

Forschungsinstitut der Forschungs-
gemeinschaft für Elektrische
Anlagen und Stromwirtschaft
e.V

11728 N / III

Name der Forschungsstelle(n)

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

1.10.1998 bis 31.3.2001

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 01.10.1998 bis 31.3.2001

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema :

**Instandhaltungs- und Abnutzungsmodell für
Hochspannungs-Leistungsschalter**

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|----------|---|
| 1 | Forschungsthema 3 |
| 2 | Zusammenfassung..... 3 |
| 3 | Forschungsinhalt 4 |
| 3.1 | Wissenschaftliche Problemstellung 4 |
| 3.2 | Forschungsziel und Lösungsweg 7 |
| 4 | Diskussion vorhandener Instandhaltungs- und Zustandsmodelle 12 |
| 4.1 | Empirische Modelle 12 |
| 4.2 | Analytische Modelle 16 |
| 4.3 | Probabilistisches Modell 20 |
| 5 | Arbeitsschritte zur Entwicklung des Zustandsmodells 24 |
| 5.1 | Auswahl geeigneter Schaltertypen 24 |
| 5.2 | Zuordnung betrieblicher Belastungen..... 26 |
| 5.3 | Sichtung und Klassifikation vorliegender Instandhaltungsdaten 29 |
| 5.3.1 | Allgemeines 29 |
| 5.3.2 | Ergebnisse von Sichtkontrollen, Revisionen und Diagnosen 30 |
| 5.3.3 | Meldungen von Überwachungseinrichtungen..... 32 |
| 5.3.4 | Ermittlung der statistischen Verteilung der Instandsetzungen 32 |
| 5.4 | Modellbildung 36 |
| 5.4.1 | Evidenztheorie 36 |
| 5.4.2 | Anpassung an die Aufgabenstellung 38 |
| 5.4.3 | Wahl der Funktionseinheiten und Informationsquellen 41 |
| 5.4.4 | Wahl der Startwerte und Parameter 44 |
| 6 | Anwendung des Zustandsmodells 48 |
| 6.1 | Statistiken zur Beschreibung des Instandsetzungsbedarfes..... 48 |
| 6.1.1 | Ölarmer Leistungsschalter Siemens H800/H801(E) 48 |
| 6.1.2 | SF ₆ -gefüllter Leistungsschalter Concordia/Sprecher HGF111/112 56 |
| 6.2 | Ermittlung einer zustandsbeschreibenden Kennziffer 57 |
| 6.2.1 | Betrachtung nur des Glaubensgrades für Instandsetzungsbedarf 57 |
| 6.2.2 | Betrachtung des Glaubens- und Plausibilitätsgrades für Instandsetzungsbedarf 64 |
| 6.2.3 | Verifikation der Aussagekraft der Zustandszahl 68 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.3 | Benutzung der Zustandszahl zur Erstellung des Instandhaltungsplans | 74 |
| 6.3.1 | Ermittlung von Revisionszeiten | 74 |
| 6.3.2 | Ermittlung von Zeiten für Begehungen | 77 |
| 7 | Diskussion und Ausblick..... | 79 |
| 8 | Literatur | 83 |

1 **Forschungsthema**

Instandhaltungs- und Abnutzungsmodell für Hochspannungs-Leistungsschalter

2 **Zusammenfassung**

Im nachfolgend beschriebenen AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11728, gefördert aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) wurde ein Instandhaltungs- und Abnutzungsmodell für einen Typ eines 123-kV-Leistungsschalters entwickelt, das prinzipiell auf weitere Typen übertragbar ist, wenn eine ausreichende Instandhaltungsdokumentation für vergleichbare Schalter vorliegt.

Nach der Auswahl eines geeigneten Schaltertyps wurden in enger Zusammenarbeit mit am Projekt beteiligten Netzbetreibern Listen mit den dort vorliegenden Instandhaltungsdaten erstellt. Hier waren insbesondere die Zuordnung von Terminen und Inhalten zu den an den einzelnen Schaltern durchgeführten Revisionen und Instandsetzungen von Bedeutung für die spätere Modellbildung und Simulation. Die Instandsetzungsvorgänge wurden hinsichtlich ihrer Ursache, ihrer Bedeutung und Notwendigkeit, sowie ihrer Zugehörigkeit zu einer der im Modell definierten Funktionseinheiten klassifiziert. Hieraus wurden statistische Angaben zu der vom Betriebsalter abhängigen Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf abgeleitet. Für einen zweiten ausgewählten Typ eines Hochspannungsschalters scheiterte dies aufgrund des insgesamt geringeren Instandsetzungsbedarfs und des zu kleinen bei den Betreibern vorhandenen Kollektivs.

Nach intensiver Studie der in der Literatur vorhandenen Instandhaltungs- und Zustandsmodelle wurde entschieden, ein probabilistisches Modell auf Basis der Evidenztheorie, einer Verallgemeinerung der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie, zu entwickeln. Die mathematische Ausführung wurde hierzu den Besonderheiten der Aufgabenstellung angepasst. Startwerte und Parameter des Modells wurden aus den vorliegenden Daten ermittelt bzw. aufgrund von Erfahrungswerten gewählt.

Auch wenn von dem ursprünglichen Vorhaben, voneinander unabhängige Kriterien aus der betrieblichen Belastung für die Abnutzung des Leistungsschalters zu ermitteln, wegen nicht ausreichender Daten bzw. nicht nachweisbaren Wirkungen Abstand genommen werden musste, konnte auf Basis der erstellten Statistiken des Instandsetzungsbedarfs dennoch ein Modell entwickelt werden, das eine Zustandsgröße beschreibt, mit deren Hilfe eine Prioritätenliste für durchzuführende Instandhaltungsmaßnahmen erstellt werden kann.

Das Modell, das eine einfache Erweiterung um beliebige weitere, in Zukunft vorliegende Informationsquellen erlaubt, wurde anhand umfangreicher Simulationsrechnungen überprüft. Der Vergleich mit den vorliegenden Instandsetzungshistorien belegte die Aussagekraft der ermittelten Zustandsgröße.

Anforderungen an Inhalte und Beschaffenheit zukünftiger Instandhaltungsdatenbanken für verbesserte Zustandsbeschreibungen der einzelnen Schalter wurden zusammengetragen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

3 **Forschungsinhalt**

3.1 Wissenschaftliche Problemstellung

An Betriebsmitteln in elektrischen Energieversorgungsnetzen müssen rechtzeitig angemessene Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, um die Wahrscheinlichkeit für ihre Funktionsfähigkeit über die gesamte erwartete bzw. angestrebte Lebensdauer auf ausreichend hohem Niveau zu halten. Die Bedeutung, die der Instandhaltung zukommt, ist aus zweierlei Gründen gestiegen:

- Bei der Energienachfrage ist eine Sättigung eingetreten. Der verringerte Bedarfszuwachs führt dazu, dass die Anlagen heute weitgehend das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreichen, ohne vorher durch Neubau leistungstärkerer Einheiten ersetzt zu werden, wie dies in Zeiten hoher jährlicher Zuwachsraten erforderlich war [1].
- Durch den eingeführten Wettbewerb in der Elektrizitätswirtschaft ist die Ausschöpfung bestehender Kostensenkungspotentiale mehr denn je in den Vordergrund gerückt. Hierzu gehört es, installierte Betriebsmittel hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Lebensdauer optimal zu nutzen, dabei jedoch die Kosten für die Instandhaltung und Ersatzinvestition zu minimieren.

Abhängig von den Kriterien zur Erkennung der Notwendigkeit einer Instandhaltung kann man drei Strategien unterscheiden:

- Bei der ereignisorientierten Instandhaltungsstrategie werden Instandhaltungsmaßnahmen nur im Fehlerfall durchgeführt.
- Bei der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie bestimmt der technische Zustand des Betriebsmittels den Wartungszyklus.
- Bei der periodischen Instandhaltungsstrategie geht man von festgelegten Wartungszyklen und dem Austausch des Betriebsmittels nach einer bestimmten Nutzungsdauer aus.

