ergebnis der Kombination

Eine Kontrolle des Ergebnisses ist möglich, da die Summe der Massezahlen nach der Kombination wieder eins ergeben muss. Durch die Anwendung der Dempster'schen Regel entstehen die fokalen Elemente für die Kombination der Evidenzkörper als Schnittmengen der fokalen Elemente der zugrunde liegenden Hinweise. Die Massezahl ergibt sich aus dem Produkt der zugehörigen Massezahlen der zu kombinierenden Hinweise. Die Schnittmenge einzelner fokaler Elemente kann leer sein. Da nach Gleichung (3.5) die Massezahl der leeren Menge gleich null sein muss, wird durch den Ausdruck im Nenner den Dempster'schen Regel diese Masse gleichmäßig auf die nichtleeren Schnittmengen umgelagert. Daher wird der Ausdruck im Nenner auch als Normierungszahl k bezeichnet:

$$k = 1 - \sum_{B_1 \cap B_2 = \emptyset} m_1(B_1) \cdot m_2(B_2) \tag{3.18}$$

Die Normierungszahl k erlaubt eine Aussage darüber, ob sich die beiden Hinweise, die kombiniert werden sollen, einander widersprechen. Wenn sich die Hinweise widersprechen, liegt ein Konflikt zwischen den Evidenzquellen vor. Das ist immer der Fall, wenn leere Schnittmengen der fokalen Elemente der beiden zu kombinierenden Hinweise existieren. Der Normierungsfaktor k nimmt dann einen Wert ungleich eins an. Der Konflikt ist eine Eigenschaft der Evidenztheorie, die das Verhältnis von zwei Evidenzquellen beschreibt. Die stochastische Unabhängigkeit der zugrunde liegenden Zufallsexperimente ist immer noch gegeben. Konflikt ist etwas anderes als Abhängigkeit. Um eine sinnvolle Häufigkeitsinterpretation der kombinierten Massezahlen zu erlauben, muss vorausgesetzt werden, dass leere Schnittmengen fokaler Elemente niemals auftretenden Zuständen entsprechen. In /46/ wird die Dempster'sche Regel so eingeführt, dass sie gerade die Wahrscheinlichkeit des Durchschnitts zufälliger Mengen erfasst, gegeben die Bedingung, dass der Durchschnitt nicht leer ist. Dies ist in dieser Arbeit dadurch gewährleistet, dass die fokalen Elemente Aussagen betreffen.

3.4 Propagation von Evidenz in Markovbäumen

In diesem Kapitel werden mehrere stochastisch unabhängige Variablen betrachtet, die einen qualitativen Zusammenhang aufweisen. Über diese Variablen liegen mehrere Hinweise vor, die sich sowohl auf die einzelnen Variablen als auch auf den gemeinsamen, zweidimensionalen Betrachtungsrahmen beziehen. Das Ziel ist die Ableitung der Konsequenzen, die Hinweise einer Variablen auf andere Variablen aufgrund ihres qualitativen Zusammenhangs haben. Dieser Vorgang wird als Propagation von Evidenz bezeichnet /45/. Zur Berechnung der Glaubensfunktionen existiert ein Ansatz, der die graphische Struktur von qualitativen Markovbäumen ausnutzt. Dieser Ansatz erlaubt es, zum einen die Erfüllung der Unabhängigkeitsannahmen zu gewährleisten und bietet zum anderen eine einfache Kontrolle, dass die Evidenz nicht mehrfach benutzt wird.

Die beiden notwendigen Operationen „Projektion“ und Ausdehnung werden an einem einfachen Beispiel erläutert. Ein einfaches Zusammenhangsmodell für Glaubensfunktionen der in den Gleichungen (3.13) und (3.14) eingeführten Betrachtungsrahmen wird folgendermaßen konstruiert. Für jede der beiden Variablen X und Y wird ein Knoten des Markovbaums erstellt. Zwischen den beiden Knoten wird ein Knoten (X,Y) für den gemeinsamen Betrachtungsrahmen der beiden Variablen eingefügt und mit den beiden Knoten X und Y über ungerichtete Kanten verbunden, s. Bild 3.8. In dieser einfachen Anordnung ist der Markovbaum zu einer Markovkette entartet.

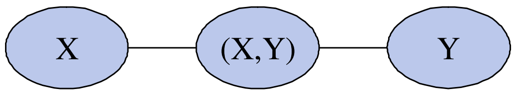

Bild 3.8: Markovbaum für zwei Variablen

An jedem Knoten sind die zugehörigen Massezahlen des Betrachtungsrahmens hinterlegt. Für den Knoten, der nur die Variable X enthält, sind höchstens folgende drei fokale Elemente vorhanden.

$$
\begin{aligned}
&m(\{x\})\\
&m(\{\overline{x}\})\\
&m(\{x,\overline{x}\}) = m(X)
\end{aligned}
\tag{3.19}
$$

Für den Knoten Y gilt diese Aussage entsprechend. Der Knoten (X,Y) des gemeinsamen Betrachtungsrahmens enthält höchstens 15 fokale Elemente. Zur Darstellung wird im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit analog zu Kapitel 3.3 vorgegangen.

Vor der Verarbeitung von Hinweisen müssen die Massezahlen an den einzelnen Knoten initialisiert werden. Es bietet sich häufig an, alle Knoten mit der vollständigen Unwissenheit zu belegen. Dazu wird dem Betrachtungsrahmen jedes Knotens die Massezahl eins zugewiesen, weitere fokale Elemente existieren nicht. In dem Beispiel nach Bild 3.8 werden die Knoten also folgendermaßen initialisiert:

$$\begin{aligned} m(X) &= 1 \\ m(Y) &= 1 \\ m(X \times Y) &= 1 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Die Verarbeitung der Hinweise ist davon abhängig, ob sie sich ausschließlich auf die einzelnen Variablen X oder Y beziehen, oder ob sie eine zusammengesetzte Aussage über beide Variablen enthalten.

Die Verarbeitung der zusammengesetzten Hinweise beginnt am Knoten (X,Y) für den gemeinsamen Betrachtungsrahmen. Die Kombination des Hinweises mit den am Knoten (X,Y) bereits vorhandenen Massezahlen erfolgt nach der Dempster'schen Regel, die in Kapitel 3.3 ausführlich dargestellt ist. Die Auswirkungen dieser Aktualisierung der Massezahlen am Knoten (X,Y) werden entlang der Kanten des Markovbaums an die übrigen Knoten weitergegeben. Die durchzuführende Operation wird als Projektion bezeichnet /49/. Bei der Projektion auf den Knoten X werden für jeden Zustand der Variablen X diejenigen Massezahlen aufsummiert, die ausschließlich diesen Zustand betreffen. Welchen Wert die Variable Y dabei annimmt, ist nicht relevant. Die Projektion entspricht also der Berechnung der Glaubensgrade $\mathrm{Bel}(x \times Y)$ und $\mathrm{Bel}(\bar{x} \times Y)$. Die so berechneten Glaubensgrade werden am Knoten X als Massezahlen für die entsprechenden Zustände verwendet, Gleichung (3.21).

$$\begin{aligned} m(x) &= \mathrm{Bel}(x \times Y) \\ m(\bar{x}) &= \mathrm{Bel}(\bar{x} \times Y) \end{aligned} \tag{3.21}$$

Die Massezahl des Betrachtungsrahmens ergibt sich aus der Forderung von Gleichung (3.6), dass die Summe der Massezahlen eines Evidenzkörpers immer eins ergeben muss. Für die Variable Y wird genauso verfahren. Damit ist die Propagation der Evidenz abgeschlossen, alle Knoten sind einmal aufgrund des vorliegenden Hinweises aktualisiert worden. Die neuen

Massezahlen an den Knoten X und Y dürfen nicht als neue Hinweise erneut durch den Markovbaum propagiert werden, weil dies eine unzulässige Mehrfachverwendung desselben Hinweises darstellt. Bild 3.9 zeigt ein Zahlenbeispiel für Propagation eines Hinweises durch Projektion. Alle Knoten sind mit vollständiger Unwissenheit initialisiert.

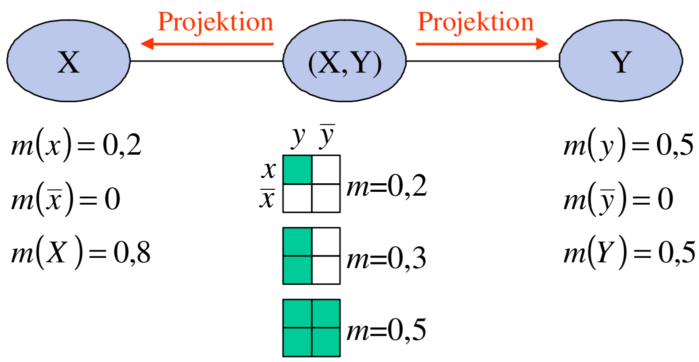

Bild 3.9: Propagation durch Projektion

Der dargestellte Hinweis mit drei fokalen Elementen am Knoten (X,Y) gibt gleichzeitig das Ergebnis der Kombination nach der Dempster'schen Regel an, da der Knoten (X,Y) mit Unwissenheit initialisiert ist. Die Massezahlen an den Knoten X und Y geben das Ergebnis der Projektion an, das direkt nachvollziehbar ist.

Zur Verarbeitung von Hinweisen, die sich nur auf eine der beiden Variablen X oder Y beziehen, wird folgendermaßen vorgegangen. Die Bearbeitung beginnt an dem Knoten, für den der Hinweis vorliegt. Liegt ein Hinweis für den Knoten X vor, beginnt die Propagation der Evidenz am Knoten X. Der Hinweis wird wieder entlang der Kanten des Markovbaums an die übrigen Knoten weitergegeben, bis alle Knoten aktualisiert sind. Die Operation, die einen Hinweis von dem Knoten einer einzelnen Variablen an den Knoten des gemeinsamen Betrachtungsrahmens weitergibt, heißt leere Ausdehnung (vacuous extension) /46/, oder einfach Ausdehnung. Dabei wird der Betrachtungsrahmen der Variablen einfach auf den gemeinsamen Betrachtungsrahmen erweitert, ohne dass Informationen über die zweite Variable hinzugefügt werden. Ausgehend von den drei fokalen Elementen der Variablen X

$$\begin{array}{l} m(x) \\ m(\bar{x}) \\ m(X) \end{array} \tag{3.22}$$

wird der folgende Hinweis aus drei fokalen Elementen für den gemeinsamen Betrachtungsrahmen erzeugt:

$$\begin{aligned} m(x \times Y) &= m(x) \\ m(\bar{x} \times Y) &= m(\bar{x}) \\ m(X \times Y) &= m(X) \end{aligned} \tag{3.23}$$

Über den Zustand der Variablen Y werden dabei keine Annahmen getroffen. Es ist zu beachten, dass bisher noch keine Aktualisierung der Glaubensfunktion am Knoten *X* vorgenommen worden ist. Dieser Hinweis auf dem gemeinsamen Betrachtungsrahmen wird nun mit Hilfe der Dempster'schen Regel mit den schon an diesem Knoten vorliegenden Massezahlen kombiniert. Nach der Aktualisierung der Massezahlen des gemeinsamen Betrachtungsrahmens werden die Ergebnisse zu beiden Knoten *X* und *Y* propagiert, um deren Massezahlen zu aktualisieren. Der Ablauf ist in Bild 3.10 dargestellt. Besonders zu beachten ist, dass die Glaubenfunktion am Knoten *X* auch nur einmal aktualisiert wird.

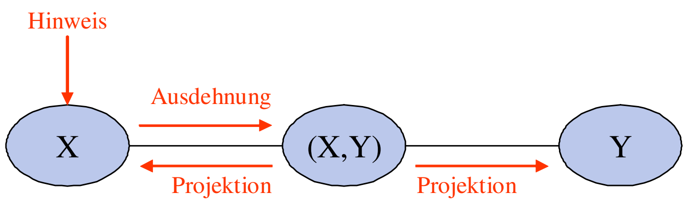

Bild 3.10: Propagation durch Ausdehnung und Projektion

Die Vorgehensweise wird anhand eines Zahlenbeispiels verdeutlicht. Ausgangspunkt ist die in Bild 3.9 dargestellte Situation. Folgender Hinweis wird beginnend am Knoten *X* verarbeitet:

$$\begin{aligned} m(x) &= 0{,}5 \\ m(X) &= 0{,}5 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Nach der Ausdehnung zum Knoten (X,Y) erfolgt die Anwendung der Dempster'schen Regel wie in Bild 3.11 dargestellt.

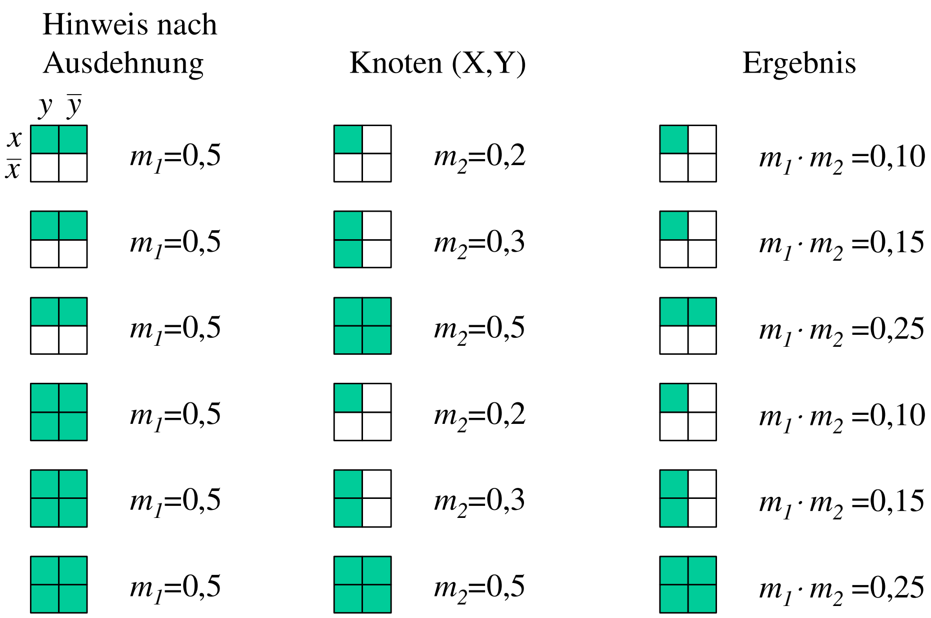

Bild 3.11: Anwendung der Dempster'schen Regel am Knoten (X,Y)

Das Ergebnis der Anwendung der Dempster'schen Regel, das sich nach der Zusammenfassung gleicher Schnittmengen in Bild 3.11 ergibt, ist zusammen mit den Ergebnissen der Projektion auf die Knoten X und Y in Bild 3.12 dargestellt.

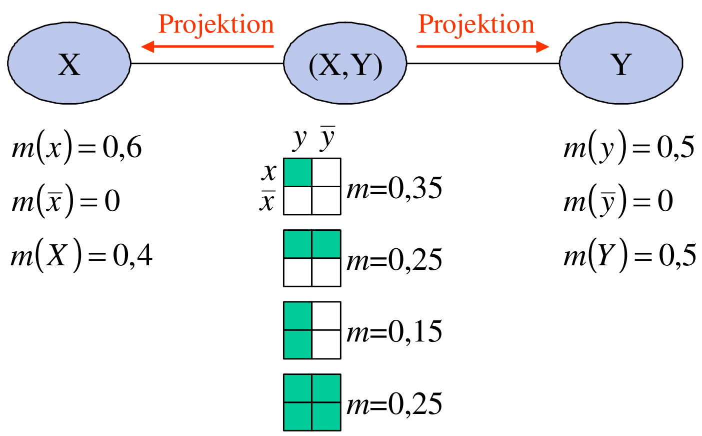

Bild 3.12: Ergebnis der Verarbeitung des Hinweises am Knoten X

Das Ergebnis am Knoten X stimmt mit dem Ergebnis überein, das sich durch die direkte Anwendung der Dempster'schen Regel am Knoten X, also die Kombination der am Knoten X vorliegenden Massezahlen entsprechend Bild 3.9 mit dem Hinweis entsprechend Gleichung (3.24), ergibt. Auf die Massezahlen am Knoten Y hat die Verarbeitung des Hinweises aus Gleichung (3.24) keine Auswirkungen. Das steht in Übereinstimmung mit der Unabhängigkeitsannahme der beiden Variablen X und Y.

Das dargestellte Verfahren zur Propagation von Evidenz in Markovbäumen mittels der Operationen Projektion und Ausdehnung sowie Anwendung der Dempster'schen Regel zur Kombination unterschiedlicher Evidenzkörper lässt sich leicht auf Probleme mit mehr als zwei Variablen übertragen. Die Vorgehensweise bleibt dabei immer die gleiche. Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich alle auf sehr einfache Beispiele, die aber im Hinblick auf die Anwendung zur Zustandsdiagnose ausreichend sind. Eine allgemeinere Darstellung der Propagation von Evidenz in Markovbäumen findet sich in /46/.

4 Anwendung

4.1 Auswahl eines Betriebsmittels

Die Zustandsbewertung soll am Beispiel eines Leistungstransformators durchgeführt werden. Die Auswahl des Leistungstransformators ist dadurch motiviert, dass er zum einen als wertvolles Betriebsmittel mit hohen Investitionskosten über umfangreiche Schutz- und Monitoringsysteme /9, 30/ verfügt. Zum anderen liefern Leistungstransformatoren einen erheblichen Beitrag an der Zahl der Störungen in Schaltanlagen /4/.

4.2 Modellbildung

Das System zur Zustandsbestimmung verknüpft die Informationen, die über ein Betriebsmittel vorliegen, zu einer konsistenten Beschreibung des Betriebsmittelzustands. Daraus wird frühzeitig der Instandhaltungsbedarf des Betriebsmittels erkannt, so dass rechtzeitig Maßnahmen ergriffen werden können. Im Sinne einer Diagnose wird die betroffene Komponente identifiziert, so dass die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen festgelegt werden können. Zum anderen kann das System zur Zustandsbestimmung aufgrund der Eingangsinformationen die Anwendung weiterer spezieller Diagnoseverfahren oder Maßnahmen vorschlagen.

Dazu müssen im Voraus folgende Informationen über das betrachtete Betriebsmittel vorliegen:

- die zur Verfügung stehenden Eingangsgrößen,
- die Diagnosen bzw. Maßnahmen,
- der Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Diagnosen bzw. Maßnahmen

Diese Informationen werden durch die Modellierung als Markovbaum strukturiert. Für Leistungstransformatoren sind diese Informationen in /15/ dargestellt. Bild 4.1 gibt eine Zusammenfassung dieser Darstellung wieder.

Primär-informationen / Diagnose / Maßnahmen	allgemein	Aktivteil Isolieröl	Ölausdehnungs-gefäß	Kühlanlage	Stufenschalter Motorantrieb	Durchführungen Wandler
Zustandsabhängige Instandhaltung						
Life-Management						
Überlastbarkeit						
Fehlerfrüh-erkennung						

Bild 4.1: Eingangsdaten nach /15/

Die Zeilenüberschriften werden durch folgende vier Kategorien von Diagnosen bzw. Maßnahmen gebildet:

- Zustandsabhängige Instandhaltung
- Life-Management
- Überlastbarkeit
- Fehlerfrüherkennung

Innerhalb dieser Kategorien werden die einzelnen Diagnosen bzw. Maßnahmen aufgelistet. Diese Arbeit beschränkt sich im Folgenden auf die Kategorie „Zustandsabhängige Instandhaltung“. Die Spaltenüberschriften werden durch die Komponenten des Leistungstransformators gebildet:

- allgemein
- Aktivteil und Isolieröl
- Ölausdehnungsgefäß
- Kühlanlage
- Stufenschalter und Motorantrieb
- Durchführungen und Wandler

Für jede Komponente werden die Primärinformationen detailliert angegeben. In dieser Arbeit soll beispielhaft die Kühlanlage betrachtet werden. Der Grund für diese Auswahl wird mit der detaillierten Darstellung des Ausschnitts der Tabelle, der sich auf die zustandsabhängige

Instandhaltung des Kühlsystems bezieht, erläutert. Der Ausschnitt ist in Bild 4.2 wiedergegeben.

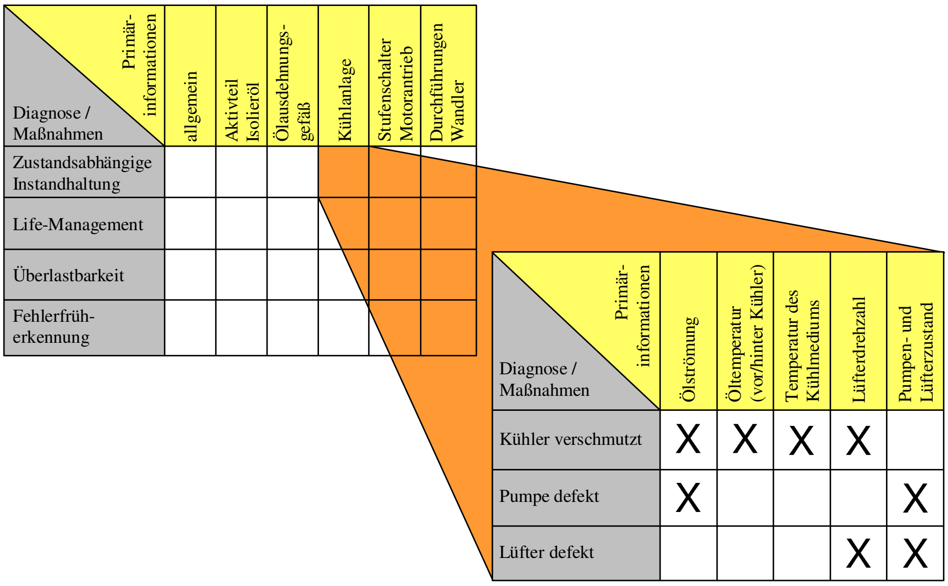

Bild 4.2: Zustandsabhängige Instandhaltung der Kühlanlage nach /15/

Die verfügbaren Primärinformationen sind

- Ölströmung,
- Öltemperatur vor und hinter dem Kühler,
- Temperatur des Kühlmittels
- Lüfterdrehzahl und
- Pumpen- und Lüfterzustand.

Die möglichen Diagnosen sind

- „Verschmutzung des Kühlers“,
- „Pumpe defekt“ und
- „Lüfter defekt“.

Ein Kreuz in einer Zelle der Tabelle zeigt an, dass ein qualitativer Zusammenhang zwischen der Primärinformation in derselben Spalte wie die betrachtete Zelle und der Diagnose oder Maßnahme in derselben Zeile besteht. Leere Zellen zeigen an, dass zwischen der zugehörigen

Primärinformation und Diagnose keine Beziehung besteht. Offensichtlich ist es möglich, dass eine einzelne Diagnose mit mehreren Primärinformationen zusammenhängt. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass eine einzelne Primärinformation in Beziehung zu mehreren Diagnosen steht. Damit ist im Allgemeinen jede einzelne Primärinformation mehrdeutig. Nur durch Berücksichtigung mehrerer Primärinformationen ist es möglich, eine eindeutige Entscheidung zu treffen.