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachteten Hochspannungs-Leistungsschalter kommt die ereignisorientierte Instandhaltung nicht in Frage. Statt dessen ist die periodische Instandhaltung weit verbreitet, wobei die Wartungszyklen durch Erfahrungswerte und die Unternehmensphilosophie bestimmt werden. Mit dieser Vorgehensweise wird i.a. ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt, das jedoch nicht in jedem Fall die wirtschaftlichste Lösung darstellt. So führt zu häufige Wartung zu erhöhten Wartungskosten, zu seltene Wartung dagegen zu erhöhten Kosten für Reparatur oder vorzeitige Ersatzinvestition [2]. Zudem gefährdet sie unter Umständen die Zuverlässigkeit des Betriebsmittels oder die Anlagensicherheit.

Man bemüht sich daher heute, vermehrt Elemente der zustandsorientierten Instandhaltung einzubringen [3,4,5]. Abhängig vom aktuellen Zustand des zu wartenden Betriebsmittels soll die zeitliche Abfolge der Inspektionen verlängert oder, falls erforderlich, verkürzt werden. In Bild 3.1 ist die für eine zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie idealerweise notwendige vollständige Kette von der Erfassung der relevanten Daten bis zum fertigen Instandhaltungsplan dargestellt.

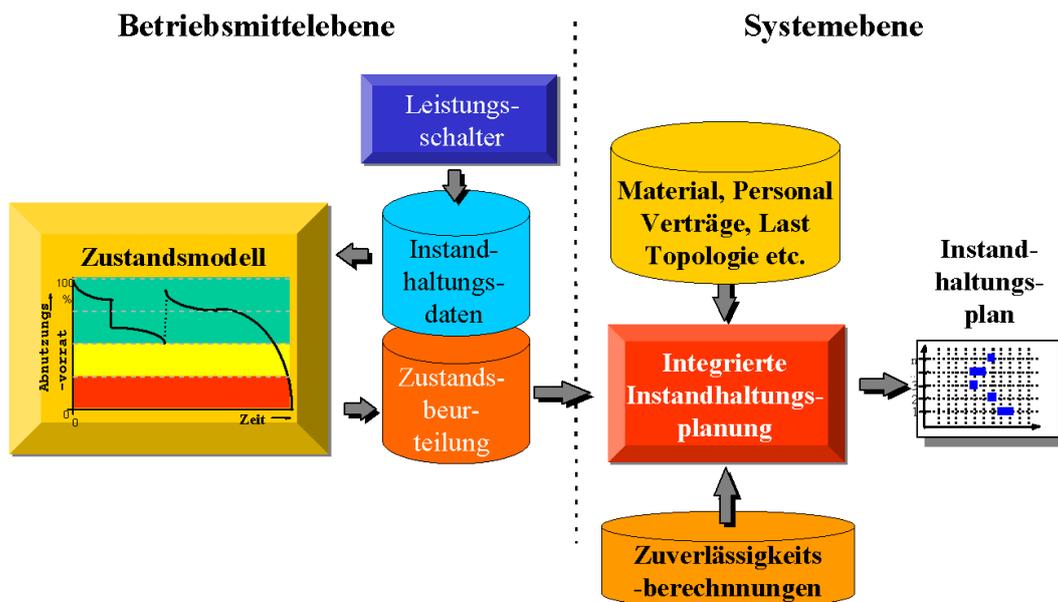


Bild 3.1 Informationsfluss und -verarbeitung bei einem integrierten Instandhaltungsmanagement

An ihrem Beginn steht eine Instandhaltungsdatenbank, in der alle instandhaltungsrelevanten Daten jedes individuellen Betriebsmittels hinterlegt werden. Diese sind die Eingangsgrößen für das noch fehlende Glied des Instandhaltungsmodells, das daraus eine Zustandsbeschreibung des individuellen Betriebsmittels erstellt. Den Abschluss bildet ein Instrument zur Instandhaltungs koordinierung, das durch die Verknüpfung der bereitgestellten Informationen verschiedene Aufgaben integriert und den Instandhaltungsplan erstellt. Unter dem Begriff „integrierter Instandhaltung“ werden somit drei Komponenten in die Instandhaltungsplanung einbezogen:

1. Die Bedeutung des Betriebsmittels (systembezogen)

Ein geeignetes Maß für die Feststellung der Bedeutung eines individuellen Betriebsmittels für das System „Netz“ stellen Kenngrößen aus Zuverlässigkeitsberechnungen dar. Aussagen über die zu erwartende Unterbrechungshäufigkeit (Anzahl der Unterbrechungen pro Jahr) und die Nichtverfügbarkeit (Wahrscheinlichkeit, zu einem Zeitpunkt eine Unterbrechung vorzufinden) für alle im Netz befindlichen Lastknoten, erlauben es, Rückschlüsse auf die Bedeutung einzelner Betriebsmittel zu ziehen. Geeignete Werkzeuge für die Bestimmung dieser objektiven Größen sind bei der FGH vorhanden [6].

2. Die Rahmenbedingungen (systembezogen)

Hierzu gehören vertragliche Bindungen, wie z.B. die vom Netzbetreiber zugesicherte Lieferung oder Abnahme elektrischer Leistung zu bestimmten Zeiten, sowie die Verfügbarkeit von Personal und Material für die geplanten Instandhaltungsaktivitäten. Ferner können sich zeitliche Begrenzungen für die Ausführung notwendiger Arbeiten auch durch den prognostizierten Lastgang in einem Bereich des Netzes ergeben, wenn das Betriebsmittel für die Instandhaltungsarbeiten aus dem Netzbetrieb genommen werden muss.

3. Die Zustandsbeschreibung des individuellen Betriebsmittels (betriebsmittelbezogen)

Hiermit erfolgt die oben erwähnte Einbringung zustandsorientierter Elemente in die Instandhaltungsplanung. Der Zugriff auf Betriebsmittelstatistiken allein ist hier nicht ausreichend, da sich in den Störungsstatistiken die Auswirkungen der Instandhaltungsstrategien der Vergangenheit widerspiegeln, was unter Umständen zu einem falschen Bild der Störungswahrscheinlichkeiten führt. Ferner ist es unerlässlich, Ergebnisse von Revisionen oder Sichtkontrollen und, wenn dokumentiert, auch außerordentliche betriebliche Belastungen anzurechnen. Auch moderne Möglichkeiten der Zustandsüberwachung können wichtige Hinweise liefern.

Die Eingangsdaten des Modells müssen in einer Instandhaltungsdatenbank niedergelegt sein, siehe Bild 3.1. Aufgabe des Zustandsmodells ist es, aus den dort zu findenden Informationen die einzelnen Hinweise auf den Betriebsmittelzustand herauszufiltern und in geeigneter Form zu quantifizieren. Da die Eingangsdaten nicht zeitlich kontinuierlich eintreffen bzw. vorliegen, ist eine Prognose der Zustandsentwicklung ausgehend von einem dokumentierten Zustand erforderlich, um den Zustand zu einem bestimmten, späteren Zeitpunkt zu beschreiben. Wenn äußere Eingriffe erfolgen oder außerordentliche Belastungen für das individuelle Betriebsmittel eintreten, so ist dies gegebenenfalls als korrigierende Größe zu berücksichtigen. Auf diese Zustandsprognose aufbauend soll eine vergleichende Bewertung der Zustände aller im Netz betriebenen Anlagen und Geräte erstellt werden.

Das Tool „Integrierte Instandhaltungsplanung“ geht auf eine Dissertation [7] zurück und wurde in einem vorangegangenen, ebenfalls von der AiF geförderten Forschungsvorhaben [8] bei der FGH in Zusammenarbeit mit der Universität Dortmund weiterentwickelt

Während also bereits an einigen Bausteinen des Gesamtsystems nach Bild 3.1 gearbeitet wird bzw. teilweise bereits verwertbare Ergebnisse vorliegen, fehlt ein geeignetes Instandhaltungsmodell, das objektiv erfassbare Kriterien benutzt, um den Instandhaltungsbedarf des einzelnen Betriebsmittels zu ermitteln. Die Dringlichkeit eines Instandhaltungsmodells ergibt sich nicht allein daraus, dass es die Voraussetzung für eine Zustandsbeschreibung der individuellen Betriebsmittel und damit für die betriebsmittelbezogene Instandhaltungsprioritätenliste ist. Vor allem stellt sich in der derzeitigen Phase des Aufbaus von Instandhaltungsdatenbanken bei den Netzbetreibern die Frage, welche Daten instandhaltungsrelevant sind und im Modell Berücksichtigung finden müssen.

3.2 Forschungsziel und Lösungsweg

Ziel des beschriebenen Forschungsvorhabens war es, exemplarisch, für einen zu bestimmenden Typ eines Hochspannungs-Leistungsschalters, ein Instandhaltungs- und Abnutzungsmodell zu erstellen. Dieses Modell soll die Abnutzung spezifiziert beschreiben und auch die Änderung des Zustands durch Instandsetzungsmaßnahmen einbeziehen. Das mathematische Modell soll in eine Simulationssoftware umsetzbar sein, die es erlaubt, Auswirkungen verschiedener Instandhaltungsstrategien auf die Zustandsentwicklung zu simulieren. Dabei stand nicht die Bewertung dieser Strategien oder gar die Entwicklung einer idealen Instandhaltungsstrategie im Vordergrund. Hierzu waren im Rahmen dieses Forschungsvorhabens keine Aussagen angestrebt, da diese sich aufgrund der systemtechnischen Randbedingungen von Betreiber zu Betreiber unterscheiden würden. Vielmehr sollte hiermit das Modell verifiziert werden, indem prognostizierte und real vorgefundene Zustände existierender Leistungsschalter verglichen werden.

Die Beschränkung des Modells auf Hochspannungs-Leistungsschalter eines gleichen Typs erschien uns im Rahmen dieses Forschungsvorhabens notwendig, da davon ausgegangen werden muss, dass die Ausprägung des Modells von der jeweiligen Konstruktion des Schalters abhängig ist. Dieses generelle Problem erschwert die Erstellung von Instandhaltungs- und Abnutzungsmodellen für alle Betriebsmittel eines elektrischen Energieversorgungsnetzes. Das Ziel des Forschungsvorhabens beschränkte sich aus diesem Grund nicht auf die Erstellung des Modells. Vielmehr sollten Erfahrungen über die Methodiken gesammelt werden, mit denen in Zukunft mit vertretbarem Aufwand Modelle für weitere Betriebsmittel gewonnen und fortlaufend gepflegt werden können.

An das Instandhaltungs- und Abnutzungsmodell wurden zu Beginn des Vorhabens folgende Anforderungen gestellt:

- Zustandsbeschreibung

Das Modell soll den Zustand des Leistungsschalters eindeutig, d.h. quantitativ beschreiben. Hierzu soll die Abnutzung differenziert, d.h. für unterschiedliche Funktionen bzw. Funktionseinheiten getrennt, wiedergegeben werden. Der Ermittlung der Abnutzungskriterien für diese Funktionseinheiten wurde hierfür besondere Bedeutung beigemessen, weil sie als bestimmende Parameter beim Aufbau der Instandhaltungsdatenbanken als zu erfassende Größen einzuplanen sind. Die Zustandsbeschreibung setzt sich dann aus verschiedenen Säulen zusammen, von denen jede für sich getrennt beschrieben werden kann und weitgehend unabhängig von den jeweils anderen ist.

Die Fehlerwahrscheinlichkeit steigt mit zunehmender Abnutzung, wobei sie sich entsprechend der Zustandsbeschreibung aus den den einzelnen Abnutzungskriterien zugeordneten Fehlerwahrscheinlichkeiten zusammensetzt.

- Inspektionen

Das zu entwickelnde Modell soll unterschiedliche Formen der Inspektionen einbeziehen können. So kann sich eine Inspektion unter Umständen nur auf einen Teilbereich des Schalters, z.B. den mechanischen Antrieb beschränken. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Inspektionen wird erst durch die differenzierte Zustandsbeschreibung sinnvoll, da erst hierdurch der Zustand einzelner Einheiten spezifiziert festgestellt werden kann.

- Instandsetzungsmaßnahmen

Auch bei den Instandsetzungsmaßnahmen sollen im Modell, ausgehend von der differenzierten Zustandsbeschreibung, unterschiedliche, d.h. ebenso differenzierte Formen der Instandsetzung unterschieden werden. Die Änderung des Betriebsmittelzustands, d.h. der einzelnen Säulen der Zustandsbeschreibung soll abgestuft abhängig von der durchgeführten Instandsetzungsmaßnahme durchgeführt werden.

Auf die ursprünglich vorgesehene Einbeziehung von Zeitdauern und Kosten von unterschiedlichen Inspektionen und Instandsetzungsmaßnahmen wurde verzichtet, da – wie oben bereits ausgeführt – ein Vergleich unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien in diesem Projekt ohnehin keine allgemein gültigen Aussagen geliefert hätte und somit die Aussagen hierzu wertlos gewesen wären.

Um die genannten Forschungsziele zu erreichen, war eine enge und intensive Zusammenarbeit mit Netzbetreibern unerlässlich. Die nachfolgend beschriebenen Informationen wurden durch sorgfältige Auswertung der Arbeitsberichte der Instandhaltungsabteilungen sowie der vorhandenen Störungs- und Schadensberichte gewonnen werden. Weitere Informationen konnten durch Gespräche mit den Personen gewonnen werden, die bei den Netzbetreibern für die Instandhaltung der Schaltgeräte im Hochspannungsnetz verantwortlich sind. Als interessierte Netzbetreiber konnten für die Zusammenarbeit für dieses Forschungsvorhaben neben der damaligen VEW Energie AG (heute RWE Net AG) die damalige PreussenElektra Netz (heute e.on Netz GmbH) als Partner gewonnen werden.

Zur Verifikation des Modells wurde die fortschreitende Zustandsentwicklung des Betriebsmittels als Folge der angewandten Instandhaltungsstrategie, d.h. unter Berücksichtigung der tatsächlich durchgeführten Revisionen und Instandsetzungen, und der ermittelbaren betrieblichen Belastungen auf dem Rechner simuliert und die Ergebnisse mit den tatsächlich bei den Betreibern vorliegenden Erfahrungen, im wesentlichen aus dem Instandsetzungsgeschehen ermittelt, verglichen. Wegen der Komplexität des Modells war es notwendig, das Modell in einem iterativen Prozess schrittweise solange zu modifizieren, bis es die betrieblichen Erfahrungen hinreichend genau beschreiben konnte. Dieser Prozess bildete neben der Datensammlung und –auswertung einen weiteren Schwerpunkt des Projekts, da er Aufschlüsse über die Methodik der Modellbildung liefern und somit Grundlage für eine spätere "automatisierte" Vorgehensweise bilden sollte. Bild 3.2 zeigt den Lösungsweg schematisch.