Diese enge Verzahnung der Primärinformationen mit den möglichen Diagnosen ermöglicht die sinnvolle Modellierung der betrachteten Komponente durch einen Markovbaum und die Anwendung der Evidenztheorie zur Bestimmung der zutreffenden Diagnose und des zulässigen Instandhaltungsintervalls. Durch den Markovbaum werden gerade die Abhängigkeiten der unterschiedlichen Diagnosen aufgrund gleicher Primärinformationen modelliert. Falls die Zuordnung der Primärinformationen zur Diagnose eindeutig ist, fehlen genau die Abhängigkeiten, die durch den Markovbaum modelliert werden. Die Abhängigkeiten zwischen Primärinformationen und Diagnosen sind nur bei der Komponente Kühlanlage so stark ausgeprägt. Daher ist das Kühlsystem zur Demonstration des Verfahrens besonders geeignet und wird im Folgenden betrachtet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit wird die in Bild 4.2 dargestellte Beziehung zwischen den möglichen Diagnosen und den Primärinformationen zunächst dadurch vereinfacht, dass die Primärinformation „Pumpen- und Lüfterzustand" vernachlässigt wird. Die verbleibenden Primärinformationen und Diagnosen sind in Bild 4.3 dargestellt.

Primär-informationen / Diagnose / Maßnahmen	Ölströmung	Öltemperatur (vor/hinter Kühler)	Temperatur des Kühlmediums	Lüfterdrehzahl
Kühler verschmutzt	X	X	X	X
Pumpe defekt	X			
Lüfter defekt				X

Bild 4.3: Vereinfachte Eingangsdaten nach /15/

Aus dieser vereinfachten Darstellung wird ein Markovbaum entwickelt, der als Modell für die Zustandsbestimmung dient. Anhand der Verarbeitung von zwei Hinweisen wird die Vorgehensweise bei der Bestimmung der zutreffenden Diagnose gezeigt. In Anhang A wird das vollständige Modell für alle Primärinformationen und Diagnosen nach Bild 4.2 angegeben.

Dieses Modell bezieht sich auf die Primärinformationen und die möglichen Diagnosen und Maßnahmen, die bereits oben in Bild 4.3 dargestellt sind. Um zu berücksichtigen, dass die Diagnosen mit mehreren Primärinformationen zusammenhängen können, werden alle möglichen Diagnosen für das Betriebsmittel als Markovbaum modelliert. Bild 4.4 zeigt das Ergebnis der Modellierung, das in diesem Spezialfall nur aus einer Markovkette besteht.

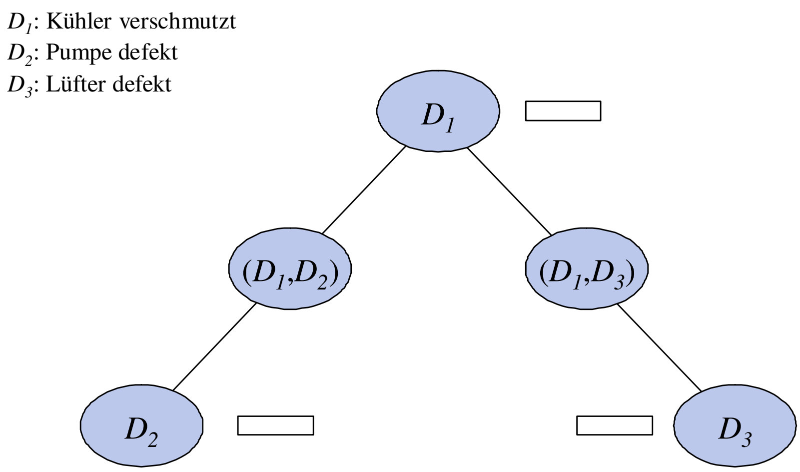

Bild 4.4: Modellierung als Markovkette

Jede mögliche Diagnose wird als Knoten in der Markovkette dargestellt. Knoten D_1 bezieht sich auf die Diagnose „Verschmutzung des Kühlers“, Knoten D_2 auf „Pumpe defekt“ und Knoten D_3 auf „Lüfter defekt“. Falls eine Eingangsgröße mit zwei Diagnosen zusammenhängt, wird ein neuer Knoten für die Kombination dieser beiden Diagnosen eingefügt und mit den beiden Knoten verbunden, die die einzelnen Diagnosen repräsentieren. In Bild 4.4 bezieht sich der Knoten (D_1, D_2) auf die Kombination der Diagnosen „Verschmutzung des Kühlers“ und „Pumpe defekt“, die entsprechend Bild 4.3 durch die Primärinformation „Ölströmung“ miteinander verbunden sind. Der Knoten (D_1, D_3) repräsentiert die Kombination von „Verschmutzung des Kühlers“ und „Lüfter defekt“, die gemäß Bild 4.3 über die Primärgröße „Lüfterdrehzahl“ verknüpft sind.

Die Knoten, die sich auf eine Diagnose beziehen, bilden analog zu Kapitel 3.4 den Betrachtungsrahmen für eine Variable. Die möglichen Werte sind für jede Diagnose *i*:

$$D_i = \{d_i, \bar{d}_i\} \quad i = 1,2,3 \tag{4.1}$$

Dabei soll d_i der Aussage „Diagnose *i* trifft zu“ und $\bar{d}_i$ der Aussage „Diagnose *i* trifft nicht zu“ entsprechen. Die Knoten, die sich auf zwei Diagnosen beziehen, bilden einen gemeinsamen Betrachtungsrahmen für die beiden Variablen. In allen Knoten sind die Kombinationen der bereits verarbeiteten Hinweise enthalten. Vor der Verarbeitung des ersten Hinweises sind die Knoten zu initialisieren. Als Ausgangszustand für alle Knoten wird die vollständige Unwissenheit verwendet, die dem gesamten Betrachtungsrahmen die Masse eins zuordnet. Das entspricht einem Glaubensgrad von null und einem Plausibilitätsgrad von eins für das Zutreffen der entsprechenden Diagnose an den Knoten, die sich nur auf eine Diagnose beziehen.

Zur Zustandsbestimmung eines Betriebsmittels werden für jede mögliche Diagnose Glaubensgrad und Plausibilitätsgrad für das Zutreffen der jeweiligen Diagnose anhand der am Knoten hinterlegten Massezahlen berechnet, d. h.:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Bel}(d_i) \\ &\mathrm{Pl}(d_i) \qquad i = 1,2,3 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Die Balkendiagramme neben den Knoten D_1, D_2 und D_3 zeigen in der mit Bild 3.1 eingeführten Darstellung Glaubensgrad und Plausibilitätsgrad für jede Diagnose.

4.3 Abbildung der Eingangsgrößen auf Massezahlen

Die Evidenztheorie bietet eine theoretische Basis für plausibles Schließen, auch wenn die zu kombinierenden Daten widersprüchlich oder unvollständig sind. Mit der Dempster’schen Regel und der Propagation von Evidenz in Markovbäumen sind Verfahren angegeben, die die als Massezahlen vorliegenden Hinweise verarbeiten können. Auf eine entscheidende Fragestellung gibt die Evidenztheorie allerdings keine Antwort: Wie werden die Massezahlen bestimmt? In diesem Kapitel werden einige grundsätzliche Überlegungen dargestellt, wie man zur Bestimmung der Massezahlen aus vorliegenden Primärinformationen vorgehen kann.

Die verschiedenen Typen von Eingangsgrößen, die zur Zustandsbestimmung verwendet werden können, haben einen unterschiedlichen Charakter. Wie bereits in Bild 2.1 dargestellt, können Warn- und Störmeldungen, Schadens- und Störungsstatistiken, Ergebnisse von Sichtkontrollen und Diagnoseverfahren sowie die Daten von Online-Monitoring-Systemen verwendet werden. Der qualitative Zusammenhang ist für eine Auswahl dieser Größen mit den betrachteten Diagnosen und Maßnahmen in Bild 4.2 dargestellt. Für alle dort nicht genannten Eingangsgrößen ist in einem ersten Schritt dieser qualitative Zusammenhang zu bestimmen. Die Aufgabe, die sich dann bei der Bestimmung der Massezahlen stellt, ist es, den Zusammenhang zwischen dem Wert der Eingangsgröße, z. B. der Temperatur des Kühlmediums, und den dazugehörigen Diagnosen zu quantifizieren. Aus dem Wert der Eingangsgröße ist zu ermitteln, in welchem Grad eine Diagnose unterstützt oder abgelehnt wird, und in welchem Grad keine Aussage möglich ist. Die Eigenschaft der Evidenztheorie, die Unterstützung und Ablehnung einer Diagnose unabhängig voneinander festlegen zu können, ist in Kapitel 3.2 bereits dargestellt worden.

Die Evidenztheorie fordert, dass Glaubens- und Plausibilitätsgrad von d_i jederzeit folgende Bedingungen erfüllen:

$$0 \leq \mathrm{Bel}(d_i) \leq \mathrm{Pl}(d_i) \leq 1 \tag{4.3}$$

Bild 4.5 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Auf der Abszisse wird die Eingangsgröße aufgetragen. In diesem Fall wird ein kontinuierlicher Wertebereich der Eingangsgröße angenommen. Es ist allerdings problemlos möglich, die Darstellung auf diskrete Wertebereiche zu übertragen. Über dem Wertebereich der Eingangsgröße auf der Abszisse ist der Verlauf des Glaubensgrades $\mathrm{Bel}(d_i)$ und des Plausibilitätsgrades $\mathrm{Pl}(d_i)$ aufgetragen. Die Einhaltung der Gleichung (4.3) ist anschaulich genau dann gewährleistet, wenn Glaubens- und Plausibilitätsgrad auf oder oberhalb der Abszisse und auf oder unterhalb der Geraden $y = 1$ und der Plausibilitätsgrad auf oder oberhalb des Glaubensgrades verläuft. Glaubens- und Plausibilitätsgrad dürfen durchaus zusammenfallen, aber der Plausibilitätsgrad darf nicht unterhalb des Glaubensgrades verlaufen. Darüber hinaus werden keine Anforderungen an den

Verlauf dieser beiden Größen gestellt, beispielsweise Forderungen nach Stetigkeit oder Differenzierbarkeit o. ä.

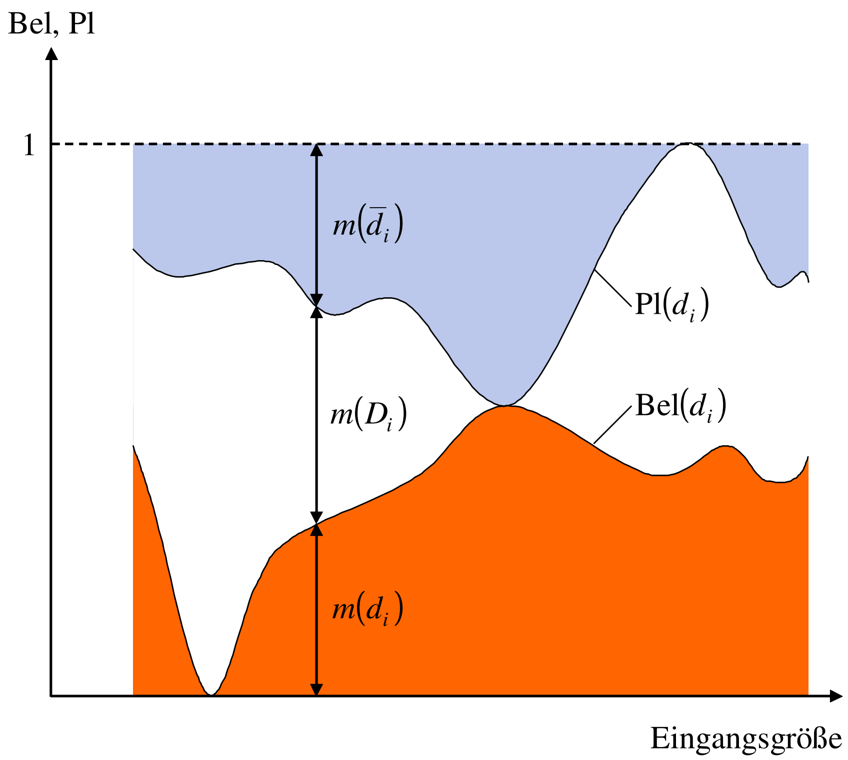

Bild 4.5: Bestimmung der Massezahlen

Mit dem Verlauf von Glaubens- und Plausibilitätsgrad sind die gesuchten Massezahlen bereits eindeutig bestimmt. Für einen gegebenen Wert der Eingangsgröße lassen sich die Massezahlen an der entsprechenden Stelle im Diagramm als Strecken entnehmen. Der Massezahl $m(d_i)$, die das Maß für die Unterstützung der Diagnose d_i darstellt, entspricht die Strecke von der Abszisse bis zur Kurve des Glaubensgrades. Der Bereich der Massezahl $m(d_i)$ ist in Bild 4.5 rot dargestellt. Die Massezahl $m(\bar{d}_i)$ stellt das Maß für die Ablehnung der Diagnose d_i dar und ergibt sich aus dem Diagramm als Strecke zwischen dem Plausibilitätsgrad und der Geraden $y=1$. Der zugehörige Bereich ist im Bild 4.5 blau dargestellt. Die das Maß für die Unwissenheit darstellende Massezahl $m(D_i)$ kann als Strecke zwischen Glaubens- und Plausibilitätsgrad abgegriffen werden. Ihr entspricht der weiße Bereich in Bild 4.5. Im Rahmen der genannten Bedingungen lassen sich beliebige Kennlinien konstruieren, die die

Eingangsgröße auf die Massezahlen abbilden. Im Folgenden werden zwei praxistaugliche Beispiele für Bestimmung der Massezahlen angegeben.

Zunächst wird eine Eingangsgröße modelliert, die bei der Überschreitung eines Grenzwertes die Diagnose d_i unterstützen soll. Dadurch ist der Verlauf des Glaubensgrades und damit der Massezahl $m(d_i)$ zumindest qualitativ als Sprungfunktion festgelegt. Bei der Festlegung des Verlaufs des Plausibilitätsgrades muss zunächst die Interpretation der Eingangsgröße für den Fall festgelegt werden, dass ihr Wert kleiner ist als der Grenzwert. Dabei sind zwei Interpretationen möglich. Zum einen kann die Unterschreitung des Grenzwertes als Unwissenheit aufgefasst werden. Dann liefert diese Größe keinerlei Information, solange sie sich unterhalb des Grenzwertes befindet. Zum anderen kann die Unterschreitung des Grenzwertes als Hinweis auf einen ordnungsgemäßen Betrieb interpretiert werden, der dann die Ablehnung der Diagnose d_i mit einer entsprechenden Massezahl $m(\bar{d}_i)$ unterstützt. Weiterhin sollen die beiden seltenen Fälle modelliert werden, bei denen die Eingangsgröße z. B. aufgrund von Ausfällen der Sensoren oder Störungen in der Datenverarbeitung nicht zum tatsächlichen Zustand der Betriebsmittelkomponente passt. Im ersten Fall liegt die Eingangsgröße unterhalb des Grenzwertes, obwohl die Diagnose d_i zutreffend ist. Dieser Fall lässt sich dadurch abbilden, dass der Glaubensgrad für Werte unterhalb des Grenzwertes nicht null ist, sondern einen kleinen positiven Wert annimmt. Der zweite Fall deckt die Situation ab, in der die Eingangsgröße über dem Grenzwert liegt, die Diagnose d_i aber unzutreffend ist. Dieser Fall wird dadurch abgebildet, dass der Plausibilitätsgrad oberhalb des Grenzwertes echt kleiner als eins ist. In Bild 4.6 sind die Diagramme zur Bestimmung der Massezahlen für die beiden unterschiedlichen Interpretationen der Unterschreitung des Grenzwertes dargestellt. Auf der linken Seite befindet sich das Modell, das keine Informationen liefert, wenn der Grenzwert unterschritten wird, auf der rechten Seite wird die Unterschreitung des Grenzwertes als Ablehnung der Diagnose d_i interpretiert. Die Unwissenheit kann als Maß für die allgemeine Zuverlässigkeit der Eingangsgröße betrachtet werden. Es ist beispielsweise denkbar, dass durch äußere Störungen unbrauchbare Werte geliefert werden, die entweder gar nicht interpretierbar sind oder außerhalb des gültigen Wertebereichs liegen.

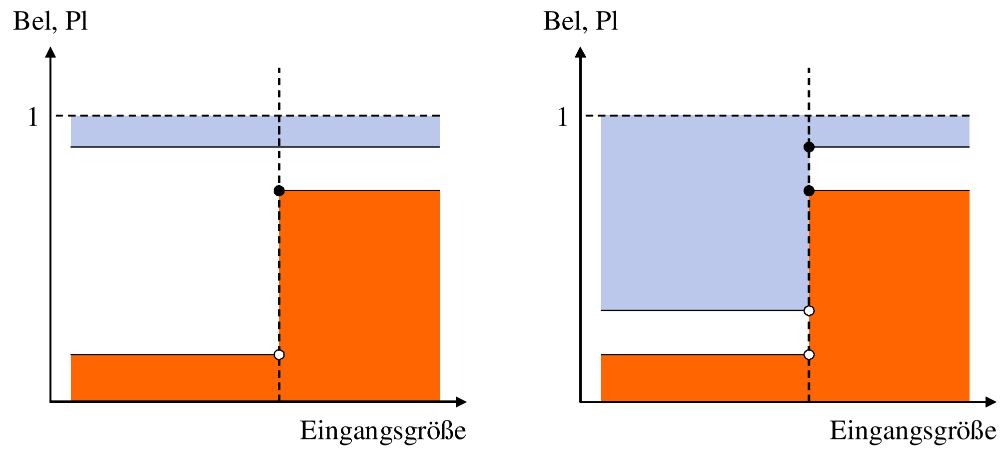

Bild 4.6: Eingangsgröße mit Grenzwert

Das zweite Beispiel verwendet eine lineare Zuordnung zwischen der Eingangsgröße und dem Glaubensgrad. Je größer die Eingangsgröße ist, desto größer soll die Unterstützung für die Diagnose d_i sein. In Bezug auf den Plausibilitätsgrad muss ähnlich dem oben dargestellten Fall die Eingangsgröße daraufhin untersucht werden, ob sie bei kleineren Werten die Ablehnung der Diagnose d_i unterstützt oder ob sie keine Information über die Diagnose liefert. Die Möglichkeit einer fehlerhaften Eingangsgröße wird dadurch modelliert, dass Glaubens- und Plausibilitätsgrad die Werte eins bzw. null nicht erreichen. Bild 4.7 stellt auf der linken Seite den Fall dar, dass ein kleiner Wert der Eingangsgröße keine Diagnoseinformationen liefert, auf der rechten Seite ist der Fall dargestellt, dass kleine Werte der Eingangsgröße als die Ablehnung der Diagnose unterstützten. Bei der Implementierung ist darauf zu achten, dass die Grenzen, die durch Gleichung (4.3) vorgegeben sind, nicht verletzt werden. Dazu muss entweder gewährleistet sein, dass der Wertebereich der Eingangsgröße fest definiert ist und auch durch äußere Störungen oder Fehler in der Erfassung nicht verlassen werden kann. Oder es ist eine Beschränkung von Glaubens- und Plausibilitätsgrad durch konstante Werte außerhalb des üblichen Wertebereichs einzuführen. Die Unwissenheit wird ähnlich wie im ersten Beispiel als Maß für die allgemeine Zuverlässigkeit der Eingangsgröße betrachtet werden. Zusätzlich lässt sich durch eine Zunahme der Unwissenheit zum Rand des Wertebereiches modellieren, dass die Messgenauigkeit in diesem Bereich abnimmt.

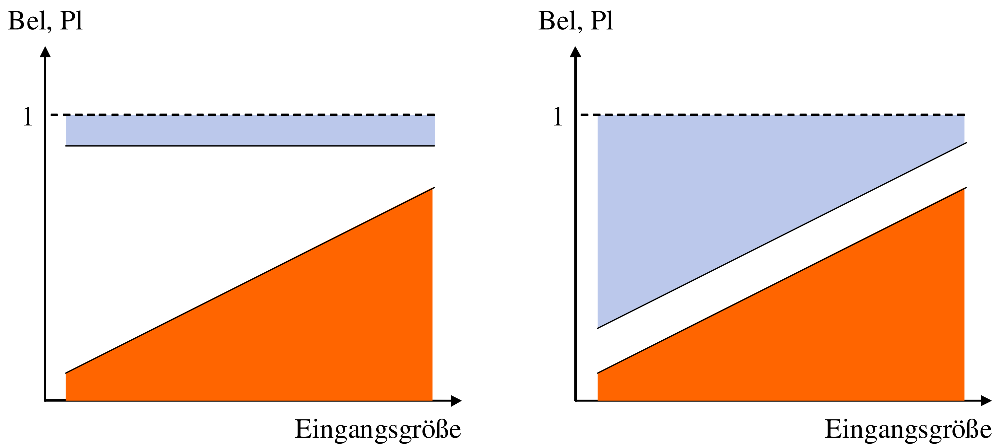

Bild 4.7: Lineare Abhängigkeit der Massezahlen

Es ist eine Fülle weiterer Möglichkeiten denkbar und sinnvoll, wie die Eingangsgrößen auf die Massezahlen abzubilden sind. Zur Festlegung eines geeigneten Verfahrens sind genaue Kenntnisse der Eingangsgröße und ihrer Aussagekraft bezüglich der Diagnosen notwendig, an die die Bestimmung der Massezahlen dann anzupassen ist.

4.4 Bestimmung der zutreffenden Diagnose

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der zutreffenden Diagnose wird anhand der Modellierung des Kühlsystems in Kapitel 4.2 gezeigt. Dazu werden zwei Hinweise über den Zustand angenommen. Der erste Hinweis wird durch die Temperatur des Kühlmittels gegeben und bezieht sich nur auf eine einzelne Diagnose. Der zweite Hinweis wird durch die Lüfterdrehzahl geliefert, die sich auf zwei mögliche Diagnosen bezieht. Die Abbildung der Eingangsgrößen auf die Massezahlen wird hier nicht modelliert, es werden direkt die Massezahlen vorgegeben. Nach der Verarbeitung der beiden Hinweise wird gezeigt, wie die zutreffende Diagnose anhand von Glaubens- und Plausibilitätsgrad bestimmt werden kann.

Der erste Hinweis wird durch die Temperatur des Kühlmittels gegeben. Diese Primärinformation hängt nur mit einer Diagnose, der „Verschmutzung des Kühlers“, zusammen, so dass die Verarbeitung am Knoten D_1 beginnt. Die grundlegende Wahrscheinlichkeitszuweisung wird wie in Bild 4.8 dargestellt durchgeführt. Um Gleichung (3.6) zu erfüllen, wird die Massezahl $m_1(\Theta) = 0{,}3$ dem Betrachtungsrahmen Θ zugeordnet. In Bild 4.8 wird sie als weißer Balken zur Repräsentation der Unwissenheit dargestellt.