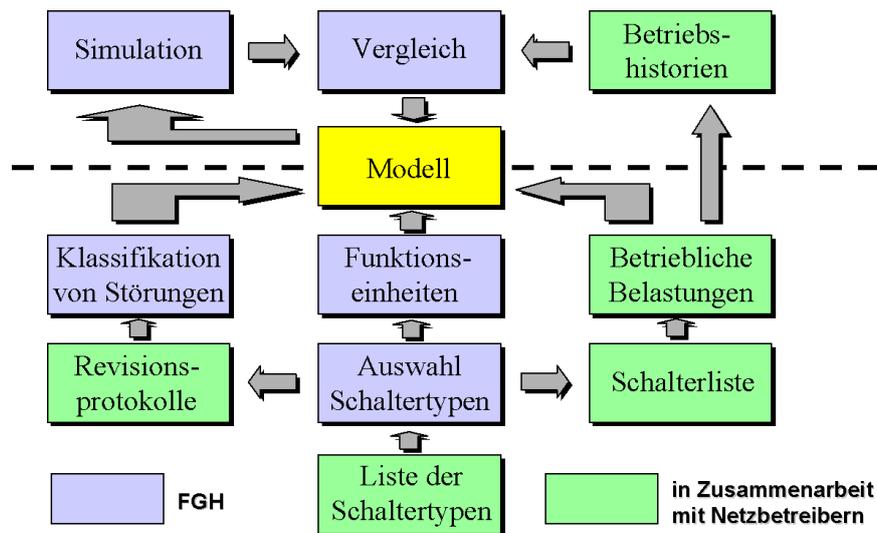


Bild 3.2 Lösungsweg zur Modellerstellung und -überprüfung

Für die eigentliche Modellbildung mussten folgende Teilaufgaben gelöst werden:

- Erstellen einer Liste der Schaltertypen und Auswahl eines geeigneten Schaltertyps für die Modellbildung

Hierzu wurden zunächst in Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern bei den Netzbetreibern Listen der im Betrieb befindlichen 123-kV-Leistungsschalter erstellt und die jeweiligen Listen der beteiligten Netzbetreiber in einer gemeinsamen Liste zusammengestellt. Neben der Bezeichnung des Typs und der Anzahl der hiervon im Betrieb befindlichen Schalter enthielten diese Listen auch Angaben zum Löschmedium, zum Antrieb der Schalter und zum durchschnittlichen Alter des jeweiligen Schaltertyps. Somit war eine Reihe Charakteristika beschrieben, die als Kriterien für die Auswahl eines Schaltertyps für die Modellbildung geeignet waren. So sollte vom betrachteten Schaltertyp eine möglichst große Anzahl von Geräten im Betrieb sein, die, um ausreichend Betriebshistorien vorliegend zu haben, zudem möglichst viele Betriebsjahre aufweisen sollten. Außerdem waren wir bestrebt, hinsichtlich Löschmedium und Antriebsverfahren eine repräsentative und der zukünftigen Verteilung im Netz Rechnung tragende Auswahl zu treffen. Erwartungsgemäß stand die Beachtung des letztgenannten Kriteriums im Konflikt mit dem Wunsch nach möglichst umfangreichen Betriebserfahrungen mit dem ausgewählten Schaltertyp. Die Kriterien und das Ergebnis der Auswahl sind im Abschnitt 5.1 ausführlich beschrieben.

- Erstellen einer Liste aller im Betrieb befindlichen Schalter des ausgewählten Typs und Zuordnung der betrieblichen Belastungen zu den individuellen Geräten

Diese Punkte konnten wiederum nur in enger Zusammenarbeit mit den am Projekt beteiligten Netzbetreibern bearbeitet werden. Während das Erstellen der Schalterliste mit Angabe des Standorts, des Baujahres und weiterer gerätespezifischer Angaben von

Seiten der Netzbetreiber mit Hilfe der vorhandenen Betriebsmitteldatenbanken vergleichsweise einfach zu bewerkstelligen war, führte die Zuordnung betrieblicher Belastungen, die als wesentlicher Einflussfaktor auf die Zustandsentwicklung in das Modell einfließen sollten, zu Problemen. Zu den betrieblichen Belastungen, die als relevant betrachtet werden können, zählen neben häufiger Betätigung des Schalters und schwierigen Betriebssituationen, wie dem Schalten kleiner induktiver Ströme alle nur selten und unregelmäßig auftretenden Belastungen, wie z.B. das Ausschalten eines Kurzschlusses, die zu einer Zustandsverschlechterung einzelner Einheiten führen können. Problematisch war die Zuordnung dieser Belastungen zum einen, weil solche Belastungen, die an die Grenzen der Belastbarkeit des Leistungsschalters gehen, im Betrieb außerordentlich selten auftreten, zum anderen, weil eine systematische Erfassung von Belastungen in der Vergangenheit nicht erfolgte und daher nur bruchstückhaft vorlag. Eine ausführlichere Betrachtung hierzu findet sich im Abschnitt 5.2.

- Sammlung und Sichtung der Protokolle zu Revisionen, Inspektionen und Instandsetzungen, Klassifikation der aufgetretenen Störungen

Von den mit uns zusammenarbeitenden Netzbetreibern konnten uns umfangreiche Materialien zu Revisionen, Inspektionen und Instandsetzungen zur Auswertung zur Verfügung gestellt werden. Die Sichtung dieser Unterlagen erwies sich als äußerst arbeitsintensiv, da sich die vorliegenden Dokumentationen sowohl in der Form wie auch in der Ausführlichkeit unterschieden. Während einige Berichte bereits in digitaler Form vorliegen, ist die überwiegende Anzahl auf Papier dokumentiert, eine Vielzahl hiervon handschriftlich. Zudem erschwerte die Benutzung unterschiedlicher Formate für die Dokumentation der Revisionsprotokolle und Instandsetzungsberichte die Auswertung erheblich. So mussten viele für die Modellbildung relevanten Informationen mühsam „von Hand“ herausgefiltert werden. Im Hinblick auf die Prognose der Zustandsentwicklung zwischen den Zustandsdokumentationen während einer Überprüfung desselben vor Ort erwies sich die Sammlung aller instandsetzenden, d.h. zustandsverbessernden Eingriffe sowie aller aufgetretenen Störungen im Betrieb als hilfreich. Hier konnte eine Klassifikation der Eingriffe und Störungen für ein klareres Bild der Abnutzungs- und Alterungserscheinungen sorgen. Eine Beschreibung der Vorgehensweise und Ergebnisse hierzu finden sich im Abschnitt 5.3 dieses Berichtes.

- Mathematische Modellbildung

Um trotz einer üblicherweise geringen Anzahl von Belegen oder Hinweisen auf Zustandsveränderungen Aussagen über die Zustandsentwicklung ermöglichen zu können, ist es notwendig, dass das Modell alle zur Verfügung stehenden Informationen automatisch verknüpfen kann. So sollen sowohl alle Hinweise auf einen fehlerhaften als auch auf einen fehlerfreien Zustand in die Zustandsprognose einfließen. Auch das Eintreffen widersprüchlicher Hinweise hinsichtlich des Zustands einer Komponente ist möglich und muss im Modell Beachtung finden können. Eine mathematische Theorie, welche diese Betrachtungsweise unterstützt ist die Evidenztheorie, die deshalb bereits in [7] als

geeignete mathematische Grundlage für ein zustandsbeschreibendes Modell von Leistungsschaltern vorgeschlagen wird. Bei der Evidenztheorie handelt es sich um eine Verallgemeinerung der Wahrscheinlichkeitstheorie, welche im Gegensatz zu dieser zwei Wahrscheinlichkeitsmaße aufweist und die mathematische Behandlung von Unwissenheit zulässt. Das mathematische Verfahren wird im Abschnitt 5.4 näher betrachtet.

- Simulation der Zustandsveränderung und Vergleich mit real vorgefundenen Zuständen zur Verifizierung des Modells

Diesem Aufgabenpunkt wurde große Bedeutung eingeräumt, um eine korrekte Wahl der Parameter des Modells bestätigen zu können und Aussagen für eine geeignete Parametrierung weiterer zukünftiger Modelle zu ermöglichen. Leider beeinträchtigte hier die geringe Anzahl greifbarer, nicht-statistischer Einflüsse auf die Zustandsentwicklung der betrachteten Leistungsschalter (wie z.B. dokumentierte Extrembeanspruchungen) die Möglichkeit, aussagekräftige Ergebnisse über statistische Betrachtungen für das Kollektiv hinaus zu erstellen.

Ausführliche Betrachtungen zur Ermittlung einer Kennzahl zur Zustandsbeschreibung und durchgeführter Vergleiche zur Verifikation der Aussagekraft derselben finden sich im Abschnitt 6.2.

4 Diskussion vorhandener Instandhaltungs- und Zustandsmodelle

4.1 Empirische Modelle

Linke und Dickers [1] benutzen zur Zustandsbeschreibung den Begriff des Abnutzungsvorrats. Demnach erhöhen Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen den im Laufe der Beanspruchungszeit aufgezehrten Abnutzungsvorrat (Bild 4.1). Die Ermittlung der erforderlichen Wartungszeiten zur Anpassung der Abnutzungsbevorratung an die geplante Restlebensdauer des Betriebsmittels stellt sich als Optimierungsaufgabe dar.

Wie aus Bild 4.1 zu erkennen ist, wird der Abnutzungsvorrat eines Betriebsmittels in vier Bereiche unterteilt. In der Realität nimmt der Abnutzungsvorrat jedoch nicht nur diskrete Werte an. Vielmehr verringert er sich während der Lebensdauer des Betriebsmittels in der Regel stetig, einer vom Alter, von der Beanspruchung und vom verbliebenen Abnutzungsvorrat abhängigen Funktion folgend. Bei Extrembeanspruchung - wie im linken Teil dargestellt - kann er sich auch sprunghaft verringern. Instandsetzungsmaßnahmen führen je nach Art der Maßnahme zu einem mehr oder weniger deutlichen Anstieg des Abnutzungsvorrats (in der Mitte des Diagramms). Eine Instandsetzung sollte erfolgen, sobald der Abnutzungsgrad die Stufe „gering“ erreicht, so dass er während der Betriebszeit niemals zu gering ist. Undefiniert bleiben die Kriterien zur Bestimmung des Abnutzungsvorrats.

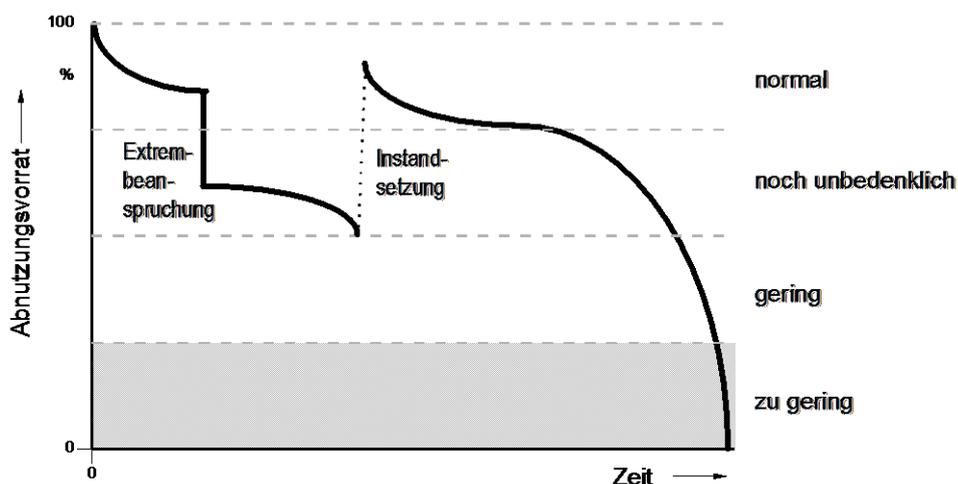


Bild 4.1 Verlauf des Abnutzungsvorrates eines Betriebsmittels in Abhängigkeit der Zeit und verschiedener äußerer Einflüsse [1]

Die Betrachtungsweise des Leistungsschalters als Gerät mit begrenztem Abnutzungsvorrat, der durch Alterung kontinuierlich, jedoch nicht konstant, und durch Extrembeanspruchungen schlagartig verringert wird, kann als Ausgangspunkt für jedes zustandsbeschreibendes Modell dienen. Die Berücksichtigung der Möglichkeit eines (teilweisen) Wiederauffüllens des Abnutzungsvorrates durch äußeren Eingriff (Instandsetzung) ist ein weiterer Aspekt für ein

Zustandsmodell, das sowohl die Abnutzung als auch instandhaltende Maßnahmen in die Bewertung einbezieht, so wie in diesem Vorhaben angestrebt.

Nicht berücksichtigt wird bei dieser Modellbildung, dass unterschiedliche Einheiten des Schalters unterschiedliche Grade der Abnutzung aufweisen können. Unbeantwortet bleiben die Fragen, wie der Abnutzungsvorrat zu quantifizieren ist und welche Fehlerwahrscheinlichkeiten einem jeden Abnutzungsvorrat zuzuordnen ist. Letzterer Aspekt wurde durch die Kennzeichnung von tolerierbaren, noch tolerierbaren und nicht mehr tolerierbaren Bereichen umgangen. Umso mehr stellt sich hier die Frage nach der Quantifizierbarkeit des Verlaufs und der gekennzeichneten Bereiche.

Hierzu geben Balzer et al. [9] Anregungen. Das von ihnen vorgeschlagene Modell zur Beurteilung des Zustandes von Leistungsschaltern benutzt neben einigen objektiven Charakteristika des Schalters vor allem empirische Größen. Tabelle 4.1 zeigt einen Auszug aus dem Beurteilungsblatt.

Tabelle 4.1 Auszug aus einem Beurteilungsblatt für Leistungsschalter [9]

| Kriterium | Bewertung | Wichtung | Ergebnis |
|--------------------------------------|---|----------|----------|
| Alter (in Jahren) | < 20 | 1 | 5 |
| | 20-25 | 2 | |
| | 26-30 | 3 | |
| | 31-35 | 4 | |
| | 36-40 | 5 | |
| | >40 | 6 | |
| Erfahrungen mit gleichem Typ | sehr gut | 1 | 6 |
| | ... | 2 | |
| | mittel | 3 | |
| | | 4 | |
| | schlecht | 5 | |
| Gesamtanzahl von Schaltungen je Jahr | normal | 1 | 3 |
| | ... | 2 | |
| | hoch | 3 | |
| Anzahl von Kurzschlussabschaltungen | normal | 1 | 3 |
| | ... | ... | |
| | hoch | 5 | |
| Löschmedium | SF ₆ -Gas mit Druckentlastung | 1 | 2 |
| | SF ₆ -Gas ohne Druckentlastung | 2 | |
| | Öl | 3 | |
| | Druckluft | 4 | |
| Ersatzteilversorgung | gut | 1 | 3 |
| | mittel | 3 | |
| | schlecht | 5 | |
| Ergebnis aus Messungen | gut | 1 | 10 |
| | ... | ... | |
| | schlecht | 6 | |

Neben den objektiven, direkt bewertbaren Kriterien wie Alter des Schalters und Löschmedium werden hier bewusst auch subjektive Einschätzungen vom Anwender verlangt, beispielsweise bei Größen wie Gesamtanzahl von Schaltungen und Kurzschlussabschaltungen („normal“ bis „hoch“) und Ergebnisse aus Messungen („gut“ bis „schlecht“). Dies ist praktikabel, weil nur eine vergleichende Aussage über die Zustände der im Netz eines Betreibers befindlichen Schalter erstellt werden soll. Die Bewertung wird abgerundet mit dem Einbringen von Erfahrungswerten sowohl hinsichtlich der Störanfälligkeit als auch der Ersatzteilversorgung.