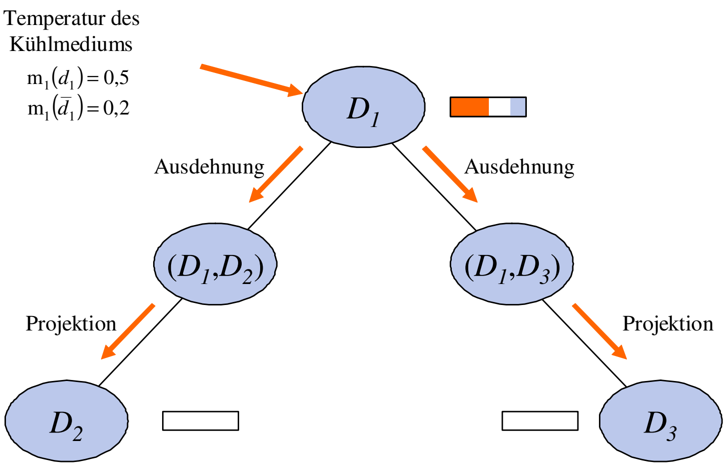

Bild 4.8: Verarbeitung des ersten Hinweises

Diese Glaubensfunktion wird entlang der Kanten der Markovkette durch die in Kapitel 3.4 eingeführten Operationen Projektion und Ausdehnung zu den übrigen Knoten propagiert. In Bild 4.8 wird dies durch die Pfeile mit der entsprechenden Beschriftung dargestellt. Das Ergebnis, dass die Knoten D_2 und D_3 ihren Zustand der vollständigen Unwissenheit beibehalten, stimmt mit der Annahme überein, dass die Primärinformation Temperatur des Kühlers keine Aussage über die Diagnosen „Pumpe defekt" und „Lüfter defekt" erlaubt.

Der zweite Hinweis wird durch die Lüfterdrehzahl geliefert. Er weist einen Zusammenhang mit den Diagnosen „Verschmutzung des Kühlers" und „Lüfter defekt" auf, so dass die Verarbeitung wie in Bild 4.9 dargestellt am Knoten (D_1, D_3) beginnt.

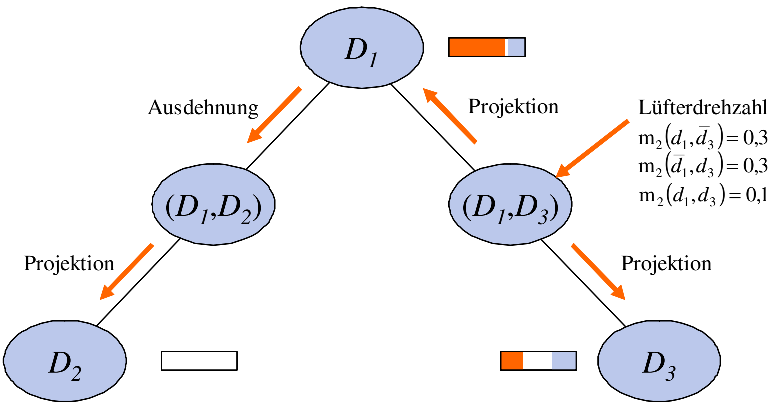

Bild 4.9: Verarbeitung des zweiten Hinweises

Die Massezahl $\mathrm{m}_2\left(d_1, \overline{d}_3\right) = 0{,}3$ ist ein Maß für die Unterstützung der Annahme, dass die Diagnose „Verschmutzung des Kühlers“ zutrifft und gleichzeitig die Diagnose „Lüfter defekt“ unzutreffend ist. Entsprechend ist die Massezahl $\mathrm{m}_2\left(\overline{d}_1, d_3\right) = 0{,}3$ ein Maß für die Unterstützung der Annahme, dass die Diagnose „Lüfter defekt“ zutrifft und gleichzeitig die Diagnose „Verschmutzung des Kühlers“ unzutreffend ist. Der Möglichkeit, dass beide Diagnosen „Verschmutzung des Kühlers“ und „Lüfter defekt“ gleichzeitig zutreffen, wird durch die Massezahl $\mathrm{m}_2\left(d_1, d_3\right) = 0{,}1$ Unterstützung in diesem Grad zugeordnet. Um Gleichung (3.6) zu erfüllen, wird dem Betrachtungsrahmen Θ die Massezahl $\mathrm{m}_2(\Theta) = 0{,}3$ zugeordnet, die als Unwissenheit oder Unsicherheit interpretiert werden kann. Bild 4.9 zeigt die Propagation der Evidenz entlang der Kanten der Markovkette zu den übrigen Knoten. Die Balkendiagramme neben den Knoten D_1, D_2 und D_3 in Bild 4.9 stellen die Ergebnisse für Glaubensgrad und Plausibilitätsgrad nach der Verarbeitung des zweiten Hinweises dar.

Die zutreffende Diagnose basierend auf den Hinweisen, die diesem Modell zugeführt wurden, erhält man durch den Vergleich der Balkendiagramme. Im oben dargestellten Beispiel ist die Diagnose „Verschmutzung des Kühlers“ zutreffend, weil sie durch einen größeren Glaubensgrad unterstützt wird als die Diagnosen „Lüfter defekt“ und „Pumpe defekt“. Zusätzlich ist die Unwissenheit, die durch den weißen Balken dargestellt wird, deutlich geringer. Das Ergebnis am Knoten D_2, das aus einem Glaubensgrad von null und einem Plausibilitätsgrad von eins besteht, steht in Übereinstimmung mit den Annahmen nach Bild 4.3. Es ist kein Hinweis verarbeitet worden, der Informationen über die Diagnose „Pumpe defekt“ liefert.

4.5 Bestimmung des Instandhaltungsintervalls

Bisher ist gezeigt worden, wie mit Hilfe der Evidenztheorie aus den vorliegenden Hinweisen durch plausibles Schließen die richtige Diagnose gefunden werden kann. Damit ist allerdings erst ein Teil der Eingangsdaten für das System zur integrierten Instandhaltungsplanung bestimmt. Der zweite Teil, die Bestimmung eines zulässigen Zeitintervalls, steht noch aus. Dazu sollen in diesem Kapitel zwei grundlegende Ansätze gezeigt werden.

Das zulässige Instandhaltungsintervall wird durch zwei Zeitpunkte festgelegt: Den frühesten und den spätesten Beginn der Instandhaltungsmaßnahmen. Der früheste Beginn markiert den

Zeitpunkt, an dem aus technischer Sicht frühestens Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen werden müssen. Es ist möglich, aber in der Regel unwirtschaftlich, Instandhaltungsmaßnahmen vorzuziehen und damit vor diesem Zeitpunkt durchzuführen. Der späteste Beginn markiert den Zeitpunkt, an dem aus technischer Sicht Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen werden müssen, um die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels weiterhin zu gewährleisten. Ein Verschieben von Instandhaltungsmaßnahmen über diesen Zeitpunkt hinaus führt in der Regel zu Einschränkungen des Betriebs oder zum Verlust der Funktionsfähigkeit.

Um eine sinnvolle Planung und Koordinierung der Instandhaltungsmaßnahmen durchführen zu können, muss mindestens der späteste Beginn in der Zukunft liegen. Im Idealfall liegen sowohl der früheste als auch der späteste Beginn in der Zukunft. Auf der Grundlage der heute zur Verfügung stehenden Daten ist also eine Aussage über den Zustand des Betriebsmittels und seinen Instandhaltungsbedarf in der Zukunft zu treffen. Eine solche Prognose ist mit Unsicherheiten behaftet, so dass die zu ermittelnden Zeitpunkte für den frühesten und spätesten Beginn der Maßnahmen nur eine Annäherung an die oben angegebene ideale Definition sein werden.

Der Ablauf der Ermittlung des zulässigen Instandhaltungsintervalls für eine Komponente eines Betriebsmittels ist in Bild 4.10 dargestellt. Sobald ein neuer Hinweis über den Zustand der betrachteten Betriebsmittelkomponente vorliegt, wird er auf Massezahlen abgebildet und im Markovbaum, der die verschiedenen Diagnosen für diese Komponente modelliert, mit den bereits vorliegenden Daten verknüpft. Die Massezahlen, die sich an jedem Knoten des Markovbaums ergeben, werden in einer Datenbank gespeichert. Der Glaubensgrad, der sich für die einzelnen Diagnosen der betrachteten Betriebsmittelkomponente durch die Rechnung ergibt, wird zusammen mit einem Zeitstempel gespeichert. Damit entsteht eine Datenbank, die getrennt nach den einzelnen Diagnosen den Verlauf des Glaubensgrades über die Zeit wiedergibt. Bild 4.11 zeigt diese Darstellung als Balkendiagramm für den Fall äquidistanter Zeitschritte. In einem letzten Schritt werden die Instandhaltungsintervalle der einzelnen Diagnosen zu einem zulässigen Instandhaltungsintervall zusammengefasst. Im Folgenden wird die Bestimmung des Instandhaltungsintervalls jeder einzelnen Diagnose und die Zusammenfassung zu einem resultierenden Instandhaltungsintervall detailliert beschrieben.

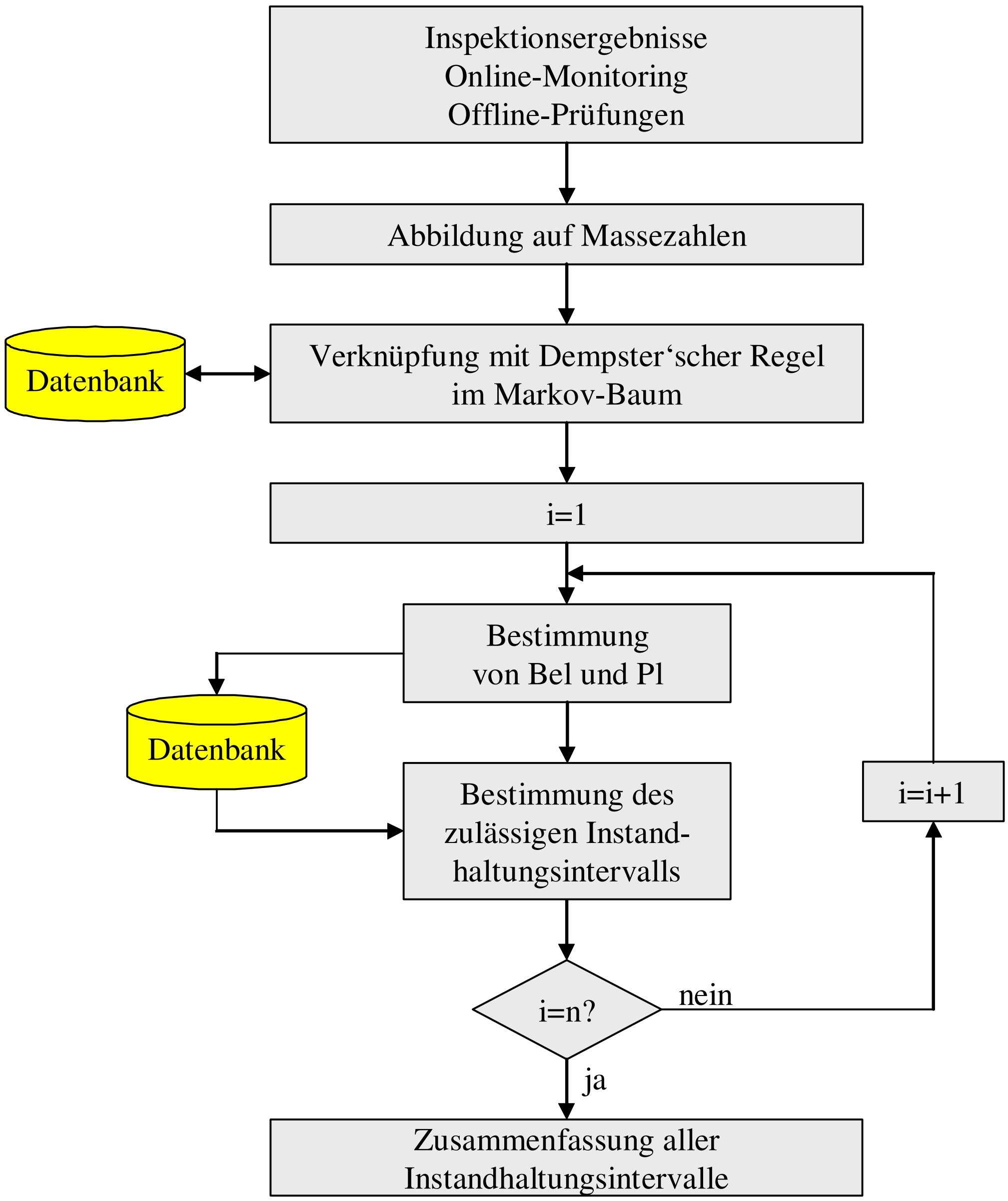

Bild 4.10: Ablauf der Bestimmung des Instandhaltungsintervalls

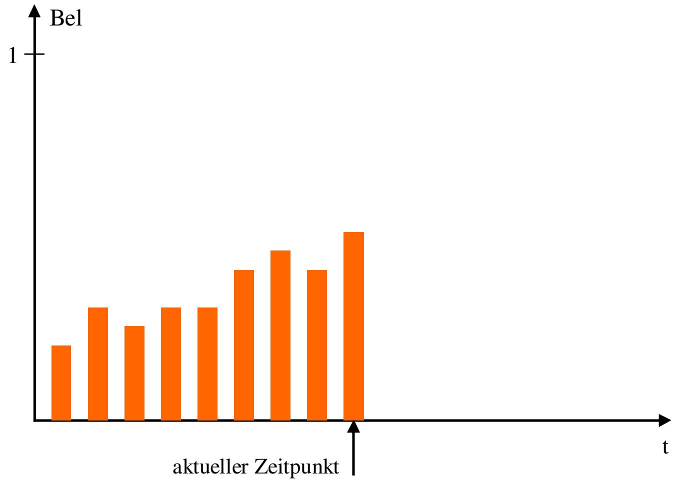

Bild 4.11: Verlauf des Glaubensgrades über der Zeit

Die Notwendigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen wird anhand des Wertes des Glaubensgrades bestimmt, siehe Bild 4.12. Bis zu einem ersten Grenzwert Bel_{MIN} sind keine Maßnahmen erforderlich, zwischen dem ersten Grenzwert Bel_{MIN} und zweiten Grenzwert Bel_{MAX} müssen die Instandhaltungsmaßnahmen vorgenommen werden und beim Überschreiten des zweiten Grenzwertes Bel_{MAX} bis hin zum maximalen Wert von eins des Glaubensgrades ist die Funktionsfähigkeit gefährdet.

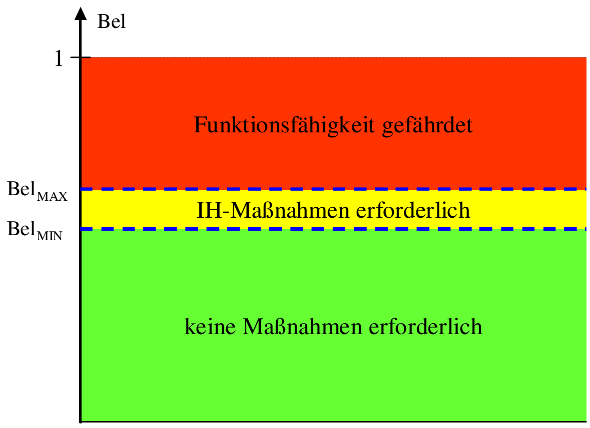

Bild 4.12: Grenzwerte des Glaubensgrades

Die Projektion des Verlaufs des Glaubensgrades in die Zukunft erfolgt mittels linearer Regression der in Bild 4.11 dargestellten Werte. Die Abszisse des Schnittpunktes der Regressionsgraden mit dem ersten Grenzwert Bel_{MIN} gibt damit dann den frühesten Beginn $t^{i}_{FRÜH}$ der Instandhaltungsmaßnahmen an. Der späteste Beginn $t^{i}_{SPÄT}$ wird durch die Abszisse des Schnittpunktes der Regressionsgeraden mit dem zweiten Grenzwert $\mathrm{Bel}_{\mathrm{MAX}}$ festgelegt. Der hochgestellte Index i kennzeichnet die betrachtete Diagnose. Bild 4.13 stellt diese Vorgehensweise graphisch dar.

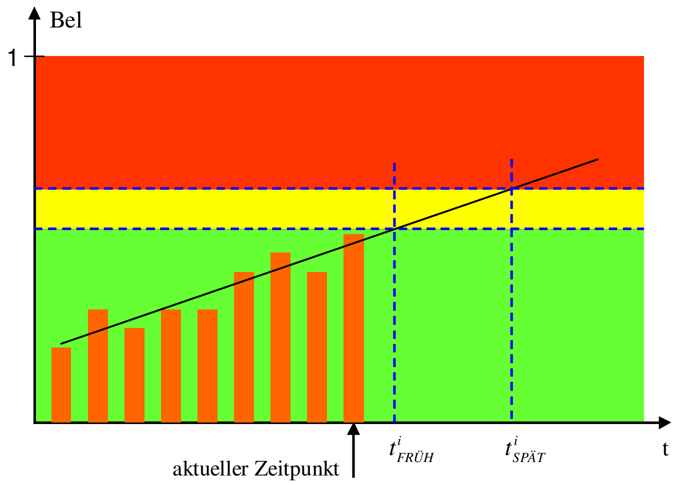

Bild 4.13: Bestimmung des Instandhaltungsintervalls

Dieser Ansatz zur Bestimmung des zulässigen Instandhaltungsintervalls hat den Vorteil, dass er einfach und transparent ist. Dem stehen aber folgende Nachteile entgegen: Die Grenzwerte $\mathrm{Bel}_{\mathrm{MIN}}$ und $\mathrm{Bel}_{\mathrm{MAX}}$ müssen heuristisch aus der Erfahrung festgelegt werden, derzeit können keine Regeln zur Bestimmung dieser Grenzen angegeben werden. Die Abbildung der Eingangsgrößen auf die Massezahlen wirkt sich direkt auf den Verlauf des Glaubensgrades aus. Bei unterschiedlichen Modellierungen an dieser Stelle werden bei gleichen Grenzwerten unterschiedliche Instandhaltungsintervalle berechnet. Die Beanspruchung des Betriebsmittels sowohl durch den Betrieb als auch durch Umwelteinflüsse muss im Betrachtungszeitraum gleich bleibend sein, um die lineare Extrapolation zu rechtfertigen. Aus dem gleichen Grund muss die Abnutzung bzw. die Verschlechterung des Zustands proportional zurzeit verlaufen.

Die Annahme, dass die Abnutzung proportional zurzeit verläuft, stellt eine grobe Vereinfachung dar. Häufig wird ein exponentielles Verhalten der Alterung und Abnutzung der Betriebsmittel festgestellt. Dieses Verhalten lässt sich in dem beschriebenen Verfahren abbilden, indem der Glaubensgrad in einem Diagramm mit logarithmischer Ordinate über der Zeit aufgetragen wird, s. Bild 4.14. Das Einzeichen der Regressionsgeraden in dieses

Diagramm entspricht der Anpassung einer Exponentialfunktion an die vorliegenden Daten. Die Bestimmung des frühesten und spätesten Beginns der Instandhaltungsmaßnahmen erfolgt wie bereits dargestellt anhand der Schnittpunkte der Regressionsgeraden mit festgelegten Grenzwerten.

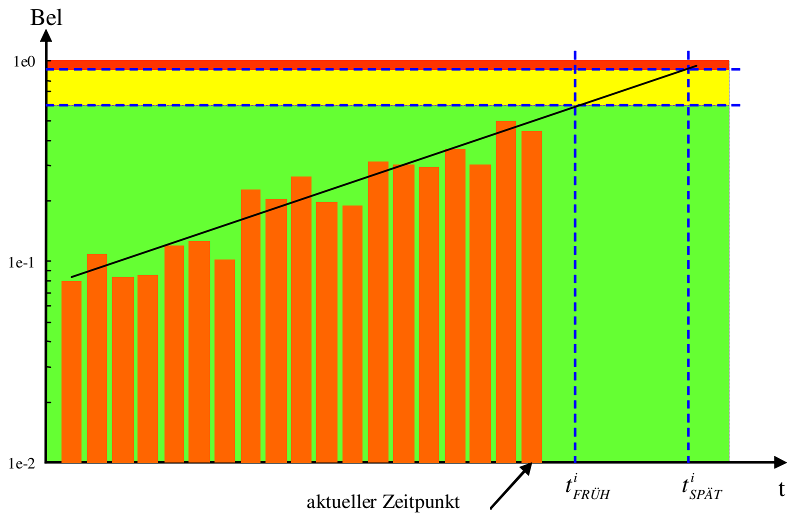

Bild 4.14: Bestimmung des Instandhaltungsintervalls bei exponentieller Abnutzung

Es bleibt allerdings weiterhin die Problematik bestehen, sinnvolle Werte für die beiden Grenzwerte Bel_{MIN} und Bel_{MAX} anzugeben. Weiterhin unberücksichtigt bleiben auch bei dieser Vorgehensweise Veränderungen der Betriebsbedingungen und der Umwelteinflüsse.

Auf diese Art und Weise können zulässige Instandhaltungsintervalle für jede einzelne Diagnose bestimmt werden. Für ein einzelnes Betriebsmittel sind allerdings mehrere Diagnosen möglich. Im Allgemeinen werden sich die zulässigen Instandhaltungsintervalle der einzelnen Diagnose nicht überschneiden oder decken. Auf der anderen Seite wird es aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein, mehrere Instandhaltungsmaßnahmen auf einmal durchzuführen, und so Anfahrtskosten und den Zeitaufwand für das Zerlegen und den Zusammenbau des Betriebsmittels zu reduzieren. Damit stellt sich dann die Frage, wie die zulässigen Instandhaltungsintervalle der einzelnen Diagnosen zusammenzufassen sind, um den Zeitraum zur Durchführung der erforderlichen Maßnahmen zu bestimmen. Unter der Prämisse, dass die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels nicht gefährdet sein darf, wird das zulässige Instandhaltungsintervall nach folgendem Verfahren bestimmt. Sei

$$T_{FRÜH} = \left\{ t^i_{FRÜH} \,\middle|\, i = 1, \ldots, n \right\} \tag{4.4}$$

die Menge der Zeitpunkte $t^i_{FRÜH}$, die für jede Diagnose i der n möglichen Diagnosen den frühesten Beginn der Instandhaltungsmaßnahmen bezeichnen. Die entsprechende Definition für die Zeitpunkte $t^i_{SPÄT}$, die den spätesten Beginn der Maßnahmen angeben, ist:

$$T_{SPÄT} = \left\{ t^i_{SPÄT} \,\middle|\, i = 1, \ldots, n \right\} \tag{4.5}$$

Für die Menge $T_{SPÄT}$ wird das Minimum im Sinne des frühesten Zeitpunktes bestimmt:

$$t^{GES}_{SPÄT} = \min T_{SPÄT} \tag{4.6}$$

Aus der Menge $T_{FRÜH}$ wird der späteste Zeitpunkt bestimmt, der noch vor $t^{GES}_{SPÄT}$ liegt. Die Bestimmung des Maximums soll analog zur Bestimmung des Minimums im Sinne des spätesten Zeitpunktes durchgeführt werden. Entsprechend ist der „Kleiner-als“-Operator so zu verstehen, dass frühere Zeitpunkte als kleiner gelten.

$$t^{GES}_{FRÜH} = \max \left\{ t \in T_{FRÜH} \,\middle|\, t < t^{GES}_{SPÄT} \right\} \tag{4.7}$$

Das zulässige Instandhaltungsintervall I wird dann aus den beiden so bestimmten Zeitpunkten gebildet:

$$I = \left[t^{GES}_{FRÜH}, t^{GES}_{SPÄT} \right] \tag{4.8}$$

Falls sich die zulässigen Instandhaltungsintervalle der einzelnen Diagnosen nicht überschneiden, gehören $t^{GES}_{FRÜH}$ und $t^{GES}_{SPÄT}$ zu derselben Diagnose. Damit entspricht das so ermittelte Instandhaltungsintervall genau dem frühesten Instandhaltungsintervall aller Diagnosen. Bild 4.15 zeigt diesen Sachverhalt exemplarisch für drei Diagnosen D_1, D_2 und D_3. Die zulässigen Instandhaltungsintervalle $\left[t^i_{FRÜH}; t^i_{SPÄT} \right]$ sind für die drei Diagnosen durch grüne Balken dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Zeitpunkte $t^{i}_{FRÜH}$ und $t^{i}_{SPÄT}$ für $i = 1,2,3$ nicht auf der Zeitachse dargestellt. Das resultierende Intervall ist auf der Zeitachse gekennzeichnet. Mit dieser Vorgehensweise wird davon ausgegangen, dass es am wirtschaftlichsten ist, die zu den Diagnosen D_2 und D_3 gehörenden Maßnahmen zeitlich vorzuziehen. Überschreitet der zeitliche Abstand der zu den verschiedenen Maßnahmen gehörenden Instandhaltungsintervalle einen parametrierbaren Wert, bleibt es der Entscheidung des Asset Managers vorbehalten, ob die Maßnahmen zusammengefasst oder zu unterschiedlichen Terminen durchgeführt werden.

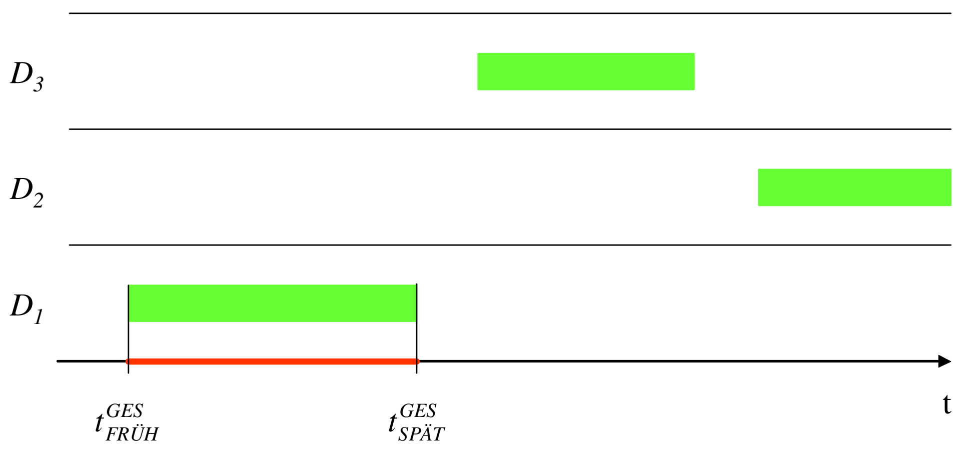

Bild 4.15: Resultierendes Instandhaltungsintervall ohne Überschneidung

Falls sich die Instandhaltungsintervalle überschneiden, gehört $t^{GES}_{FRÜH}$ nicht notwendig zu derselben Diagnose wie $t^{GES}_{SPÄT}$. Durch die Berechnungsvorschrift ist gewährleistet, dass der späteste Beginn für alle Diagnosen eingehalten wird. Aus der wirtschaftlichen Überlegung, die Instandhaltungsmaßnahmen nicht unnötig früh vorzunehmen, wird der spätest mögliche Zeitpunkt für den frühesten Beginn bestimmt. Dadurch ist es möglich, dass sich der früheste Beginn für einzelne Diagnosen auf einen späteren Zeitpunkt verschiebt, s. Diagnose D_1 in Bild 4.16.

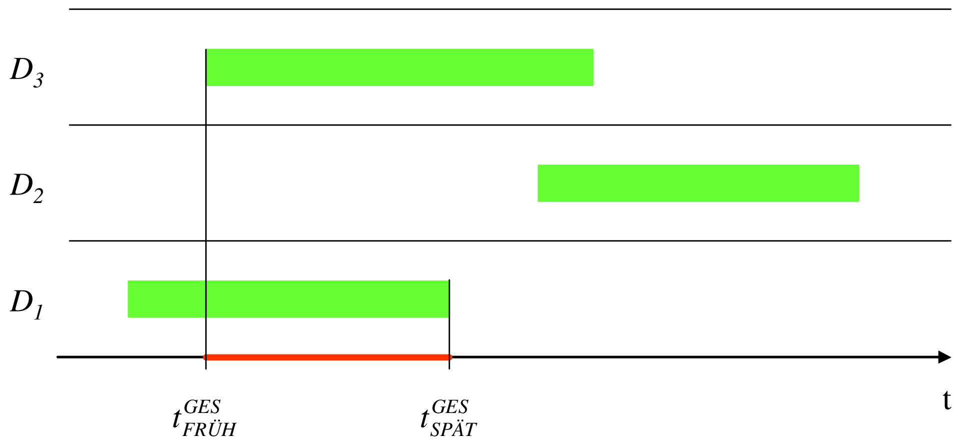

Bild 4.16: Resultierendes Instandhaltungsintervall mit Überschneidung

Die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels ist durch die Einhaltung des spätesten Beginns trotzdem gewährleistet. Unter ungünstigen Umständen, die in Bild 4.17 dargestellt sind, kann das Problem entstehen, dass das zulässige Instandhaltungsintervall nur aus einem sehr engen Zeitbereich besteht. Dadurch werden die Möglichkeiten der Instandhaltungsplanung und -koordination stark eingeschränkt.

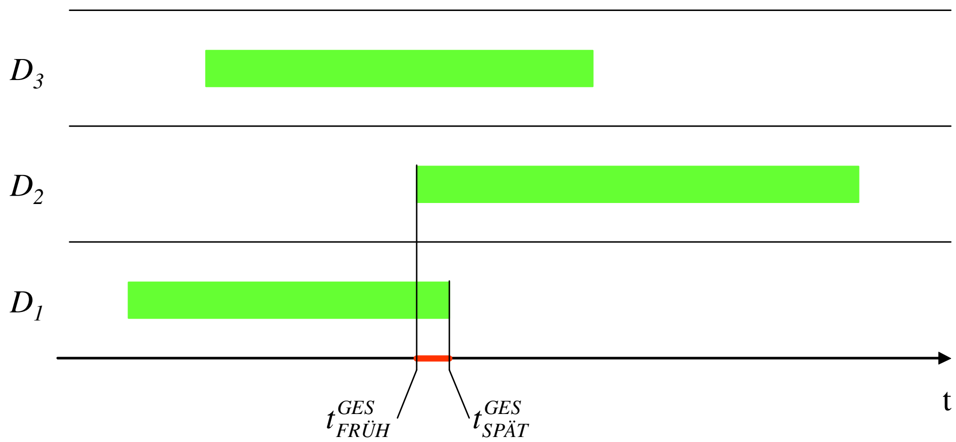

Bild 4.17: Auftreten eines schmalen zulässigen Instandhaltungsintervalls

Das Problem lässt sich leicht umgehen, indem entweder bei der Bestimmung des Instandhaltungsintervalls eine minimale Länge gefordert wird, oder indem bei der Instandhaltungsplanung berücksichtigt wird, dass Maßnahmen auch zeitlich vor dem Beginn des zulässigen Intervalls durchgeführt werden dürfen. Die Maßnahmen werden dadurch nicht unnötig früh durchgeführt, weil der Optimierungsalgorithmus aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus versucht, die Maßnahmen so spät wie möglich durchzuführen.

4.6 Behandlung älterer Hinweise

Der bisher dargestellte Algorithmus verarbeitet jeden eingehenden Hinweis im Markovbaum, durch den die einzelnen Diagnosen des Betriebsmittels und deren Zusammenhang modelliert werden, und bestimmt anhand des Glaubensgrades sowohl die zutreffende Diagnose als auch das zulässige Instandhaltungsintervall. Dabei bleibt jedoch unberücksichtigt, dass die Primärinformationen, aus denen die Hinweise generiert werden, nicht zur gleichen Zeit erfasst werden. Neuere Hinweise liefern jedoch ein aktuelleres Bild vom Zustand des Betriebsmittels, der sich durch betriebliche Belastung und Umwelteinflüsse im Laufe der Zeit verändert. Dieser Tatsache wird nicht Rechnung getragen, da alle Hinweise ohne Gewichtung unabhängig von ihrem Alter gleich behandelt werden. Ein zweites Manko des Modells besteht im Verhalten des Glaubensgrades über der Zeit, wenn keine neuen Hinweise auflaufen. Der Glaubensgrad bleibt konstant auf dem letzten berechneten Wert, dagegen ist es wünschenswert, dass sich Glaubens- und Plausibilitätsgrad zugunsten der Unwissenheit verringern, die Diagnoseinformation also der vollständigen Unwissenheit zustrebt. Dieses Verhalten steht im Einklang mit der Anschauung, dass über das Betriebsmittel kein Wissen vorliegt, wenn Primärinformationen weder über seine ordnungsgemäße Funktion noch über Abnutzungserscheinungen vorliegen. In diesem Kapitel wird ein Lösungsansatz für diese beiden Problemstellungen vorgeschlagen.

Der Lösungsansatz besteht aus zwei Schritten. Zunächst werden Hinweise unterschiedlichen Alters betrachtet, die auf denselben Primärinformationen beruhen. Im Anschluss daran wird die Vorgehensweise diskutiert, wenn Hinweise unterschiedlichen Alters auf unterschiedlichen Primärinformationen beruhen.

Bei der Betrachtung von Hinweisen unterschiedlichen Alters, die auf denselben Primärinformationen beruhen, wird die Vorgehensweise durch die Evidenztheorie selbst vorgegeben. Es ist unzulässig, Hinweise aus derselben Quelle mehrfach zu verwenden. Das gilt auch dann, wenn mehrfache Messungen derselben Größe zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt werden. Die Konsequenz daraus ist, dass ältere Hinweise durch die neuen Hinweise ersetzt werden müssen, sofern sie auf denselben Primärinformationen beruhen.

Liegen unterschiedlich alte Hinweise vor, die auf unterschiedlichen Primärinformationen beruhen, können sie zu einer Bewertung des Zustands kombiniert werden. Dabei erscheint es sinnvoll, die älteren Hinweise in Abhängigkeit von ihrem Alter zu gewichten, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die neuesten Hinweise die aktuellste Beschreibung des Betriebsmittelzustands liefern. Zur Gewichtung wird ein Gewichtungsfaktor w eingeführt, der Werte aus folgendem Intervall annehmen kann:

$$w \in [0,1] \tag{4.9}$$

Für den Wert eins des Gewichtungsfaktors soll der Hinweis in vollem Umfang verwendet werden, ohne aufgrund seines Alters gewichtet zu sein. Der Wert null entspricht keiner Verwendung des Hinweises. Zur Bestimmung der Werte des Gewichtungsfaktors werden im Folgenden zwei transparente Verfahren vorgestellt.

Das erste Verfahren ordnet jedem Hinweis ein maximales Alter T_{MAX} zu. Zu dem Zeitpunkt, an dem der Hinweis entsteht, soll er vollständig verwendet werden, was einem Wert des Gewichtungsfaktors w von eins entspricht. Nach dem Ablauf der Zeit T_{MAX} beginnend mit der Entstehung des Hinweises soll der Hinweis nicht mehr verwendet werden, d. h. w nimmt den Wert null an. Im Zeitbereich zwischen der Entstehung des Hinweises und dem maximalen Alter T_{MAX} werden die Werte von w durch lineare Interpolation zwischen diesen beiden Werten bestimmt. Bild 4.18 veranschaulicht dieses Verfahren.

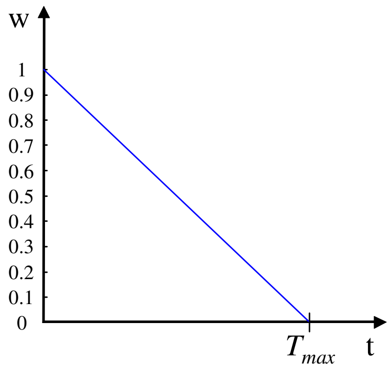

Bild 4.18: Bestimmung des Gewichtungsfaktors bei Vorgabe eines maximalen Alters

Jeder Hinweis besteht im Allgemeinen aus mehreren Massezahlen, die eine Diagnose entweder unterstützen oder entkräften, sowie einer Massezahl des Betrachtungsrahmens, die als Maß für die Unwissenheit betrachtet wird. Mit dem Gewichtungsfaktor werden alle Massezahlen gewichtet, die eine Aussage über die Diagnose treffen, so dass die Massezahl des Betrachtungsrahmens größer wird. Die Aussagen, die für bzw. gegen die Diagnose sprechen, werden also zugunsten der Unwissenheit verringert.

Das zweite Verfahren verwendet an Stelle des maximalen Alters T_{MAX} eine Halbwertszeit $T_{1/2}$ für jeden Hinweis. Ausgehend von dem Wert des Gewichtungsfaktors w von eins zum Zeitpunkt der Entstehung des Hinweises, reduziert sich w nach Ablauf der Zeit $T_{1/2}$ jeweils auf die Hälfte seines Ausgangswertes. Dadurch entsteht ein exponentieller Verlauf von w über der Zeit, s. Bild 4.19.

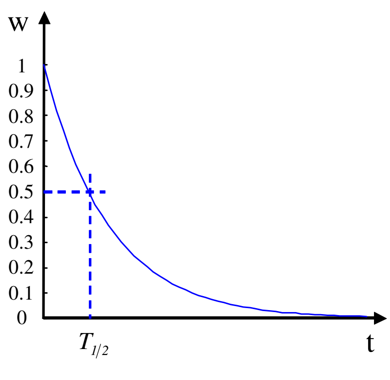

Bild 4.19: Bestimmung des Gewichtungsfaktors bei Vorgabe einer Halbwertszeit

Durch diese Vorgehensweise wird theoretisch der Wert $w = 0$ niemals erreicht. Ein Vergleich dieser beiden Verfahren wird durch folgende Festlegung von T_{MAX} ermöglicht:

$$T_{MAX} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \tag{4.10}$$

Durch diese Festlegung ist der lineare Verlauf gerade die Tangente an die Exponentialfunktion im Punkt $t = 0$, d. h. nach der Entstehung des Hinweises ist der Verlauf des Gewichtungsfaktors zunächst näherungsweise gleich. Im weiteren Verlauf bleibt der Gewichtungsfaktor des exponentiellen Verfahrens deutlich größer als bei linearem Verlauf, s. Bild 4.20. Beim Erreichen der Zeit T_{MAX}, zu der w des linearen Verfahrens auf null abgesunken ist, weist w des exponentiellen Verfahrens den Wert $w = 1/e \approx 0{,}37$ auf. Qualitativ ist der Einfluss älterer Hinweise größer, wenn ihr Alter nach dem exponentiellen Verfahren gewichtet wird.

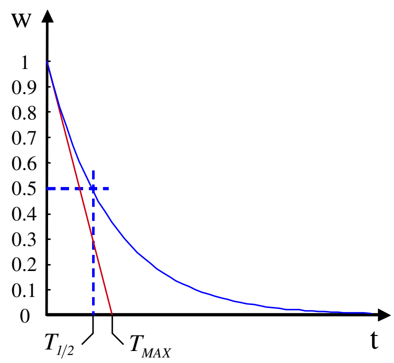

Bild 4.20: Vergleich der Verfahren zur Bestimmung des Gewichtungsfaktors

Die Festlegung von T_{MAX} bzw. $T_{1/2}$ muss empirisch anhand der Betriebserfahrung erfolgen, dazu können derzeit keine Regeln oder Empfehlungen gegeben werden.

Die Berücksichtigung des Alters der Hinweise durch einen Gewichtungsfaktor in der dargestellten Verfahrensweise hat direkte Auswirkungen auf die Bestimmung des zulässigen Instandhaltungsintervalls. Diese Auswirkungen sollen anhand des theoretischen Szenarios dargestellt werden, dass innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls regelmäßig die Berechnung von Glaubens- und Plausibilitätsgrad für die einzelnen Diagnosen durchgeführt wird, ohne dass neue, aktuelle Hinweise auflaufen. Da die Massezahlen, die für bzw. gegen die

Diagnose sprechen, zugunsten der Massezahl des Betrachtungsrahmens, die als Maß für die Unwissenheit angesehen wird, mit jedem Zeitschritt entsprechend des Gewichtungsfaktors verringert werden, werden sich qualitativ auch der Glaubens- und Plausibilitätsgrad verringern. Bild 4.21 zeigt qualitativ den Verlauf von Glaubens- und Plausibilitätsgrad für eine beliebige Diagnose unter diesen Voraussetzungen.

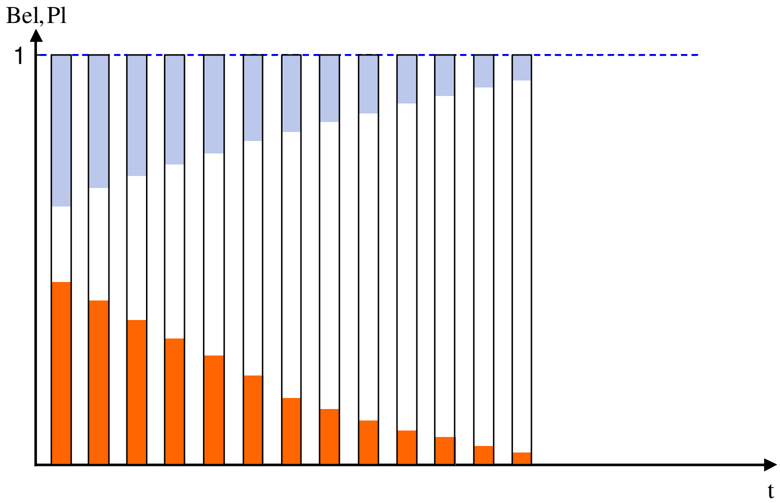

Bild 4.21: Verlauf von Glaubens- und Plausibilitätsgrad ohne neue Hinweise

In Übereinstimmung mit der Anschauung nimmt die Unwissenheit mit der Zeit zu. Es ist unmittelbar einsichtig, dass es aufgrund des fallenden Verlaufs des Glaubensgrades nicht mehr möglich, mit Hilfe der beschriebenen Verfahren der Extrapolation unter Verwendung zweier fester Grenzwerte das zulässige Instandhaltungsintervall zu bestimmen.

Zur Lösung dieses Problems wird der Ansatz verfolgt, dass das System zur Zustandsbestimmung nicht nur eine Aussage über das zulässige Instandhaltungsintervall sowie die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen erlaubt, sondern zusätzlich eine Warnmeldung generiert, falls aufgrund fehlender Eingangsdaten keine Aussagen mehr möglich sind. Der geeignete Parameter, um diesen Zustand zu detektieren, ist die Unwissenheit. Die Festlegung eines Grenzwertes für die Unwissenheit, bei dessen Überschreitung die Warnmeldung generiert wird, ist aus folgenden Gründen problematisch. Zum einen können für einzelne Diagnosen Werte für die Unwissenheit auftreten, die über dem Grenzwert liegen, obwohl aktuelle Hinweise vorliegen. Zum anderen wird das Fehlen der Hinweise erst spät bemerkt, wenn die

Unwissenheit anfänglich gering ist. Es dauert dann mehrere Zeitschritte, bis die Gewichtungsfaktoren ausreichend klein sind, um eine Unwissenheit über dem Grenzwert zu generieren.

Ein besser geeigneter Ansatz ist es, den Verlauf der Unwissenheit über der Zeit zu betrachten. Es ist eine Eigenschaft der Evidenztheorie, dass sich die Unwissenheit immer verringert, wenn ein neuer Hinweis zu den schon vorhandenen hinzugefügt wird. Das gilt allerdings nur dann, wenn die bereits vorliegenden Hinweise nicht durch Gewichtungsfaktoren abgeschwächt werden. In diesem Fall lässt sich das Vorliegen neuer Hinweise daran ablesen, dass sich die Unwissenheit von Zeitschritt zu Zeitschritt verringert. Liegen keine neuen Hinweise vor, bleiben Glaubens- und Plausibilitätsgrad und damit auch die Unwissenheit konstant. Es besteht keine Möglichkeit, die Unwissenheit von einem Zeitschritt zum nächsten zu vergrößern. Erst durch die Einführung der Gewichtungsfaktoren für ältere Hinweise ist ein Mechanismus geschaffen worden, der es erlaubt, die Unwissenheit von einem Zeitschritt zum nächsten zu vergrößern. Liegen keine neuen Hinweise vor, so wird sich die Unwissenheit von einem Zeitschritt zum nächsten vergrößern. Allerdings ist der Umkehrschluss, dass die Vergrößerung der Unwissenheit das Fehlen neuer Hinweise impliziert, nicht zulässig. Es ist möglich, dass die Abschwächung der vorhandenen Hinweise aufgrund ihres Alters gegenüber den neu vorliegenden Hinweisen überwiegt. Der neue Hinweis ist zu schwach, um die altersabhängige Reduzierung von Glaubens- und Plausibilitätsgrad zu kompensieren. Aus technischer Sicht ist das Ansteigen der Unwissenheit im Laufe der Zeit trotzdem als Auslöser für die Warnmeldung geeignet, allerdings muss die Interpretation lauten, dass keine oder zu schwache Hinweise über eine Diagnose vorliegen.

Sobald in dem Verfahren zur Zustandsbestimmung das Alter der zugrunde liegenden Hinweise in der beschriebenen Art und Weise berücksichtigt werden soll, muss zwangsläufig eine größere Datenmenge gespeichert werden. Ohne Berücksichtigung des Alters ist es ausreichend, den Glaubens- und Plausibilitätsgrad zusammen mit dem Zeitstempel zu speichern. Mit Berücksichtigung des Alters müssen die Massezahlen jedes Hinweises zusammen mit dem Zeitstempel gespeichert werden, weil sie mit den Gewichtungsfaktoren abhängig von ihrem Alter bewertet werden. Der Rechenaufwand zur Bestimmung des aktuellen Zustands steigt ebenfalls an, weil bei jeder Berechnung alle gewichteten Hinweise miteinander kombiniert werden müssen. Ohne Berücksichtigung des Alters muss nur der aktuelle Hinweis mit der bereits vorliegenden Zusammenfassung der vorhergehenden Hinweise kombiniert werden.

4.7 Vollständiges Modell des Leistungstransformators

In den vorangegangenen Kapiteln ist ein Verfahren auf der Basis der Evidenztheorie dargestellt, das für eine ausgewählte Komponente eines Leistungstransformators anhand unterschiedlichster Eingangsinformationen die zutreffende Diagnose sowie das zulässige Instandhaltungsintervall für die notwendigen Wartungsmaßnahmen bestimmt. In diesem abschließenden Kapitel wird die Erweiterung dieses Verfahrens auf einen vollständigen Leistungstransformator vorgestellt. Analog zu dieser Vorgehensweise kann das Verfahren auch auf andere Betriebsmittel angewendet werden.