Jeder Bewertung eines Kriteriums ist eine Ziffer zugeordnet, die eine Zustandsbewertung beinhaltet. Je höher der Wert, desto schlechter ist der prognostizierte Zustand des Leistungsschalters. Eine zusätzliche Wertung der Aussagekraft der Kriterien untereinander wird über die Wichtung der Kennziffer eingebracht. So wird z.B. das Ergebnis aus Messungen mit dem Faktor 10 sehr hoch gewichtet, während die Bewertungen aus der Angabe des Löschmediums (Faktor 2) sowie der Einschätzung der Häufigkeit von Schaltungen und Fehlerausschaltungen (Faktor 3) nur vergleichsweise gering in die Gesamtbeurteilung einfließen.

Der Vorteil des hier vorgestellten Modells ist sicher die einfache Anwendbarkeit. Zur Beurteilung genügt ein Erfahrungsträger aus dem Bereich der Instandhaltung sowie die zum Leistungsschalter vorliegenden Unterlagen. Aufwendige Datensammlungen sind nicht nötig. Der Zustand wird durch einen quantitativen Wert wiedergegeben und ist somit direkt mit dem anderer Leistungsschalter vergleichbar. In [9] wird mit einem ähnlichen Bewertungsbogen die Bedeutung eines jeden Leistungsschalter ermittelt und ebenfalls durch einen Wert ausgedrückt. Hier gilt, je höher der Wert, desto größer die Bedeutung bzw. Wichtigkeit des Betriebsmittels.

Trägt man in einem Diagramm z.B. die Wichtigkeit als Abszisse und den Zustand als Ordinate ein, so gibt bei geeigneter Wichtung beider Größen der Abstand zur Winkelhalbierenden ein Maß für die Dringlichkeit einer Instandhaltungsmaßnahme (Inspektion bzw. ggf. Revision). Sowohl eine hohe Wichtigkeit als auch ein schlechter Zustand vergrößern den Abstand, eine Kombination aus beidem führt zum größtmöglichen Abstand und damit zur höchsten Dringlichkeit, siehe Bild 4.2.

Den Vorzügen der einfachen Anwendbarkeit und der Möglichkeit der Erweiterung und Modifikation je nach Bedarf stehen auch bei diesem Modell einige Mängel gegenüber. So erfolgt keine Differenzierung der Zustandsbeschreibung hinsichtlich einer Unterscheidung des Zustandes einzelner Einheiten des Geräts. Vielmehr gibt die Quantifizierung des Zustands lediglich ein Maß für die erwartete Störungsanfälligkeit an. Eine Berücksichtigung der Zustandsverbesserung nach einer Instandsetzung bzw. die Korrektur des schlechten Bildes nach einer positiv verlaufenen Inspektion kann im bestehenden Modell nur durch sehr hohe Wichtung der zugehörigen Wertungen den Zustand entsprechend verbessern, so dass eine Instandhaltungsmaßnahme vorerst nicht erneut dringlich erscheint.

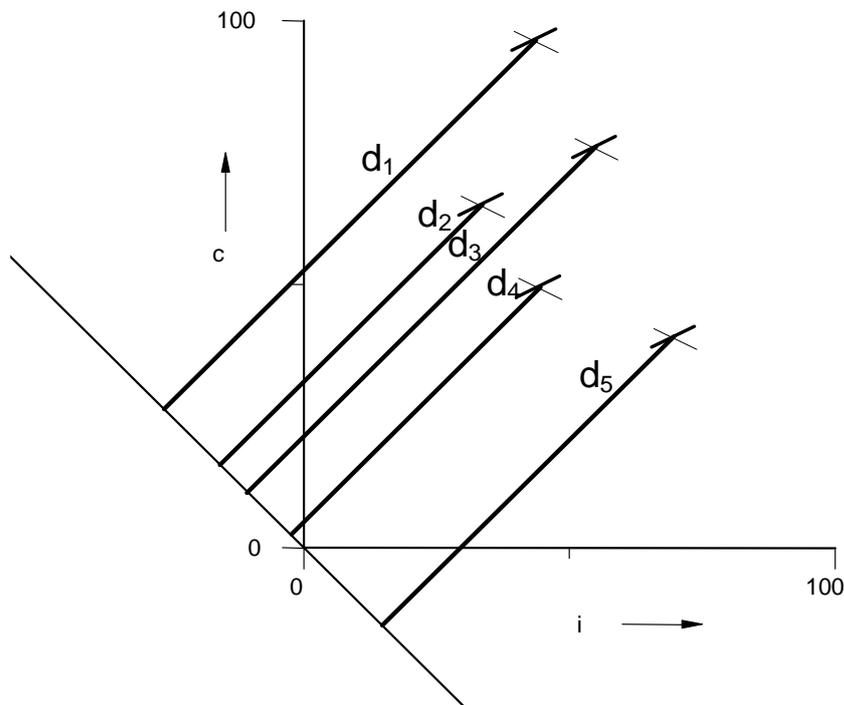


Bild 4.2 Interpretation des Beurteilungsergebnisses [9]
c technischer Zustand des Betriebsmittels
i Wichtigkeit des Betriebsmittels

Auch ist nicht ersichtlich, wie die „Alterung“ eines positiven Ergebnisses aus Messungen, d.h. die allmähliche Reduktion der Bedeutung dieses Punktes mit fortschreitender Zeit im Modell beachtet wird. Als letzter Kritikpunkt ist zu nennen, dass das Einbringen von Erfahrungswerten anhand subjektiver Bewertung die Gefahr birgt, dass unterschiedliche Personen gleiche Erfahrungen unterschiedlich bewerten. Insbesondere beim Ausscheiden von Erfahrungsträgern aus einem Betriebsbereich droht dann eine Verschiebung der Zustandsbewertung bei neu in Betrieb genommenen bzw. neu im Modell aufgenommenen Leistungsschaltern.

Generell lässt sich sagen, dass ein empirisches Modell bei sorgsamer Berücksichtigung und Wichtung der Bewertungskriterien zu durchaus zufriedenstellenden Ergebnissen führt. Optimale Ergebnisse lassen sich ohne eine Analyse aller vorliegenden Daten und ohne ein Hinterfragen der bisherigen Bewertungspraxis jedoch kaum erreichen.

4.2 Analytische Modelle

Das Modell von Endrenyi, Anders et al. [10] kennt eine Unterteilung der Zustandsbeschreibung in lediglich vier diskrete Zustände (initial bis failure). Die Übergänge zwischen den Zuständen in diesem Modell geschehen mit einer vorzugebenden Wahrscheinlichkeit, so dass sich der Zustand ohne Instandhaltung im Laufe der Zeit in diskreten („zufälligen“) Schritten verschlechtert. Hierzu ist jedem Übergang (im Bild 4.3 durch Pfeile gekennzeichnet) eine Übergangswahrscheinlichkeit zugeordnet. Als Ergebnis der in Simulationsrechnungen periodisch angenommenen Inspektionen werden geringfügige („minor“) oder umfangreiche („major“) Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen ausgeführt.