Zunächst werden für den Leistungstransformator die zu betrachtenden Komponenten definiert. Zu jeder dieser Komponenten werden die möglichen Diagnosen und die zur Verfügung stehenden Primärinformationen identifiziert. Der qualitative Zusammenhang zwischen den Diagnosen und den Primärinformationen wird gruppiert nach den definierten Komponenten in einer Matrix entsprechend Bild 4.2 dargestellt. Als Basis für die Erstellung der Matrix für einen Leistungstransformator kann /15/ herangezogen werden.

Anhand der Matrix werden die Diagnosen zusammengestellt, die in einem Markovbaum modelliert werden. Dazu wird zunächst eine beliebige Primärinformation markiert. Ausgehend von der markierten Primärinformation werden alle mit ihr zusammenhängenden, möglichen Diagnosen markiert. Im nächsten Schritt werden zusätzlich zur schon bestehenden Markierung alle Primärinformationen markiert, die einen qualitativen Zusammenhang mit den markierten Diagnosen aufweisen. Die abwechselnde Markierung von Primärinformationen und Diagnosen wird solange weitergeführt, bis keine zusätzlichen Primärinformationen und Diagnosen mehr markiert werden können. Alle Diagnosen, die auf diese Weise markiert sind, müssen in einem Markovbaum modelliert werden. Für die Vorgehensweise zur Erstellung eines Markovbaums wird auf die Literatur, z. B. /46/, verwiesen. Im Allgemeinen werden auf diese Weise nicht alle Diagnosen erfasst. Das beschriebene Vorgehen zur Erstellung der Markovbäume ist auf alle noch nicht erfassten Diagnosen anzuwenden, so dass mehrere Markovbäume für ein Betriebsmittel entstehen, die keine Verbindung untereinander aufweisen. Bild 4.22 zeigt diesen Sachverhalt schematisch. Bei sehr schwach ausgeprägten Zusammenhängen zwischen Diagnosen und Primärinformationen können auch innerhalb einer Komponente mehrere Markovbäume entstehen, die im Extremfall auch aus nur einem Knoten bestehen.

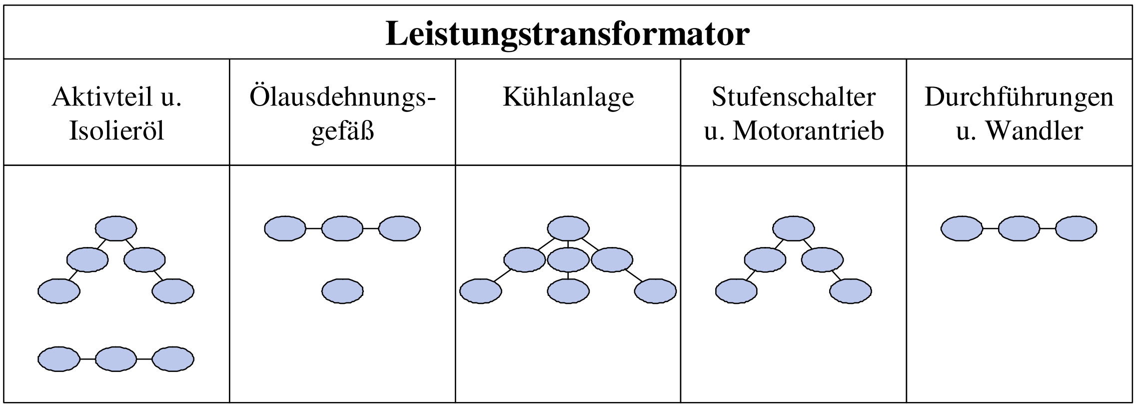

Bild 4.22: Schematische Modellierung mit mehreren Markovbäumen

Nachdem damit die qualitativen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Diagnosen und den Primärinformationen modelliert sind, ist noch die quantitative Abhängigkeit zu beschreiben. Dazu muss für jede zur Verfügung stehende Primärinformation festgelegt werden, wie ihre Werte auf Massezahlen abgebildet werden. Dabei können die in Kapitel 4.3 vorgestellten Methoden verwendet werden. Die Modellbildung der möglichen Diagnosen und zur Verfügung stehenden Primärinformationen ist damit abgeschlossen.

Der Ablauf der Bestimmung des zulässigen Instandhaltungsintervalls für das vollständige Modell des Leistungstransformators ist in Bild 4.23 dargestellt. Beim Vorliegen neuer Primärinformationen, z. B. aus Inspektionsergebnissen, von Online-Monitoring-Systemen oder durch Offline-Prüfungen, werden diese zunächst auf die Massezahlen abgebildet. Die ermittelten Massezahlen werden mit einem Zeitstempel in einer Datenbank gespeichert. Im nächsten Schritt werden alle in der Datenbank vorliegenden Informationen anhand ihres Alters gewichtet. Dabei kommen Verfahren nach Kapitel 4.6 zur Anwendung. Die folgenden Schritte, die im Diagramm in Bild 4.23 mit einem grauen Rechteck hinterlegt sind, werden für jeden Markovbaum, der bei der Modellierung des Leistungstransformators erstellt worden ist, getrennt ausgeführt. In Bild 4.23 wird dies durch die drei hintereinander liegenden, grauen Rechtecke angedeutet. Die aus der Datenbank entnommenen und gewichteten Massezahlen werden sequentiell am zugehörigen Knoten des Markovbaums verarbeitet und entlang der Kanten durch den gesamten Baum propagiert. Die Reihenfolge der Verarbeitung der Massezahlen ist dabei unerheblich. Danach wird für jede der *n* möglichen Diagnosen des zurzeit betrachteten Markovbaums der Glaubens- und Plausibilitätsgrad bestimmt. Die ermittelten Werte werden mit einem Zeitstempel versehen und in einer Datenbank gespeichert.

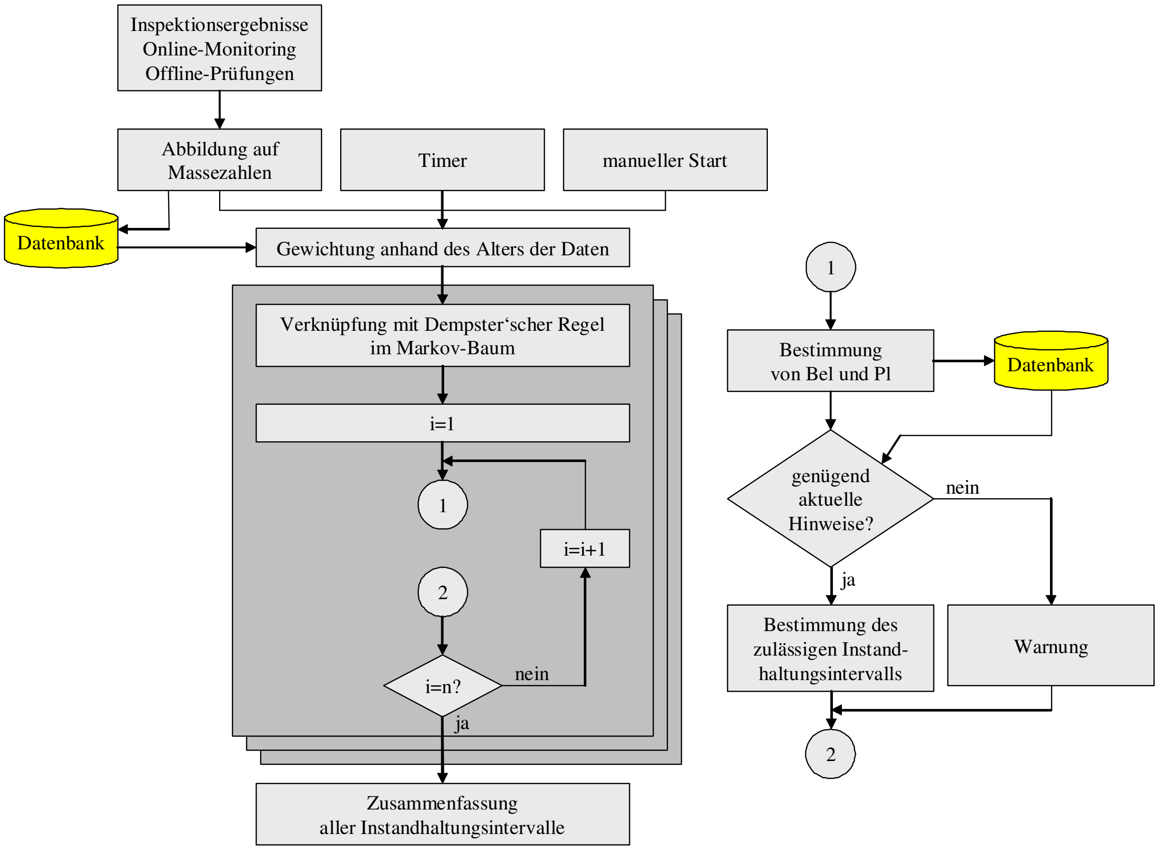

Bild 4.23: Ablauf bei Betrachtung eines vollständigen Leistungstransformators

Anhand des in der Datenbank gespeicherten Verlaufs von Glaubens- und Plausibilitätsgrad wird geprüft, ob ausreichend aktuelle Hinweise vorliegen, um das zulässige Instandhaltungsintervall zu berechnen. Falls dies nicht der Fall ist, liegt eine Situation entsprechend Bild 4.21 vor und es wird eine Warnmeldung ausgegeben. Liegen ausreichend aktuelle Hinweise vor, so wird das zulässige Instandhaltungsintervall bestimmt. Dabei werden die in Kapitel 4.5 vorgestellten Methoden angewendet.

Alle ermittelten Instandhaltungsintervalle werden mit Hilfe der in Kapitel 4.5 dargestellten Methode zu einem resultierenden Instandhaltungsintervall zusammengefasst. Dabei wird nicht getrennt nach den einzelnen Markovbäumen oder den Komponente des Leistungstransformators verfahren, sondern es werden übergreifend alle Markovbäume sämtlicher Komponenten berücksichtigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass es am wirtschaftlichsten ist, Wartungsmaßnahmen an einzelnen Komponenten zeitlich vorzuziehen und dafür Freischaltungen, Demontage- und Montagearbeiten sowie Anfahrten zum Betriebsmittel einzusparen. Bei großen zeitlichen Differenzen zwischen den erlaubten Instandhaltungsintervallen bleibt es der Entscheidung des Asset Managers vorbehalten, die notwendigen Wartungsarbeiten an mehreren unterschiedlichen Terminen durchzuführen.

Es ist vorgesehen, die dargestellte Berechnung in regelmäßigen Zeitabständen durch einen Timer gesteuert durchzuführen. Dadurch ist gewährleistet, dass der Asset Manager eine Information erhält, falls über einen längeren Zeitraum keine Primärinformationen vorliegen. Er erhält dadurch die Möglichkeit, z. B. visuelle Inspektionen in Auftrag zu geben, um eine aktuelle Information über den Zustand des Betriebsmittels zu erhalten. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Berechnung manuell durchzuführen.

4.8 Interpretation einer Gas-in-Öl-Analyse

Die Analyse gelöster und freier Gase (DGA) stellt ein häufig verwendetes diagnostisches Hilfsmittel zur Erkennung und Bewertung von Fehlern ölgefüllter, elektrischer Geräte dar. Allerdings ist die Interpretation der DGA-Ergebnisse häufig kompliziert, weil es keine eindeutige Zuordnung eines nachgewiesenen Gases zu dem ursächlichen Fehler gibt. Das Auftreten eines bestimmten Fehlertyps führt zur Bildung mehrerer Gase. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass der Nachweis eines einzelnen Gases auf eine Auswahl mehrerer Fehlertypen hindeutet. Die Evidenztheorie nach Dempster und Shafer /47/ stellt eine geeignete mathematische Grundlage dar, um den zutreffenden Fehlertyp anhand von DGA-Ergebnissen zu bestimmen. Die Modellierung und Implementierung erfolgt anhand des Leitfadens /40/.

In Kapitel 4.8.1 wird zunächst die Modellierung vorgestellt. Der Zusammenhang zwischen den möglichen Diagnosen wird mit Hilfe eines Markovbaums dargestellt, der zur Berechnung des Glaubensgrads für die einzelnen Fehlertypen dient. Anschließend wird gezeigt, wie die Genauigkeit der DGA-Werte berücksichtigt und die Basis-Gasquotienten auf Massezahlen abgebildet werden können.

Kapitel 4.8.2 stellt die Grundzüge des Simulationsverfahrens vor und gibt die Ergebnisse für reale Daten von drei Leistungstransformatoren an, bei denen unterschiedliche Fehlertypen festgestellt worden sind. Es wird eine Möglichkeit gezeigt, welche Abhilfemaßnahmen aufgrund der festgestellten Diagnose empfohlen werden.

4.8.1 Modellierung

In /40/ werden sechs breite Klassen von Fehlern unterschieden, die in Tabelle 4.1 dargestellt sind.

Tabelle 4.1: Mögliche Typen von Fehlern nach /40/

PD	Teilentladungen
D1	Entladungen niedriger Energie
D2	Entladungen hoher Energie
T1	Thermischer Fehler, $t < 300°C$
T2	Thermischer Fehler, $300°C < t < 700°C$
T3	Thermischer Fehler, $t > 700°C$

Diese sechs charakteristischen Fehler werden im Folgenden als die zu bestimmenden Diagnosen betrachtet. Der qualitative und quantitative Zusammenhang zwischen den Diagnosen und den Basis-Gasquotienten

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \frac{CH_4}{H_2} \text{ und } \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

ist in Tabelle 2 in /40/ angegeben. Zur Erstellung des Markovbaums ist nur der qualitative Zusammenhang zu berücksichtigen, der quantitative Zusammenhang wird bei der Abbildung auf die Massezahlen erfasst. Es werden für jeden Gasquotienten nur diejenigen charakteristischen Fehler berücksichtigt, für die der Gasquotienten signifikant ist. Der Gasquotient C2H4/C2H6 ist signifikant für die Diagnosen PD, D1, D2, T1, T2 und T3, CH4/H2 für PD, D1, D2, T2 und T3 und C2H2/C2H4 für D1, D2, T2 und T3. Daraus ergeben sich unmittelbar die Knoten (PD, D1, D2, T1, T2, T3), (PD, D1, D2, T2, T3) und (D1, D2, T2, T3). Weiterhin wird für jede einzelne Diagnose ein Knoten eingefügt. Die Knoten werden über Kanten wie in Bild 4.24 dargestellt verbunden. Aus den Basis-Gasquotienten werden nach dem in den folgenden Abschnitten vorgestellten Verfahren Massezahlen ermittelt, die an demjenigen Knoten mit Hilfe der Dempster'schen Regel verarbeitet werden, der alle Diagnosen enthält, für die der Gasquotient signifikant ist. In Bild 4.24 ist durch Pfeile dargestellt, an welchen Knoten die aus den Basis-Gasquotienten ermittelten Massezahlen verarbeitet werden.

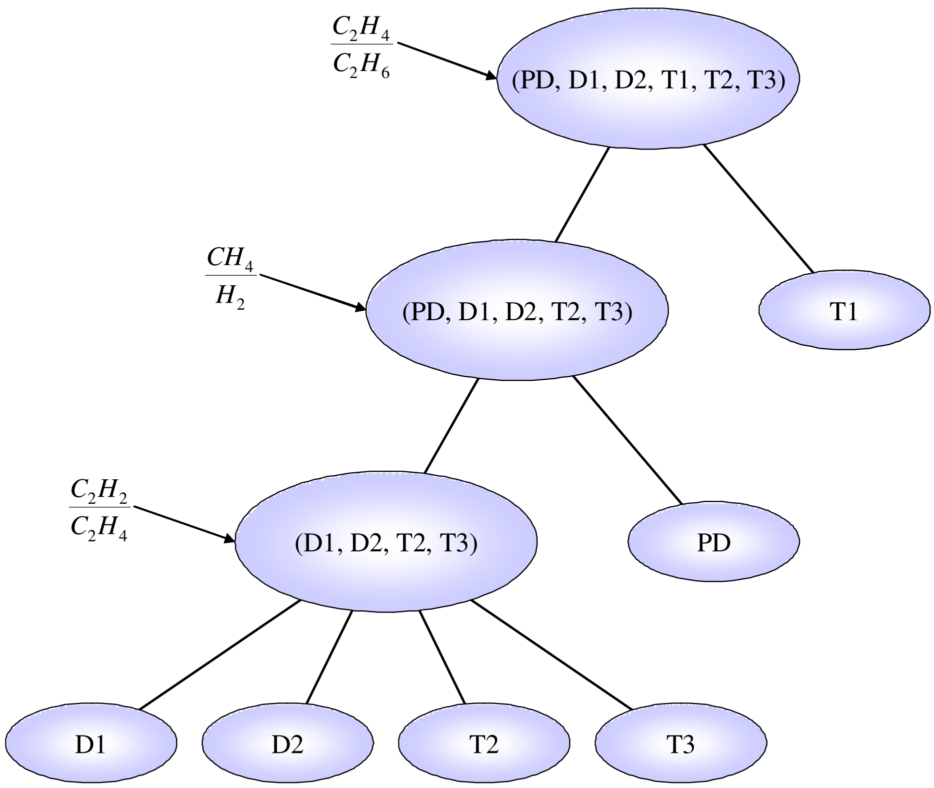

Bild 4.24: Markovbaum zur Gas-in-Öl-Analyse

Die DGA-Ergebnisse sind wie alle Messwerte mit einer Messunsicherheit behaftet. Die Genauigkeit ist abhängig von der Gaskonzentration in der Ölprobe. Typische Werte für die Unsicherheiten bei den Gasquotienten, die sich daraus ergeben, können /40/ entnommen werden und sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Unsicherheit der Gasquotienten

Gaskonzentration	Unsicherheit des Gasquotienten
$>10 \cdot S$	10%
$5 \cdot S$	40%

Dabei bezeichnet S die analytische Nachweisgrenze. Typische Werte für die analytische Nachweisgrenze können /39/ entnommen werden und sind in Tabelle B.2 in Anhang B dokumentiert. Mit Hilfe der Werte in Tabelle 4.2 wird die in Bild 4.25 dargestellte, stückweise lineare Funktion als Modell für die Unsicherheit des Gasquotienten in Abhängigkeit von der Gaskonzentration erstellt. Die Unsicherheit des Gasquotienten wird mit dem Gas ermittelt, das den kleineren Wert von gemessener Konzentration zu Nachweisgrenze aufweist.

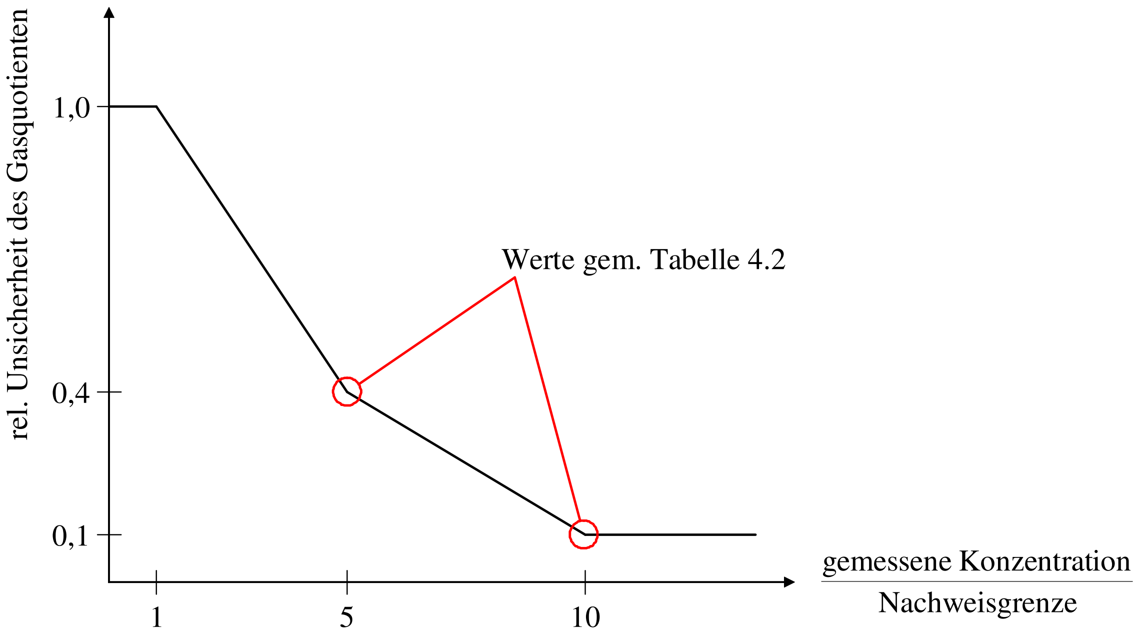

Bild 4.25: Modellierung der Unsicherheit

Durch die Massezahlen wird angegeben, in welchem Maß eine Diagnose durch den Wert des Gasquotienten unterstützt oder abgelehnt wird. Außerdem ist die Modellierung der Unsicherheit des Hinweises möglich. Der Wertebereich der Massezahlen liegt zwischen null und eins, als weitere Randbedingung muss die Summe der Massezahlen eines Hinweises eins ergeben. Das Grundprinzip bei der Abbildung des Wertes eines Gasquotienten auf einen Satz Massezahlen ist in Bild 4.26 dargestellt. Der zur Verfügung stehende Wertebereich wird in drei Teile unterteilt: Der untere, rot dargestellte Teil enthält die Massezahlen, welche die Diagnose unterstützen, der mittlere, weiß dargestellte Teil enthält die Massezahlen für die Unsicherheit und der obere, blau dargestellte Teil enthält die Massezahlen, welche die Diagnose ablehnen. Dabei sind der blaue und der rote Bereich gleich hoch.

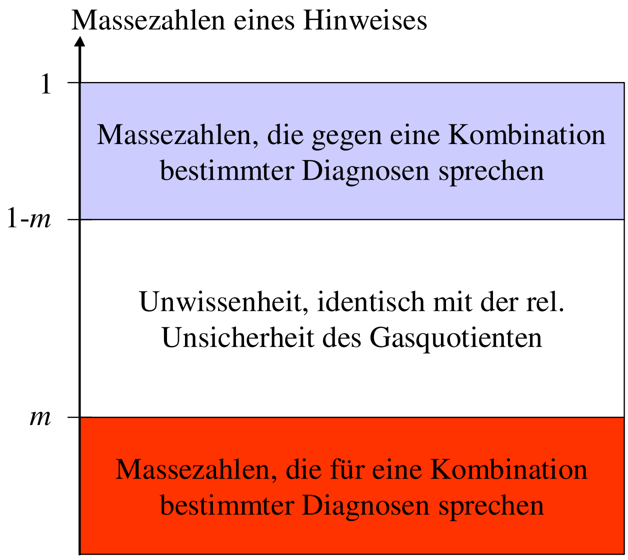

Bild 4.26: Grundprinzip bei der Ermittlung der Massezahlen

Die Massezahl für die Unwissenheit wird im Folgenden mit dem Symbol $m(\Theta)$ bezeichnet. Zur Berechnung von $m(\Theta)$ wird mit dem oben dargestellten Verfahren die Unwissenheit für den Gasquotienten bestimmt. Der so ermittelte Wert wird gleichzeitig als Massezahl $m(\Theta)$ für die Unwissenheit verwendet. Damit kann der Wert m unmittelbar berechnet werden:

$$m = \frac{1 - m(\Theta)}{2} \tag{4.11}$$

In Bild 4.27 ist auf der Abszisse der Wertebereich des Gasquotienten C2H2/C2H4 dargestellt. Alle Diagnosen, für die dieser Gasquotient signifikant ist, sind auf der Ordinate aufgetragen. Der blaue Balken gibt den Bereich des Gasquotienten an, in dem die zugehörige Diagnose entsprechend Tabelle 2 in /40/ unterstützt wird.

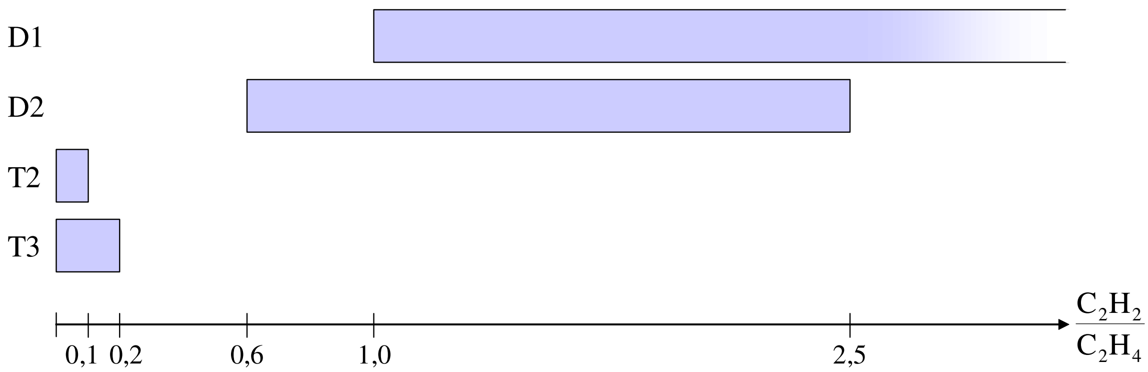

Bild 4.27: Zusammenhang zwischen Diagnosen und Gasquotient C2H2/C2H4 nach /40/

Mit Hilfe von Bild 4.27 lassen sich Intervalle für den Wert des Gasquotienten bestimmen, in denen eine bestimmte Kombination von Diagnosen unterstützt wird. Für den Wertebereich von

$$0 < \frac{C_2H_2}{C_2H_4} < 0{,}1 \tag{4.12}$$

werden die Diagnosen T2 und T3 unterstützt. Innerhalb dieses Intervalls wird eine Massezahl mit dem Wert m nach Gleichung (4.11) für die Exklusiv-Oder-Verknüpfung der zugehörigen Diagnosen T2 und T3 generiert. Anschaulich wird damit die Unterstützung dafür geliefert, dass entweder T2 oder T3 die zutreffende Diagnose ist. Prinzipiell ist auch die Unterstützung für einen Doppelfehler T2 und T3 möglich, in diesem Fall schließen sich die beiden Fehlerklassen definitionsgemäß gegenseitig aus. Für die übrigen Intervalle wird analog verfahren. An den Grenzen x_i der Intervalle in Bild 4.27 wird eine lineare Funktion zwischen

$$0{,}9 \cdot x_i \leq \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \leq 1{,}1 \cdot x_i \tag{4.13}$$

als Übergang angenommen. Bild 4.28 zeigt die graphische Darstellung der resultierenden Massezahlen mit den zugehörigen Kombinationen von Diagnosen in Abhängigkeit vom Wert des Gasquotienten C2H2/C2H4. Die Exklusiv-Oder-Verknüpfung wird durch das Symbol *xor* dargestellt. Das Intervall [0,22; 0,54], das keine Diagnose unterstützt, wird der Unwissenheit zugerechnet.

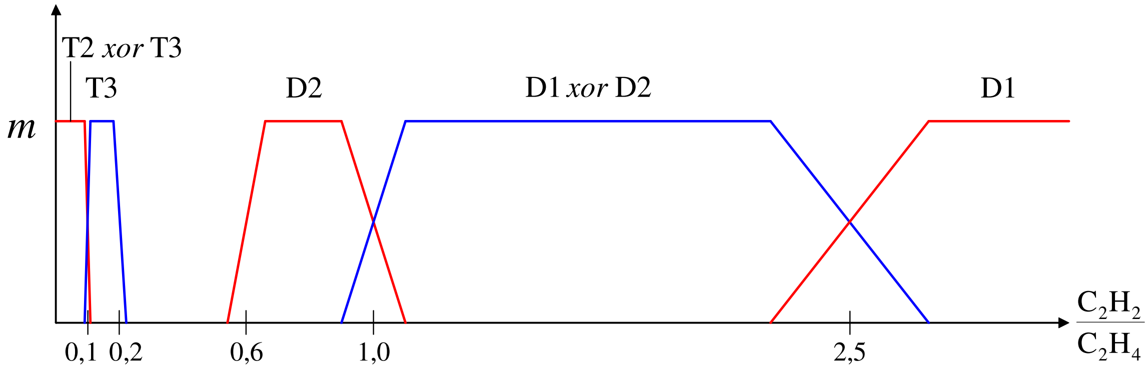

Bild 4.28: Bestimmung der Massezahlen, die für die Diagnosen sprechen

Für alle Intervalle, die nicht den aktuell betrachteten Wert des Gasquotienten enthalten, werden Massezahlen gebildet, welche die zu dem entsprechenden Intervall gehörende Kombination von Diagnosen ablehnen. Die Übergangsbereiche entsprechen Gleichung (4.13) und werden ebenfalls durch lineare Funktionen modelliert. In den Übergangsbereichen wird jeweils eine Massezahl, welche die zugehörige Kombination von Diagnosen unterstützt bzw. ablehnt, generiert. Bild 4.29 zeigt die graphische Darstellung der Massezahlen über dem Wert des Gasquotienten C2H2/C2H4. Für jedes Intervall, das einer Kombination von Diagnosen entspricht, ist ein separater Graph dargestellt, die Abszisse gilt für alle Graphen.

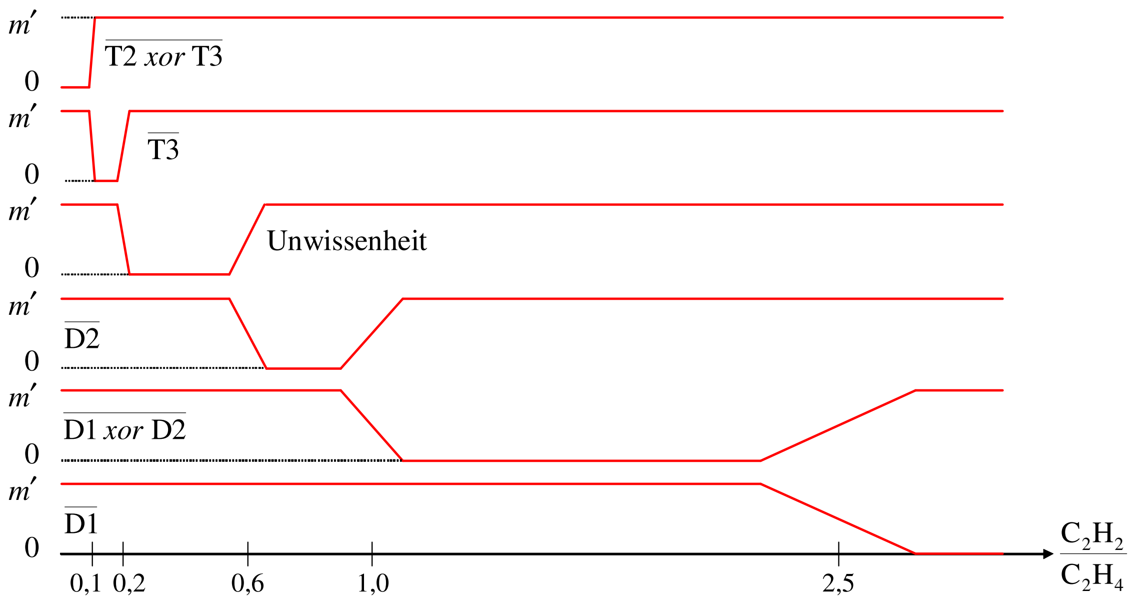

Bild 4.29: Bestimmung der Massezahlen, die gegen die Diagnosen sprechen

Der Wert m' wird folgendermaßen ermittelt: Bezeichnet n die Anzahl der unterschiedlichen Intervalle mit den zugehörigen Kombinationen von Diagnosen, so gilt:

$$m' = \frac{m}{n-1} \tag{4.14}$$

Der Wert m wird dabei nach Gleichung (4.11) berechnet.

Für die Ermittlung der Massezahlen zu den Gasquotienten CH4/H2 und C2H4/C2H6 wird analog verfahren. Zur Dokumentation zeigen Bild 4.30 bis Bild 4.32 die Ergebnisse für CH4/H2 und Bild 4.33 bis Bild 4.35 die Ergebnisse für C2H4/C2H6.

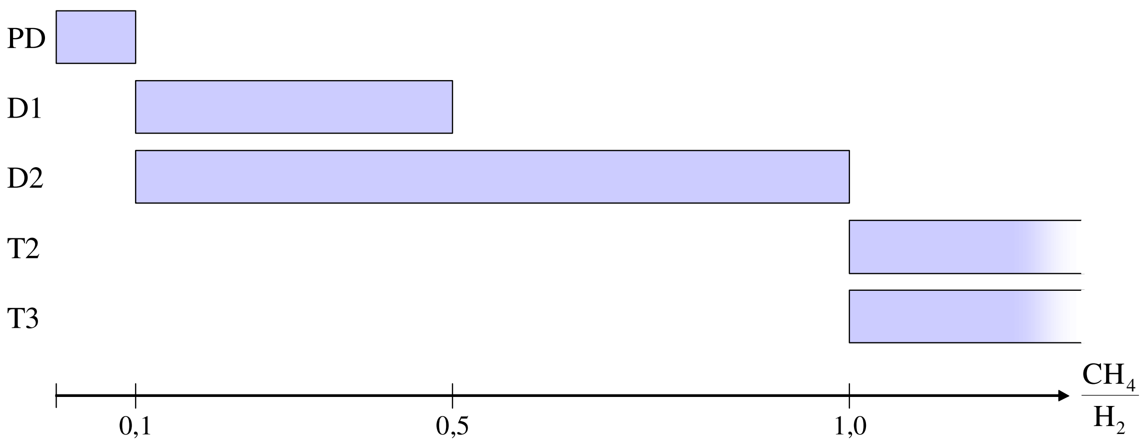

Bild 4.30: Zusammenhang zwischen Diagnose und Gasquotient CH4/H2 nach /40/

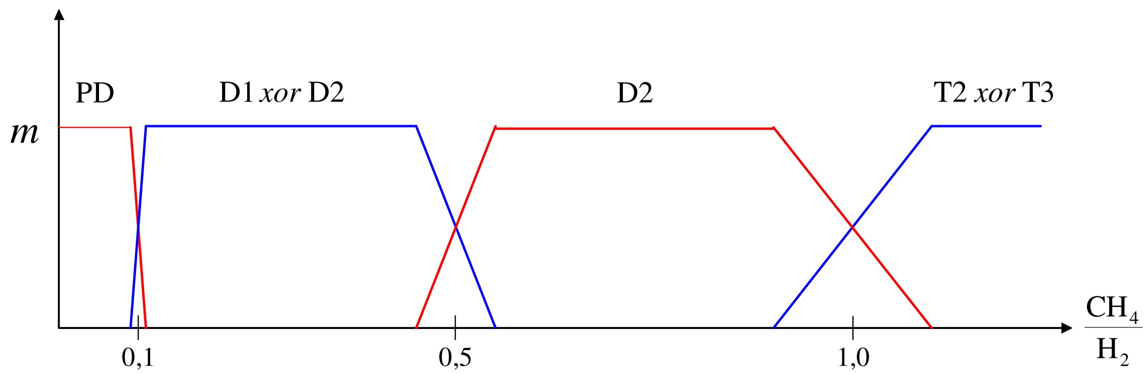

Bild 4.31: Bestimmung der Massezahlen, die für die Diagnosen sprechen

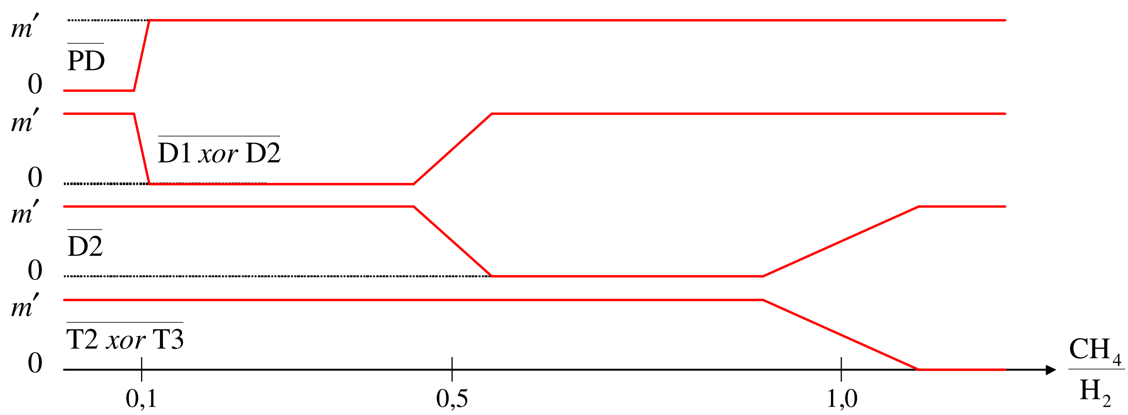

Bild 4.32: Bestimmung der Massezahlen, die gegen die Diagnosen sprechen

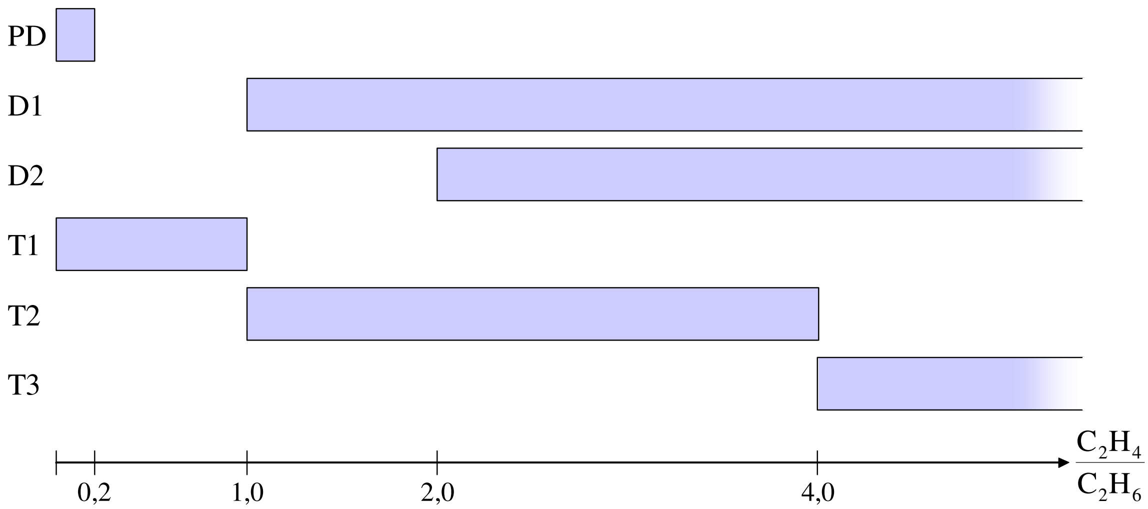

Bild 4.33: Zusammenhang zwischen Diagnose und Gasquotient C2H4/C2H6 nach /40/

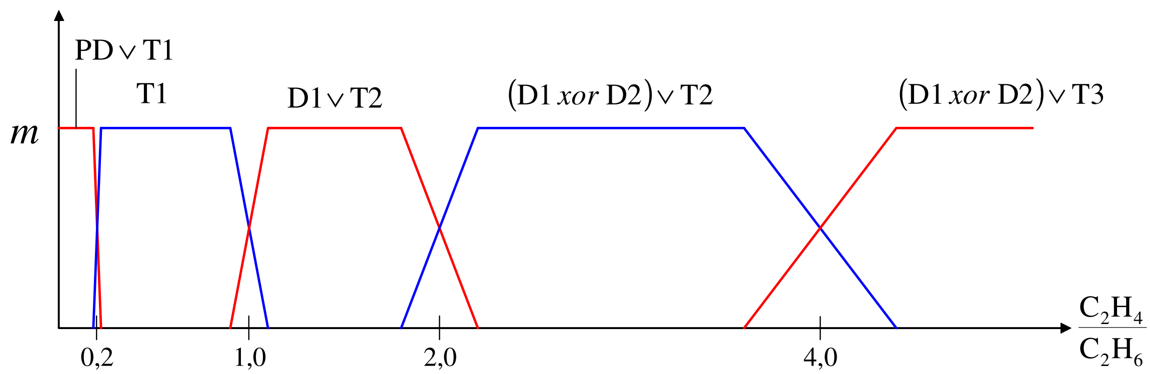

Bild 4.34: Bestimmung der Massezahlen, die für die Diagnosen sprechen

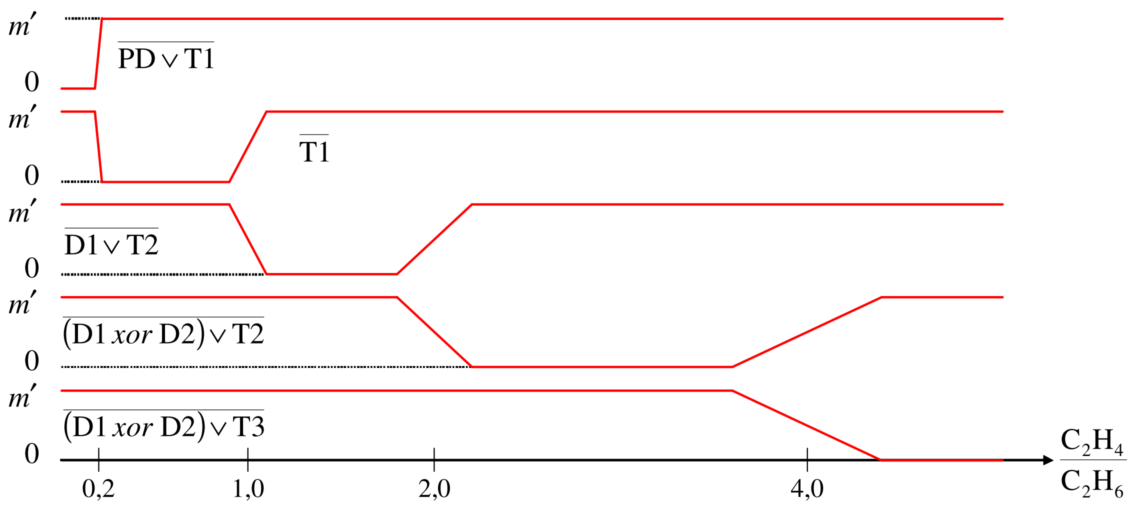

Bild 4.35: Bestimmung der Massezahlen, die gegen die Diagnosen sprechen

4.8.2 Simulationsergebnisse

Als Eingangsdaten stehen DGA-Ergebnisse von drei Leistungstransformatoren aus der Vergangenheit zur Verfügung. Die Trafos weisen jeweils einen typischen Fehler auf, der ebenfalls angegeben ist. Die verwendeten Daten sind in Anhang B dokumentiert.

Bei der Simulation werden nur die Gaskonzentrationswerte berücksichtigt, nicht aber die Gasbildungsraten. Liegen alle Gaskonzentrationswerte unterhalb der typischen Werte, so ist dies nach /40/ als typische DGA und das Betriebsmittel damit als gesund zu werten. Typische Werte für die Gaskonzentration können ebenfalls /40/ entnommen werden und sind in Anhang B dokumentiert. Alle Analysen, die als typische DGA gewertet werden, gehen nicht in die Simulation ein. Liegt die Konzentration von mindestens einem Gas über den typischen Konzentrationswerten, so werden die Basis-Gasquotienten berechnet. Ist die Gaskonzentration eines Gases kleiner oder gleich der analytischen Nachweisgrenze, so wird der Wert des zugehörigen Gasquotienten nicht berücksichtigt. Für jeden Gasquotienten wird dann ein Satz Massezahlen nach dem in Kapitel 4.8.1 vorgestellten Verfahren bestimmt und an dem zugehörigen Knoten des Markovbaums mit der Dempster'schen Regel verarbeitet. Sobald alle Gasquotienten einer DGA verarbeitet sind, werden die Hinweise durch den Markovbaum propagiert, um Glaubens- und Plausibilitätsgrad der einzelnen Diagnosen berechnen zu können. Die Ergebnisse werden für jede Diagnose gespeichert, und es wird mit der nächsten DGA fortgefahren, bis alle DGA abgearbeitet sind.

Die Ergebnisse jeder Diagnose werden in einem Balkendiagramm dargestellt, das für jeden Zeitpunkt einer berücksichtigten DGA einen Balken enthält. Der rote Teil des Balkens ist ein Maß dafür, in welchem Grad die Diagnose unterstützt wird, der blaue Teil ist ein Maß dafür, in welchem Grad die Diagnose abgelehnt wird. Die Unwissenheit oder Unsicherheit wird durch den weißen Teil des Balkens dargestellt. Die zutreffende Diagnose lässt sich durch einen Vergleich der sechs Diagramme der Diagnosen ermitteln.

Das folgende Bild 4.36 zeigt das Ergebnis für Trafo O-02-0040.