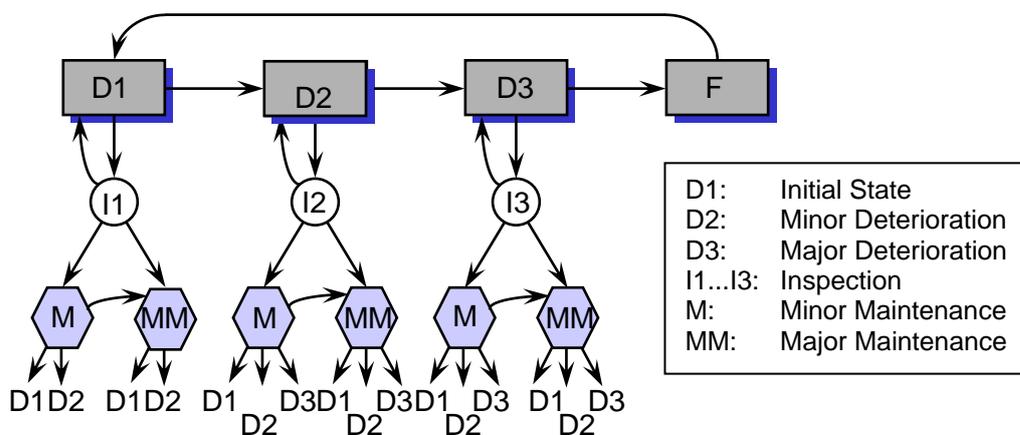


Bild 4.3 Analytisches Modell nach Endrenyi, Anders et al. [10]

Abhängig vom Zustand des Betriebsmittels vor der Instandhaltung, sind auch den Übergängen von der Instandsetzung zu den daraus resultierenden neuen Zuständen wiederum unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten zugeordnet. Nur deshalb sind im Bild 4.3 drei verschieden benannte Inspektionen (I1 bis I3) aufgeführt, diese stehen jedoch nicht für unterschiedliche Inhalte der Inspektion. Im Modell wird auch einkalkuliert, dass mit einer gewissen, wenn auch geringen, Wahrscheinlichkeit eine Instandsetzung nicht oder nicht im gewünschten Maße zur Verbesserung des Zustandes beiträgt. Sogar eine mögliche Verschlechterung des Zustandes um einen Grad durch einen instandsetzenden Eingriff kann (mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit) in diesem Modell berücksichtigt werden.

Der Vorteil dieses Modells liegt in der mathematisch einfach umzusetzenden Analyse, da das Modell aufgrund der gewählten Eigenschaften direkt in eine Markov-Kette transferiert werden kann, wofür umfangreiche mathematische Analyseverfahren existieren. Damit lassen sich dann für eine gegebene Instandhaltungsstrategie die statistisch zu erwartende Dauer bis zum Eintritt eines Fehlers und die Anzahl und der Umfang der zu erwartenden Instandsetzungsarbeiten sowie die Verweildauer in den einzelnen Zuständen ermitteln. Aus diesen Angaben können die jährlich zu erwartenden Kosten für Inspektionen, Instandsetzungen und Reparaturen bestimmt werden. Über eine Variation der Inspektionsintervalle lassen sich

theoretisch das Minimum der Summe der zu erwartenden Kosten und daraus die kostenoptimalen Inspektionsintervalle feststellen.

Nachteilig an diesem Modell ist, dass es in der vorliegenden Form nur für die Analyse der periodischen Instandhaltung, d.h. für die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher, aber konstanter Wartungsintervalle auf Kosten und Ausfallzeiten einsetzbar ist. Der Einfluss der Beanspruchung des Leistungsschalters wird ebenso wenig wie spezifizierte Formen der Abnutzung, der Inspektion und der Instandsetzung bedacht. Zudem wird für die Bewertung einer Inspektion stets vorausgesetzt, dass der Zustand vor der Inspektion bekannt ist, selbst wenn er während derselben falsch eingeschätzt wird (beispielsweise wenn während der Inspektion I1, d.h. ausgehend vom fehlerfreien Zustand eine umfangreiche Instandsetzung für nötig befunden wird). Es ist leicht einzusehen, dass dieser Umstand in der Wirklichkeit nicht zutrifft und das Modell deshalb nicht der Realität nachgeführt werden kann.

Im Rahmen des ebenfalls von der AiF bei der FGH geförderten Forschungsprojekts „Instandhaltungsplanung elektrischer Energieversorgungsnetze“ [8] wird eine Abschätzung des Zustands der Betriebsmittel mit einem anderen analytischen Modell vorgenommen. Die Verwendung eines relativ einfachen Verfahrens erlaubte es, die durchgeführten Untersuchungen besser nachvollziehen zu können. Hierzu wurden alle Leistungsschalter eines Typs in gleicher Weise behandelt.

Die betriebliche Abnutzung a_1 wird ausgedrückt durch die lineare Abnahme des Abnutzungsvorrates Δa innerhalb eines Zeitraumes ΔT . Der betrieblichen Abnutzung überlagert ist die Alterung, die einer Exponentialverteilung entnommen wird. Individuelle Betriebshistorien und Vorkommnisse wie beispielsweise Kurzschlussstromausschaltungen können mit diesem einfachen Ansatz nicht nachvollzogen werden.

Als Kriterium, wann mit der nächsten Instandhaltung begonnen werden muss, wird die Unterschreitung der Grenze a_{CBM} angesehen. Als Nebenbedingung darf bei der zustandsorientierten Instandhaltung die Dauer bis zur nächsten Instandhaltung von $\Delta T_{IH \text{ Max}}$ nicht überschritten werden. Diese Grenze stellt ein Maß für die maximale Risikobereitschaft der Entscheidungsträger dar. Im Falle einer Störung im schlimmsten Fall mit Personenschäden muss gewährleistet sein, dass man nach dem Stand der Technik handelte.

Durch die Instandhaltungsmaßnahme wird der Abnutzungsvorrat soweit möglich wieder aufgefüllt. Bedingt durch die Alterung wird ein Abnutzungsvorrat von 100 % (entspricht 1 p.u.) nicht mehr erreicht. Die Strategie der zustandsorientierten Instandhaltung wird so lange fortgeführt, bis auch durch Instandhaltung der Abnutzungsvorrat a_{CBM} nicht mehr erreicht wird.

Aus wirtschaftlichen Gründen wird eine Untergrenze $\Delta T_{IH \text{ Min}}$ für die minimale Breite des Instandhaltungsintervalls definiert. Wird diese Grenze unterschritten, wird auf die periodische Instandhaltung übergegangen. Hierdurch wird vermieden, dass in immer kürzeren Intervallen eine Instandhaltung angesetzt wird.

Generell gilt, dass bei Unterschreiten der sicherheitsrelevanten Schranke des Abnutzungsvorrates von a_{Min} der Abnutzungsvorrat des Betriebsmittels auf null gesetzt wird. Das Lebensende der Komponente ist erreicht.

Für die betriebliche Abnutzung a_1 des Betriebsmittels zum Zeitpunkt t gilt:

$$a_1 = -\frac{\Delta a}{\Delta T} \cdot (t - T_{\text{IH}_{\text{Vorgänger}}}) + 1 \quad (4.1)$$

mit $T_{\text{IH}_{\text{Vorgänger}}}$: Zeitpunkt der zuletzt durchgeführten
Instandhaltungsmaßnahme

Für den Einfluss der Alterung g des Betriebsmittels zum Zeitpunkt t wird mit dem Alterungskoeffizienten τ die Exponentialfunktion nach Gl. (4.2) als Näherung angesetzt.

$$g = 1 - e^{-\frac{t}{T_L}} \quad \text{für } 0 \leq t \leq T_L \quad (4.2)$$

Der gesamte Abnutzungsvorrat zum Zeitpunkt t ergibt sich zu:

$$a = a_1 + g = -\frac{\Delta a}{\Delta T} \cdot (t - T_{\text{IH}_{\text{Vorgänger}}}) - e^{-\frac{t}{T_L}} + 2 \quad (4.3)$$

Dies gilt sowohl für den Bereich der zustandsorientierten als auch für den Bereich der periodischen Instandhaltung.

Die Zeitpunkte der Instandhaltung t_n bei der zustandsorientierten Strategie können mit dem Newtonverfahren zur Nullstellenbestimmung ermittelt werden. Als zusätzliche Nebenbedingungen sind a_{Min} und $T_{\text{IH}_{\text{Min}}}$ zu beachten.

Zur Bestimmung des Alterungskoeffizienten τ wird zunächst angenommen, dass dieser der Lebensdauer T_L entspricht. Die mittlere Lebensdauer T_L ist eine Größe, die unter Berücksichtigung notwendiger, z.B. vom Hersteller empfohlener, Instandhaltungsmaßnahmen und Intervalle ermittelt wird. Für den Alterungskoeffizienten τ ist diese nur als Startwert geeignet. Durch Variation von τ und n -maligem Durchlaufen des Lebenszyklus einer Komponente wird der Alterungskoeffizient τ so festgelegt, dass die mittlere Lebensdauer T_L der Komponente mit 10%-iger Genauigkeit erreicht wird. Das beschriebene Abnutzungsmodell hat eine einjährige Auflösung.