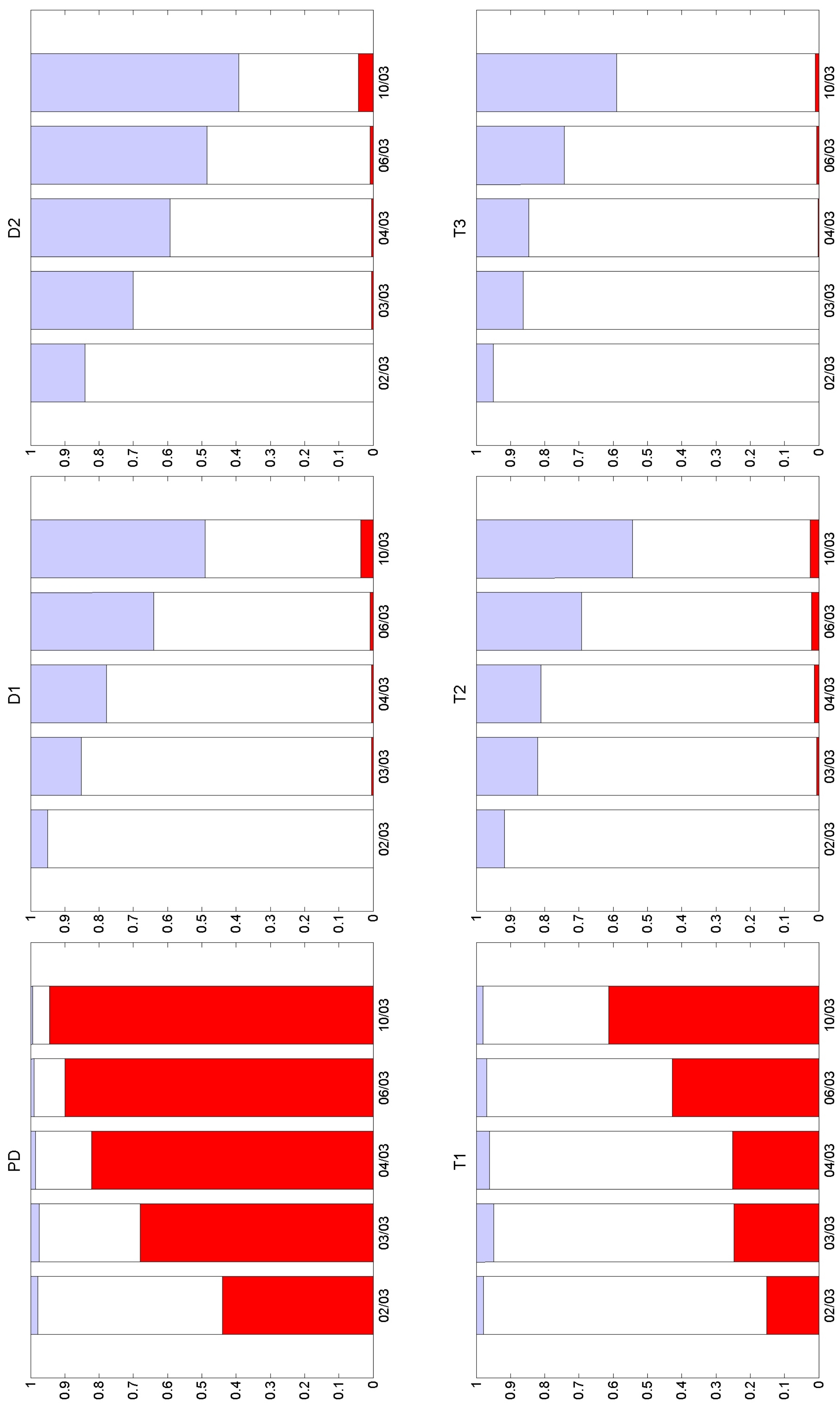

Bild 4.36: Ergebnis für Trafo O-02-0040

Bild 4.36 zeigt jeweils ein Balkendiagramm für die Diagnose PD, D1, D2, T1, T2 und T3. Auf der Abszisse jedes Diagramms ist der Zeitpunkt der DGA in der Form Monat/Jahr aufgetragen, auf der Ordinate ist der Glaubensgrad mit dem Wertebereich zwischen null und eins aufgetragen.

Durch den Vergleich der sechs Diagramme in Bild 4.36 ist deutlich zu sehen, dass die Diagnose PD, Teilentladungen, zutreffend ist, weil sie den größten Glaubensgrad und die geringste Ablehnung aller Diagnosen aufweist. Die so ermittelte Diagnose deckt sich mit der angegebenen Ursache der Gasentwicklung, dass nach einer Ölabsenkung Teilentladungen aufgetreten sind.

Das folgende Bild 4.37 zeigt das Ergebnis für Trafo O-14-0012 in der gleichen Darstellung wie Bild 4.36.

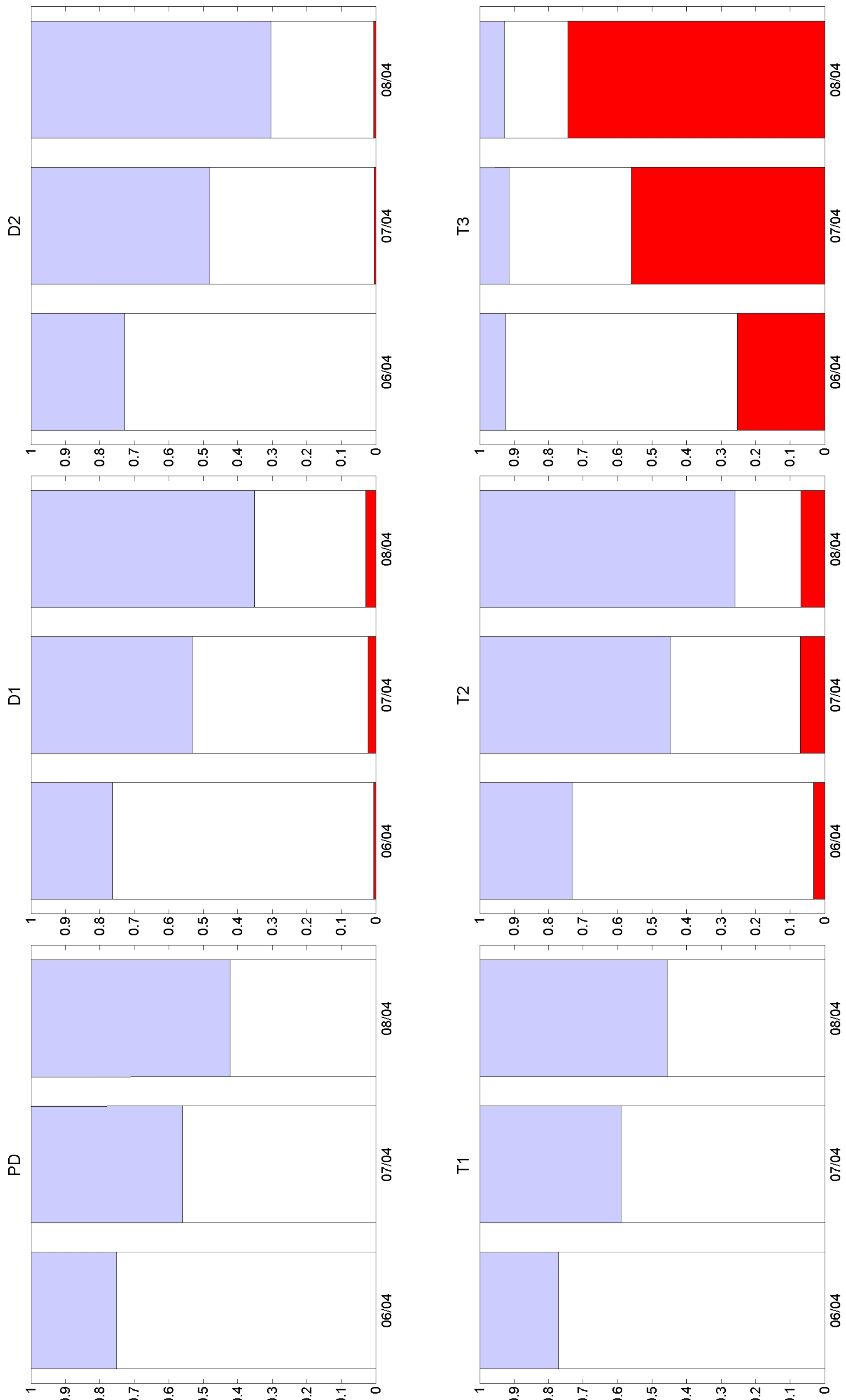

Bild 4.37: Ergebnis für Trafo O-14-0012

Durch den Vergleich der sechs Diagramme in Bild 4.37 ist deutlich zu sehen, dass die Diagnose T3, thermischer Fehler mit $t > 700°\mathrm{C}$, zutreffend ist. Die so ermittelte Diagnose deckt sich mit der angegebenen Ursache der Gasentwicklung, dass eine Heißstelle aufgrund von Ölkohlebildung an den Stufenschalterkontakten aufgetreten ist.

Das folgende Bild 4.38 zeigt das Ergebnis für Trafo O-02-0014 in der gleichen Darstellung wie Bild 4.36.

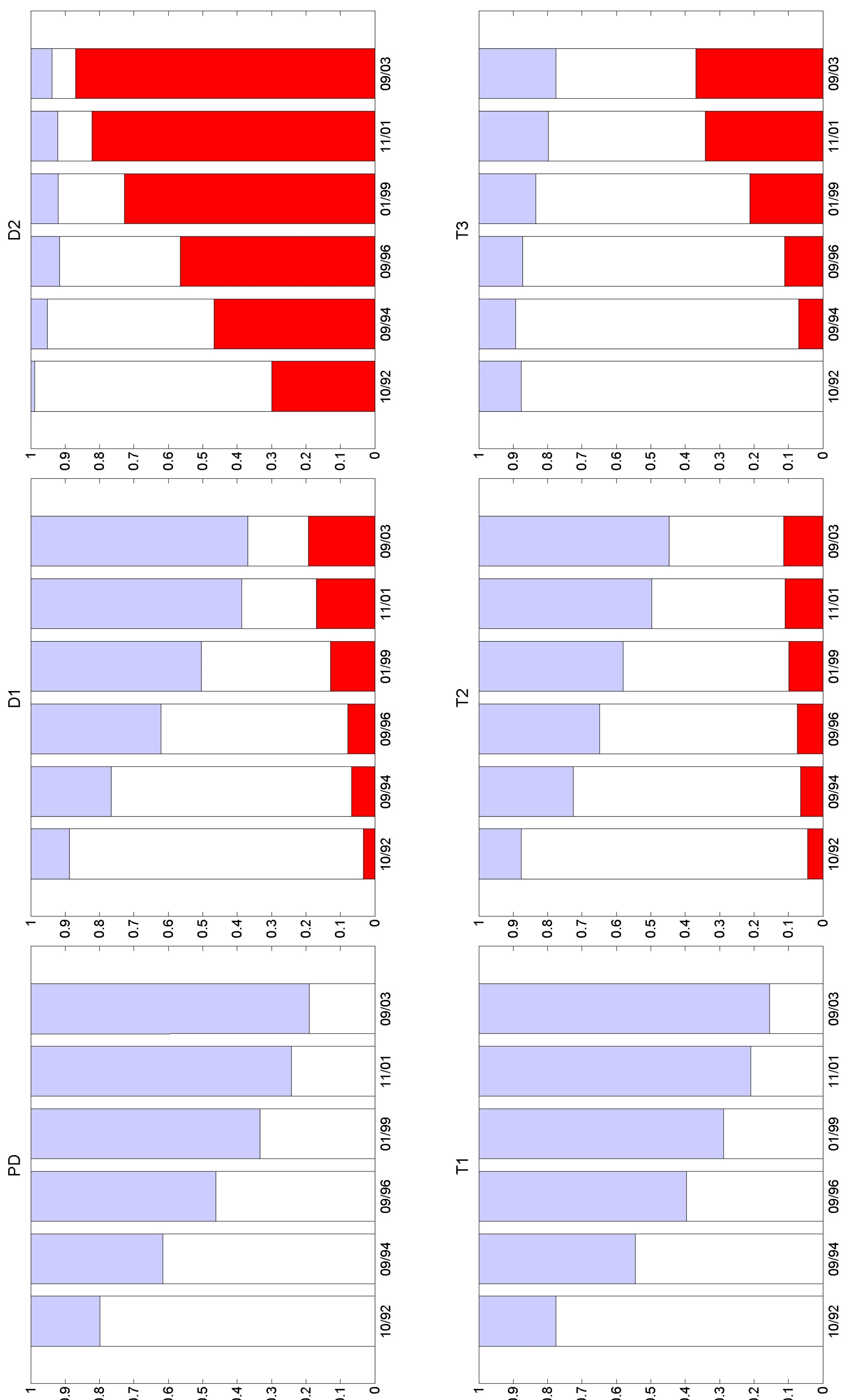

Bild 4.38: Ergebnis für Trafo O-02-0014

Durch den Vergleich der sechs Diagramme ist deutlich zu sehen, dass die Diagnose D2, Entladungen hoher Energie, zutreffend ist, weil der Glaubensgrad für diese Diagnose deutlich größer und gleichzeitig die Ablehnung kleiner ist als für alle anderen Diagnosen. Allerdings deckt sich dies nicht mit der angegebenen Ursache der Gasentwicklung. Nach den Angaben des Betreibers handelt es sich um einen thermisch hoch belasteten Maschinentransformator, bei dem eine Zersetzung der Papierisolierung festzustellen ist. Auf die Papierbeteiligung kann anhand der dominierenden Gase CO2 und CO der letzten acht Analyseergebnisse geschlossen werden. Das Auftreten von Entladungen, wie es durch das Verfahren diagnostiziert wird, kann nicht ausgeschlossen werden, allerdings sind die Entladungen nicht der dominierende Schädigungsmechanismus.

Diese Diagnose kann durch das vorgestellte Modell nicht gestellt werden. Das Verfahren kann anhand der Eingangsdaten ermitteln, in welchem Grad die vorgegebenen und im Markovbaum abgebildeten Diagnosen zutreffen, es liefert allerdings keine Aussagen über darüber hinausgehende Diagnosen. Dieser Fall ist in diesem Beispiel eingetreten, da die Diagnose „Papieralterung“ nicht in den sechs dem Modell zugrunde liegenden Fehlerklassen, die in Tabelle 4.1 angegeben sind, enthalten ist. In Kapitel 4.8.3 werden diese und andere Erweiterungsmöglichkeiten des Modells diskutiert.

Über die Bestimmung der zutreffenden Diagnose hinaus ist es wünschenswert, einen Vorschlag für daraus folgende Abhilfemaßnahmen zu erhalten. In /40/ werden eine Erhöhung der Häufigkeit der Probenahme z. B. auf einen vierteljährlichen oder monatlichen Rhythmus oder das Einleiten von sofortigem Handeln in Form von Online-Monitoring oder der Durchführung einer Inspektion oder Reparatur genannt. Die erforderlichen Maßnahmen können in Abhängigkeit des Glaubensgrades einer Diagnose vorgeschlagen werden. In Bild 4.39 ist auf der Ordinate der Wert des Glaubensgrads dargestellt, daneben befinden sich die den entsprechenden Werten zugeordneten Maßnahmenvorschläge.

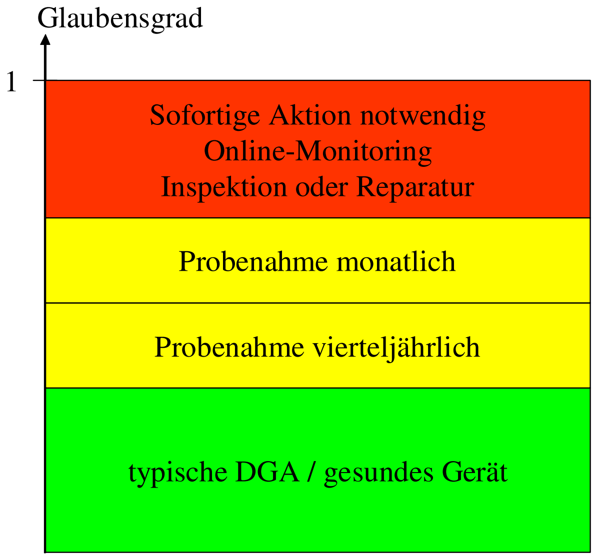

Bild 4.39: Interpretation des Glaubensgrades analog zu /40/

Der grüne Bereich stellt eine typische DGA dar, die auf ein gesundes Betriebsmittel schließen lässt. Der gelbe Bereich stellt einen Warnzustand dar. Dieser Bereich wird entsprechend des Schweregrads der Schädigung in die erforderlichen Maßnahmen vierteljährliche Probenahme und monatliche Probenahme unterteilt. Der rote Bereich stellt einen Alarmzustand dar, der ein sofortiges Handeln notwendig macht. Der Katalog der erforderlichen Maßnahmen umfasst Online-Monitoring, Inspektion oder Reparatur. Die Festlegung der Grenzen der einzelnen Bereiche kann anhand der betrieblichen Erfahrung und Erfordernisse erfolgen. Dabei ist es nicht erforderlich, dass alle Fehlertypen die gleichen Grenzen erhalten. Vielmehr kann jeder einzelnen Diagnose ein eigener Satz von Grenzwerten zugeordnet werden.

4.8.3 Bewertung der Simulationsergebnisse

In diesem Bericht wird ein Verfahren auf der Basis der Evidenztheorie nach Dempster und Shafer vorgestellt, das die Interpretation der Ergebnisse von Gas-in-Öl-Analysen erlaubt. Der qualitative Zusammenhang der möglichen Diagnosen wird mit Hilfe eines Markovbaums dargestellt, der gleichzeitig zur Berechnung der Glaubens- und Plausibilitätsgrade der einzelnen Diagnosen dient. Es wird dargestellt, wie die Basis-Gasquotienten unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Messwerte auf Massezahlen, die Kombinationen von Diagnosen unterstützen oder ablehnen, abgebildet werden. Durch die Simulation mit realen Daten von drei Leistungstransformatoren wird das Verfahren verifiziert. In zwei Fällen wird eine Diagnose gestellt, die mit der Ursache der Gasbildung übereinstimmt. Im dritten Fall liefert das Verfahren das gleiche Ergebnis wie die manuelle Auswertung der Gas-in-Öl-Analyse, jedoch kann die Übereinstimmung mit der vom Betreiber angegebenen Ursache nicht erreicht werden. Es wird aufgezeigt, warum es mit der derzeitigen Modellierung unmöglich ist, die vom Betreiber angegebene Ursache zu diagnostizieren. Abschließend wird ein Verfahren vorgestellt, wie aus den ermittelten Glaubensgraden der Diagnosen Handlungsvorschläge abgeleitet werden können.

Für eine zukünftige Erweiterung und Verbesserung des Verfahrens können folgende Ansätze verfolgt werden. Zunächst können weitere Gasquotienten verwendet werden, um das Spektrum der möglichen Diagnosen zu erweitern. In /40/ werden noch CO2/CO als Anzeichen für eine Papierbeteiligung an einem Fehler, O2/N2 als Anzeichen von Öloxidation und C2H2/H2 als Anzeichen von Kontaminierung des Hauptkessels durch den Stufenschalter genannt. Für die Interpretation sind allerdings spezifische Anlage-Baudetails und die Betriebsart zu berücksichtigen, welche die Werte der Gasquotienten beeinflussen. Darüber hinaus können die Konzentrationen von C_3-Kohlenwasserstoffen berücksichtigt werden. Dazu müssen jedoch Interpretationsmethoden außerhalb von /40/ angewendet werden, da dort die Auffassung vertreten wird, dass auch ohne Berücksichtigung der C_3-Kohlenwasserstoffe in den meisten Fällen eine befriedigende Diagnose erstellt werden kann. Die zweite Möglichkeit stellt die Berücksichtigung der Gasbildungsrate dar. Dazu ist jedoch die Kenntnis des Ölvolumens erforderlich, was nicht immer möglich ist. Außerdem müssen typische Gasbildungsraten bekannt sein, die stark vom Gerätetyp und –alter, der Art des erkannten Fehlers und weiterer Einflussfaktoren abhängen. Als dritte Möglichkeit kann die Abbildung der Gasquotienten auf die Massezahlen verfeinert werden. Derzeit wird abgesehen von den Randbereichen der Intervalle ein konstanter Wert für die Massezahlen unabhängig vom Wert des Gasquotienten angesetzt. Es ist zu untersuchen, ob durch Massezahlen abhängig vom Wert des Gasquotienten Verbesserungen erreicht werden können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Einführung des Wettbewerbs in der Energieversorgung in Europa werden die vertikal integrierten Energieversorgungsunternehmen entflochten und in die Geschäftsbereiche Erzeugung, Übertragung und Verteilung getrennt. Durch die entstandene Konkurrenzsituation, die durch die Einführung des Vergleichsmarktprinzips mit der Verbändevereinbarung 2 Plus noch verstärkt worden ist, sinken die Netznutzungsentgelte, die einen großen Teil der Erlöse der Netzbetreiber darstellen. Aufgrund dieses Kostendrucks sind die Netzbetreiber gezwungen, ihre Investitions- und Betriebskosten zu reduzieren. Die Kosten des Bereichs der Instandhaltung, der zu etwa einem Drittel an den Gesamtkosten der Stromübertragung und -verteilung beteiligt ist, bieten ein hohes Kostensenkungspotential.

Um dieses Kostensenkungspotential auszunutzen, wird bei den Netzbetreibern der elektrischen Energieversorgungsnetze ein Asset Management System eingeführt. Ein wichtiger Aspekt beim Aufbau eines Asset Management Systems ist die organisatorische Trennung von Asset Owner, Asset Management und Service Provider. Zwischen Asset Management und Service Provider herrscht ein Auftraggeber-Auftragnehmer-Verhältnis, das über Dienstleistungsvereinbarungen zu regeln ist. Dies ermöglicht den Vergleich mit externen Dienstleistern, sofern Asset Management und Service Provider organisatorische Einheiten eines Unternehmens sind. Neben der Anlagestrategieentwicklung und dem Anlagengeschäftsmanagement ist die Instandhaltung eine Kernkompetenz des Asset Managements.

Im Bereich des Asset Managements ist die Unterstützung durch Software unverzichtbar. Es existiert ein Strategie-Tool auf Basis der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung, das dem Anwender die Möglichkeit gibt, die wirtschaftlich sinnvollste Instandhaltungsstrategie zu wählen und eine Priorisierung der instand zu haltenden Betriebsmittel durchzuführen. Ein weiteres Tool auf der Basis von Expertensystemen analysiert und bewertet die für den bedarfsgerechten Einsatz zur Verfügung stehenden Mittel und gibt Empfehlungen für den Umfang und Inhalt von Instandhaltungsmaßnahmen. Zur Planung und Koordination von Instandhaltungsmaßnahmen existiert ein System zur integrierten Instandhaltungsplanung, dass mit Hilfe genetischer Algorithmen die Terminierung der notwendigen Maßnahmen unter Beachtung systemspezifischer Randbedingungen und Kriterien nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert. Voraussetzung für die Anwendung ist die Formulierung des Instandhaltungsbedarfs nach Art und Zeit für jedes betrachtete Betriebsmittel, die Basis hierfür ist eine intelligente Abschätzung des Zustands der Betriebsmittel.

Zur Bestimmung des Zustands der Betriebsmittel stehen eine Vielzahl von Eingangsdaten zur Verfügung. Neben Warn- und Störmeldungen werden Protokolle visueller Inspektionen, Ergebnisse von Offline-Prüfverfahren und Messwerte von Online-Überwachungssystemen verwendet. Zur Verarbeitung dieser unterschiedlichen Eingangsdaten wird in dieser Arbeit die Anwendung der Evidenztheorie nach Dempster und Shafer vorgeschlagen, die eine Verallgemeinerung der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie darstellt. Die verschiedenen möglichen Diagnosen werden mit Hilfe von Markovbäumen modelliert. Es wird gezeigt, wie die Maßzahlen der Evidenztheorie, die als Massezahlen bezeichnet werden, in Markovbäumen verarbeitet werden können.

Die Anwendung des Verfahrens wird am Beispiel eines Leistungstransformators dargestellt, der als wertvolles Betriebsmittel mit hohen Investitionskosten über umfangreiche Schutz- und Monitoringsysteme verfügt. Zunächst werden die möglichen Diagnosen und zur Verfügung stehenden Primärinformationen sowie ihr qualitative Zusammenhang dargestellt. Aufgrund des qualitativen Zusammenhangs wird ein Markovbaum als Modell entworfen. Im nächsten Schritt wird der Zusammenhang zwischen Primärinformationen und Diagnosen quantifiziert, indem die Werte der Primärinformationen auf Massezahlen abgebildet werden. Nach der Verarbeitung der Massezahlen im Markovbaum kann die zutreffende Diagnose bestimmt werden. Aus dem Verlauf der Wahrscheinlichkeitsmaße über der Zeit lässt sich das zulässige Instandhaltungsintervall für jede Diagnose bestimmen. Die im Allgemeinen unterschiedlichen Instandhaltungsintervalle der einzelnen Diagnosen werden zu einem resultierenden Instandhaltungsintervall zusammengefasst. Dabei wird davon ausgegangen, dass es am wirtschaftlichsten ist, einzelne Instandhaltungsmaßnahmen zeitlich vorzuziehen und damit Freischaltungen, Demontage- und Montagearbeiten sowie Anfahrten zum Betriebsmittel einzusparen. Eine Erweiterung des Modells berücksichtigt noch zusätzlich, wann die Primärinformationen gewonnen worden sind. Neuere Informationen erhalten ein stärkeres Gewicht als alte. Damit wird es möglich, das Fehlen von Primärinformationen festzustellen und z. B. visuelle Inspektionen zu veranlassen. Den Abschluss bildet die Darstellung des vollständigen Modells eines Leistungstransformators.

Zur Verifikation des Modells wird das Verfahren angewendet, um aus den Ergebnissen der Gas-in-Öl-Analyse von drei Leistungstransformatoren die zutreffende von sechs vorgegebenen Fehlerklassen zu ermitteln. Die Modellierung als Markovbaum und die Vorgehensweise zur Abbildung der Basis-Gasquotienten auf Massezahlen werden angegeben. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass das Verfahren richtig arbeitet und richtige Ergebnisse liefert. Sie zeigen allerdings auch Schwächen des derzeitigen Modells zur Interpretation von DGA-Ergebnissen, die durch zukünftige Erweiterungen behoben werden müssen.

Das entwickelte Verfahren geht insbesondere bei der Ermittlung des zulässigen Instandhaltungsintervalls durch Extrapolation davon aus, dass sich betriebliche Belastung und Umweltbedingungen nicht wesentlich ändern. Weiterhin lassen sich mit dem derzeitigen Modell die Auswirkungen einmaliger schwerwiegender Ereignisse, im Bereich der elektrischen Energieversorgung z. B. Kurzschlüsse oder Blitzschläge, nicht abbilden. Um eine vollständige Zustandsbeschreibung zu erhalten und die richtigen Schlussfolgerungen zu ziehen, ist es notwendig, die genannten Faktoren zu berücksichtigen. Ein interessanter Aspekt, der in der bisherigen betriebsmittelbezogenen Betrachtungsweise nicht berücksichtigt wird, ist die Abhängigkeit der Betriebsmittel innerhalb einer Anlage. Es ist zu untersuchen, welche Abhängigkeiten bestehen und wie sie sich auf Instandhaltungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen auswirken.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist es sinnvoll, die Kosten für die Instandhaltung und eine Ersatzinvestition zu hinterlegen. Damit besteht nicht nur die Möglichkeit, einen Überblick über die voraussichtlichen Kosten der Instandhaltung in einem gegebenen Planungszeitraum zu erhalten, sondern es kann auch eine Entscheidungsunterstützung gegeben werden in der Frage, ob Instandhaltung oder Ersatzinvestition wirtschaftlich sinnvoller ist. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob auf der Basis des dargestellten Verfahrens die Restlebensdauer eines Betriebsmittels abgeschätzt werden kann. Ein weiterer Aspekt ergibt sich aus der aktuell diskutierten risikoorientierten Instandhaltungsstrategie. Die Vorgehensweise bei der Risikobewertung und ihre Einflussgrößen sind noch nicht abschließend geklärt. Es ist zu untersuchen, ob aus der dargestellten Zustandsbeschreibung eine Einflussgröße für die Risikobewertung abgeleitet werden kann.

Das entwickelte generische Verfahren ist auf Entscheidungsprozesse anwendbar. Es liefert insbesondere auch dann plausible Ergebnisse, wenn die zugrunde liegenden Eingangsinformationen widersprüchlich oder unvollständig sind. Damit besteht eine Möglichkeit, das Verfahren auf eine breite Palette von Anwendungsfeldern unterschiedlicher Fachrichtungen zu übertragen. Konkret ist die Weiterentwicklung zur Anwendung in Gas- und Wassernetzen vorstellbar.

6 Literaturverzeichnis

/1/ *A Dictionary of Economics.* John Black. Oxford University Press, 2002. Oxford Reference Online. Oxford University Press. Universitatsbibliothek Dortmund. 14 May 2004 <http://www.oxfordreference.com/views/ENTRY.html?subview=Main&entry=t19.e2948>

/2/ **Anonym:** Risikomanagement per ASP : ABB: Systemorientierte Instandhaltungsstrategie mit Calpos-Main. In: BWK Jg. 53 (2002), Heft 3, S. 24-26

/3/ **Backes, J. ; Schmitt, O. ; Snieders, A. ; Zimmermann, W.:** Zuverlässigkeitsberechnung – ein Verfahren wird praxistauglich. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 97 (1998), Nr. 19, S. 20-36

/4/ **Balzer ; Brandl ; Strnad ; Röhsler ; Schnettler:** Rechnergestützte Wartungsstrategie für Schaltanlagen. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 66. Berlin : VDE-Verlag, 1997. - ISBN 3-8007-2283-6, S. 99-111

/5/ **Balzer, G. ; Brandl, M. ; Schmitt, O. ; Strnad, A.:** Rechnergestützte Instandhaltungsplanung von Betriebsmitteln in der Elektrischen Energieversorgung. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 79. Berlin : VDE-Verlag, 1999. - ISBN 3-8007-2502-9, S. 411-420

/6/ **Balzer, G.:** Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* Jg. 52 (2002), Heft 1/2, S. 74-77

/7/ **Baur, M. ; Mohaupt, P. ; Schlick, T.:** Aktuelle Ergebnisse der VLF Diagnose an Mittelspannungskabeln. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 245-249

/8/ **Beckers, V. ; Engelbertz, K. ; Spitzer, H. ; Edelmann, T.:** Anlagenmanagement im Netzgeschäft : Basis für den Unternehmenserfolg. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 100 (2001), Nr. 23, S. 18-24

/9/ **Bengtsson, C.:** Status and Trends in Transformer Monitoring. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 11 (1996), Nr. 3, S. 1379-1384

/10/ **Brandes, W. ; Gimber, B. ; Balzer, G.:** Diagnose und Instandhaltung von Betriebsmitteln. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 54. Berlin : VDE-Verlag, 1994. - ISBN 3-8007-2032-9, S. 41-57

/11/ **Christian, J. ; Feser, K. ; Sundermann, U.:** Zustandsdiagnose bei mechanischen Wicklungsschäden mit der Übertragungsfunktion. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 229-232

/12/ **Dekker, M. ; Hößle, A.:** Rechnergestützte Instandhaltungsoptimierung. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 82. Berlin : VDE-Verlag, 2000. - ISBN 3-8007-2577-0, S. 177-198

/13/ **Dempster, A. P.:** Upper and lower probabilites induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics* 38 (1967), S. 325-339

/14/ **Detmer, D. ; Zimmermann, G.:** Instandhaltungsmanagement als Erfolgsfaktor. In: *GWF Ausgabe Gas, Erdgas* Jg. 144 (2003), Heft 5, S. 309-311

/15/ **Deutsche Verbundgesellschaft e.V. (Hrsg.):** *Empfehlungen der Verbundunternehmen für Monitoringsysteme an Großtransformatoren*. Heidelberg : Deutsche Verbundgesellschaft e.V., 1998.

/16/ **Erning, P ; Underbrink, A:** Softwareunterstützung bei der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung. In: *etz Elektrotechnik und Automation* Jg. 121 (2000), Nr. 18, S. 16-17

/17/ **Erning, P ; Wiegand, G.:** Beitrag zur Zukunftssicherung : Rechnergestütztes Servicemanagement für Energieversorger. In: *Energie Spektrum* Jg. 14 (1999), Heft 11, S. 16-18

/18/ **Feuchter, B. ; Lauersdorf, M. ; Leibfried, T. ; Schlemper, H.-D.:** Überwachung von Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik : Stand und zukünftige Entwicklungsrichtungen. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 98 (1999), Nr. 13, S. 59-66

/19/ Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung. BGBl I 1998, 730. 24. April 1998

/20/ **Haase, M. ; Hogräfer, J.:** Software bewertet Anlagenteile und stellt Expertenwissen bereit. In: *MM Maschinenmarkt* Jg. 107 (2001), Heft 30/31, S. 22-25

/21/ **Häde, C.:** *Möglichkeiten der Zustandsüberwachung von Transformatoren für die zustandsbezogene Instandhaltung*. Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung, Technischer Bericht, EV-Nr. 9454, 1994.

/22/ **Handschin, E. ; Neumann, U. ; Bretthauer, G. ; Gamaleja, T. ; Hoffmann, W.:** Integrated maintenance scheduling system for electrical energy systems. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 13 (1998), No. 2, S. 655-660

/23/ **Heinrich, R. ; Kalkner, W. ; Plath, R. ; Herrmann, U.:** Vor-Ort-TE-Messung an VPE-isolierten Hochspannungskablen und Garnituren. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 97-100

/24/ **Hoff, G. ; Kranz, H.-G.:** Alterungsbestimmung mit der IRC-Analyse: Ein Verfahren zur zustandsorientierten Prüfung und Wartung VPE-isolierter Mittelspannungskabelnetze. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 251-254

/25/ **Hogräfer, J. ; Höring, B.:** Kostenoptimierte Instandhaltung von Windenergieanlagen. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 102 (2003), Nr. 19, S. 30-33

/26/ **Hogräfer, J.:** Software analysiert und bewertet Anlagenteile und gibt Empfehlungen für Instandhaltungsmaßnahmen. In: *EVU-Betriebspraxis* Bd. 39 (2000), Nr. 12, S. 24-28

/27/ **Küchler, A. ; Breitenbauch, B. ; Zaengl, W. S.:** Zustandsbewertung von Transformator-Isolationen durch dielektrische Diagnose. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 225-228

/28/ **Leibfried, T. ; Feser, K.:** Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 14 (1999), Nr. 4, S. 1333-1341

/29/ **Leibfried, T.:** Monitoring von Leistungstransformatoren – Jetzt auch für kleine und mittlere Baugrößen. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 98 (1999), Nr. 20, S. 37-42

/30/ **Leibfried, T.:** Online-Monitoring von Leistungstransformatoren – Intelligente Zustandsüberwachung. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 97 (1998), Nr. 15, S. 23-30

/31/ **Leibfried, T.:** Zustandsdiagnose des Öl-Papier-Isolationssystems von Leistungstransformatoren mit Hilfe der Relaxationsstromanalyse. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 73-76

/32/ **Linares, P.:** Multiple Criteria Decision Making and Risk Analysis as Risk Management Tools for Power System Planning. In: *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 17 (2002), Nr. 3, S. 895-900

/33/ **Morton, K.:** Asset Management in the Electricity Supply Industrie. In: *Power Engineering Journal* Vol. 13 (1999), Nr. 5, S. 233-240

/34/ **Neumann, U.:** *Integrierte Instandhaltungsplanung*. Nr. 249. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1998 (Fortschrittberichte VDI Reihe 21: Elektrotechnik).-ISBN 3-18324921-9

/35/ **Newi, G.:** Kostenreduzierung durch Überwachungs- und Monitoringstrategien. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 97 (1998), Nr. 25, S. 27-30

/36/ **Nilges, J. ; Gaul, A. J. ; Stürmer, J.:** Die Instandhaltung von Verteilungsnetzen unter Wettbewerbsbedingungen. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 73. Berlin : VDE-Verlag, 1998. - ISBN 3-8007-2391-3, S. 91-100

/37/ **Norm DIN 31051 2003-6.** *Grundlagen der Instandhaltung.*

/38/ **Norm DIN EN 13306 2001-9.** *Begriffe der Instandhaltung : Dreisprachige Fassung EN 13306:2001*

/39/ **Norm DIN EN 60567 (VDE 0370 Teil 9) 1994-6.** *Anleitung für die Probenahme von Gasen und von Öl aus ölgefüllten elektrischen Betriebsmitteln und für die Analyse freier und gelöster Gase.*

/40/ **Norm DIN EN 60599 (VDE 0370 Teil 7) 1999-12.** *In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte : Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase.*

/41/ **Plath, K.-D. ; Plath, R. ; Emanuel, H. ; Kalkner, W.:** Synchrone dreiphasige Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren vor Ort und im Labor. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 69-72

/42/ **Quak, B. ; Gulski, E. ; Smit, J. J. ; Wester, P.:** Fundamental Aspects of Information Processing to Support Asset Management. International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Barcelona, 2003.

/43/ **Röhsler, H. ; Strnad, A.; Rosales, J. I. ; Salamanca, F.:** Experience with systems for condition-based maintenance. In: Cigré, Session 1998, Ref. No. 23-103

/44/ **Schmitt, O. ; Schneider, A.:** Servicekonzepte aus Sicht des Betriebs. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 83. Berlin : VDE-Verlag, 2001. - ISBN 3-8007-2605-X, S. 49-59

/45/ **Shafer, G. ; Shenoy, P.:** *Probability Propagation.* School of Business, University of Kansas, Summerfield Hall, Lawrence, Kansas 66045-2003, USA, January 1989.

/46/ **Shafer, G. ; Shenoy, P. ; Mellouli, K.:** Propagating Belief Functions in Qualitative Markov Trees. In: *International Journal of Approximate Reasoning* Vol. 1 (1987), Nr. 4, S. 349-400

/47/ **Shafer, G.:** *A mathematical theory of evidence*. Princeton University Press. London : Princeton, 1976.

/48/ **Simpson, R. H.:** Power System Data Base Management. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* Vol. 73 (2001), Nr. 1, S. 153-157

/49/ **Spies, M.:** *Unsicheres Wissen : Wahrscheinlichkeit, Fuzzy-Logik, neuronale Netze und menschliches Denken*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 1993.- ISBN 3-86025-006-X

/50/ **Stürmer, J.:** *Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien in Verteilungsnetzen.* Aachen : Shaker Verlag, 2002. – ISBN 3-8322-0311-7

/51/ **Sundermann, U. ; Neumann, C. ; Viereck, C. ; Koch, N.:** Nutzung von Monitoringsystemen für den optimierten Betrieb von Transformatoren. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): *ETG-Fachberichte* Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 87-92

/52/ *The Concise Oxford Dictionary.* Ed. Judy Pearsall. Oxford University Press, 2001. Oxford Reference Online. Oxford University Press. Universitatsbibliothek Dortmund. 14 May 2004 <http://www.oxfordreference.com/views/ENTRY.html?subview=Main&entry=t23.e54268>

/53/ **Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW (Hrsg.):** Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie und über Prinzipien der Netznutzung. Berlin : Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW, 2001.

/54/ **Wittkewitz, J.:** Instandhaltung mit der Software Calpos-Main. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 101 (2002), Nr. 25, S. 22-25

Anhang A: Vollständiges Modell der Kühlanlage

In Kapitel 4.2 wird ein vereinfachtes Modell zur Darstellung der Vorgehensweise, wie die zutreffende Diagnose zu bestimmen ist, verwendet. Das vollständige Modell ist hier angegeben.

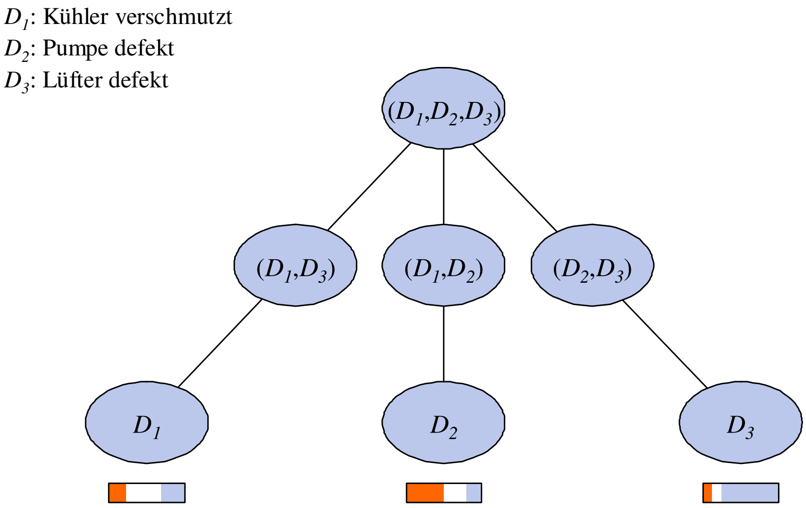

Bild A.1: Vollständiges Modell des Kühlsystems

Anhang B: Verwendete Daten

Im Folgenden sind die Tabellen mit den zugrunde liegenden Eingangsdaten dokumentiert. Sie enthalten das Datum der Analyse, den Gasgehalt und die Konzentration der gelösten Gase Sauerstoff (O2), Kohlendioxid (CO2), Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H2), Methan (CH4), Ethin (C2H2), Ethen (C2H4), Ethan (C2H6), Propen (C3H6) und Propan (C3H8) in µl/l. Die Konzentrationen der C_3-Kohlenwasserstoffe werden in /40/ nicht verwendet. Die Bedeutung der den Zahlenwerten hinterlegten Farben ist in Tabelle B.1 dargestellt. Weiterhin ist für jeden Trafo die festgestellte Ursache der Gasbildung angegeben.

Tabelle B.1: Farbcodes in den Datentabellen

Farbe	Bedeutung
gelb	Konzentration unterhalb oder gleich der Nachweisgrenze
hellgelb	Konzentration unterhalb oder gleich der zehnfachen Nachweisgrenze
hellgrün	Konzentration unterhalb der minimalen typischen Konzentration
grün	Konzentration im Bereich der typischen Konzentration
rot	Konzentration größer als maximale typische Konzentration

Als Werte für die Nachweisgrenzen der einzelnen Gase werden typische Werte für Routine-prüfungen aus /39/ entnommen. Diese sind in Tabelle B.2 dargestellt.

Tabelle B.2: Nachweisgrenzen nach /39/ in µl/l

O2	CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6
50	25	25	5	1	1	1	1

Die Werte für die typischen Konzentrationen sind Abschnitt A.1.4 in /40/ entnommen und in Tabelle B.3 dargestellt.

Tabelle B.3: Bereiche der typischen 90%-Konzentrationswerte nach /40/ in µl/l

CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6
5300 - 12000	400 - 850	75 - 150	35 - 130	80 - 270	110 - 250	50 - 70

Anhang B.1: Trafo O-02-0014

Datum	GASG	O2	CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
01.09.2003	86479	12734	18463	1047	23	18	1	73	16	62	66
06.11.2001	115013	22384	18384	907	34	22	6	91	17	44	51
09.01.1999	93820	17308	14526	825	41	22	3	70	14	0	21
04.09.1996	87380	14719	14474	821	29	14	1	80	19	22	18
05.11.1995	96210	20571	11874	616	10	12	0	62	0	16	13
07.09.1994	86770	17463	12235	664	23	12	1	57	11	0	8
06.09.1993	98520	23131	9462	460	17	7	0	46	9	7	8
06.10.1992	95370	19082	12220	657	25	15	1	37	11	0	4
01.09.1990	78960	19440	6247	5	46	18	13	14	5	0	2
08.05.1990	66940	13270	2925	176	45	8	5	7	2	3	0
09.03.1989	73560	12410	4799	351	38	14	2	11	8	15	6
04.10.1987	82910	17820	4103	310	22	8	3	11	9	15	6
05.02.1987	87500	18280	5131	396	57	10	3	14	12	21	10
05.02.1985	84000	14580	2478	311	35	10	2	10	9	18	9
02.11.1982	82200	13660	1134	215	0	10	0	9	5	10	0
08.12.1981	77340	7800	917	340	0	9	0	4	2	9	5
04.08.1981	72450	16360	374	177	0	5	0	0	0	0	0
05.10.1978	103310	24870	1670	130	61	80	130	70	40	120	90
08.07.1974	68000	12470	160	30	0	0	0	0	0	0	0
06.07.1974	32640	3350	130	50	0	0	0	0	0	0	0

Festgestellte Ursache der Gasbildung: Thermisch hoch belasteter Maschinentrafo

Anhang B.2: Trafo O-02-0040

Datum	GASG	O2	CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
01.01.2004	53573	13499	166	12	12	1	1	1	0	0	0
07.10.2003	71770	19446	1894	250	646	28	3	5	7	2	7
10.06.2003	71667	20400	2195	146	412	21	1	4	5	1	0
07.04.2003	69489	19909	1261	78	363	17	0	1	3	1	3
02.03.2003	79616	21808	1035	79	355	16	1	4	4	1	0
06.02.2003	57370	16551	1057	77	361	14	1	3	4	1	0
06.09.2002	44117	11166	280	16	8	1	1	2	0	1	0
07.12.1999	78920	19852	2146	293	26	6	1	4	2	8	4
10.12.1998	73500	15736	2705	246	54	7	1	9	3	10	3
01.09.1998	78430	19629	2520	288	26	7	1	3	2	7	4
03.09.1996	72650	17443	2789	305	40	6	3	6	2	12	12
08.09.1994	74460	19082	2405	249	23	3	0	3	2	8	3
10.09.1993	87640	22238	2362	275	38	4	0	3	2	8	2
01.10.1991	86560	21250	2782	318	35	8	1	5	5	8	2
05.02.1991	73380	18730	991	133	42	5	5	4	1	7	2
03.01.1991	82470	20300	2564	335	36	9	6	9	3	13	3
08.09.1989	73850	15960	1629	190	55	6	2	7	4	5	0
07.09.1988	86830	19910	3063	353	74	8	8	15	4	30	0
01.09.1986	81860	16160	2697	365	52	6	0	7	2	7	0
06.09.1984	92880	18930	1710	264	36	4	0	6	0	3	0

Festgestellte Ursache der Gasbildung: Teilentladung nach Ölabsenkung

Anhang B.3: Trafo O-14-0012

Datum	GASG	O2	CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
02.08.2004	77798	16485	3103	476	224	1295	115	4296	680	3309	209
06.07.2004	78790	17298	3053	422	206	1360	117	4470	681	3223	199
09.06.2004	85395	20158	2603	399	196	1395	105	4394	692	3296	199
10.08.2002	80233	22763	1933	295	30	10	40	27	5	33	12
05.02.2000	89679	25927	1981	266	20	15	11	26	5	14	3
04.08.1988	98890	31760	1324	127	56	5	12	12	3	5	0
03.07.1986	95110	29690	1647	163	15	4	6	5	0	3	0
06.12.1985	98840	31560	1444	140	18	5	5	6	2	3	0
05.08.1985	100740	26130	973	138	43	8	11	10	4	4	0
08.04.1978	114670	29400	4730	390	16	6	19	20	9	60	20
10.12.1977	100600	26370	3900	640	11	9	24	30	10	80	50
03.09.1976	99140	26600	2460	410	0	10	2	50	20	50	20

Festgestellte Ursache der Gasbildung:

Heißstelle aufgrund von Ölkohlebildung an Stufenschalterkontakten