Unter Verwendung des oben beschriebenen Verfahrens wird der Zustand Z einer Komponente dadurch abgeschätzt, dass von ihrem Einbaupunkt an bis zum Betrachtungszeitpunkt der Lebenszyklus der Komponente durchlaufen wird. Der in Bild 4.4 dargestellte

Abnutzungsverlauf einer im Jahre 1965 eingebauten Komponente liefert beispielsweise für den Betrachtungszeitpunkt 1999 den Wert 0,51 für den Abnutzungsvorrat a . Der Zustand Z beträgt demnach 0,49.

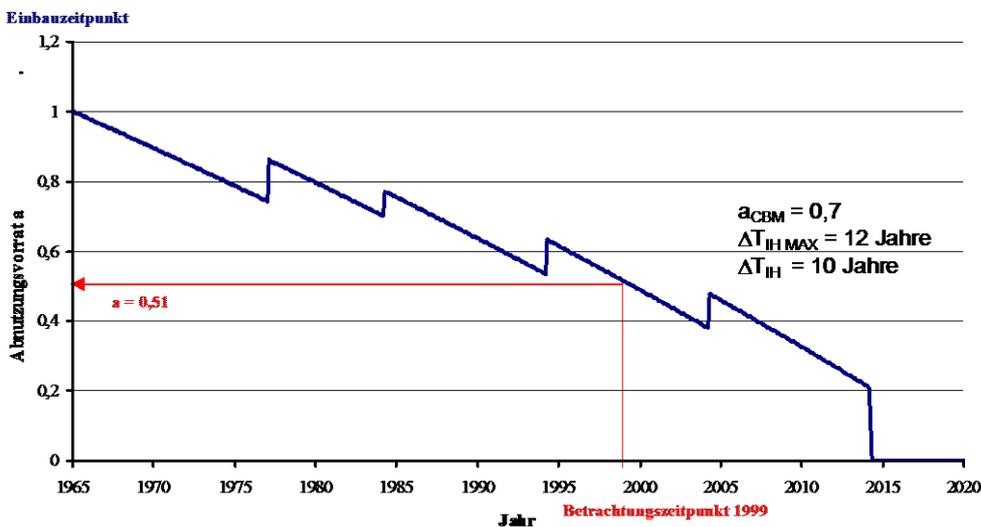


Bild 4.4 Ermittlung des Abnutzungsvorrates an einem Beispiel [8]

Das beschriebene Abnutzungsmodell diente lediglich zur Definition der Zustände der unterschiedlichen Leistungsschalter im Netz. Es kann in der vorliegenden Form nicht auf Veränderungen der Instandhaltungsstrategien reagieren. Die vorgestellte Modellbildung kann keine Extrembeanspruchungen, die zu einem sprungförmigen Verlust des Abnutzungsvorrates führen, und keine Zustandskorrekturen aufgrund von am Schalter durchgeführten Analysen und Messungen einbeziehen. Ferner berücksichtigt sie weder die differenzierte Verringerung noch das differenzierte Wiederauffüllen des Abnutzungsvorrates verschiedener Funktionseinheiten. Der Verlauf von Abnutzung und Alterung muss zunächst mit sinnvollen Parametern belegt und dann durch Spiegelung an der Realität modifiziert bzw. verifiziert werden.

Im Rahmen der Entwicklung der Verfahren für das o.g. Forschungsvorhaben [8] hat sich das erweiterte Abnutzungsmodell als geeignet herausgestellt. Den hier gestellten Ansprüchen genügt es nicht. Generell ist die Anwendung eines analytischen Modells nicht geeignet, die in diesem Vorhaben gestellten Anforderungen an ein Zustandsmodell im Sinne des im Bild 3.1 dargestellten integrierten Instandhaltungsmanagements zu erfüllen. So soll das hierzu benötigte Modell nicht optimale Instandhaltungszyklen ermitteln, sondern den aktuellen Zustand sowie dessen Verlauf in Zukunft unter bestimmten Annahmen quantifizieren, wobei Korrekturen durch Ergebnisse oder Eingriffe als Folge von Instandhaltungsmaßnahmen möglich sein müssen.

4.3 Probabilistisches Modell

Das im folgenden vorgestellte Modell erlaubt es, die unterschiedlichen Hinweise auf eine mögliche Abnutzung einzelner Einheiten zu kombinieren und somit die Grundlage eines probabilistischen Handelns zu liefern, d.h. Eingriffe (Revisionen und ggf. Instandsetzungen) stets dann zu empfehlen, wenn nachvollziehbar Gründe für die Annahme vorliegen, dass ein Instandsetzungsbedarf besteht.

Als mathematische Grundlage hierfür wurde die Evidenztheorie gewählt, die bereits in [7,11] für ein solches Modell vorgeschlagen wurde. Die Evidenztheorie wurde ursprünglich von Shafer [12] entwickelt, basierend auf einer grundlegenden Arbeit von Dempster [13]. Sie kann als eine Verallgemeinerung der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitsrechnung betrachtet werden und bietet ein mathematisches Modell für plausible Schlüsse durch Bestätigung oder Widerlegung von Aussagen (sog. Hypothesen) mittels über einen Zeitraum eingehender Hinweise.

Im Gegensatz zur klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie kennt die Evidenztheorie zwei Wahrscheinlichkeitsmaße, nämlich den Glaubensgrad Bel (degree of belief) und den Plausibilitätsgrad Pl (degree of plausibility). Diese Unterscheidung erlaubt die getrennte Betrachtung von Hinweisen auf ein Ereignis und Hinweisen auf ein Gegenereignis.

Betrachtet man ein Ereignis A , so gilt hinsichtlich des Glaubensgrades und des Plausibilitätsgrades dieses Ereignisses stets

$$Bel(A) \leq Pl(A),$$

weshalb der Glaubensgrad in der Literatur teilweise auch als „untere Wahrscheinlichkeit“ und der Plausibilitätsgrad als „obere Wahrscheinlichkeit“ bezeichnet wird. Für das Modell des Leistungsschalters kann eine Aussage (Hypothese) z.B. lauten: *der Antrieb bedarf einer Instandsetzung*. Das dazugehörige Gegenereignis lautet dann konsequenterweise: *der Antrieb bedarf keiner Instandsetzung*. Ein schwacher Hinweis für einen Instandsetzungsbedarf darf vom Modell nun nicht als starker Hinweis auf das Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfes gedeutet werden. Genau dies wird bei der Anwendung der Evidenztheorie anstelle der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie sichergestellt. Das wiederum bedingt, dass die Summe der Glaubensgrade für ein Ereignis und das zugehörige Gegenereignis nicht identisch eins betragen muss. Vielmehr gilt, dass ein Hinweis für ein Ereignis lediglich die Möglichkeit und damit die Plausibilität für das Gegenereignis einschränkt. Nennt man das zugehörige Gegenereignis \bar{A} , so gilt also

$$Pl(\bar{A}) = 1 - Bel(A)$$

Bild 4.5 verdeutlicht die Zusammenhänge von Glaubens- und Plausibilitätsgrade eines Ereignisses und seines Gegenereignisses. Die Beschränkung des Betrachtungsrahmens auf ein Ereignis und sein Gegenereignis erlaubt die Darstellung der Wahrscheinlichkeitsmaße in einem Balken der Länge eins. Die Differenz zwischen Plausibilitätsgrad und Glaubensgrad

(im Balken weiß dargestellt) entspricht der Unwissenheit bezüglich des Ereignisses bzw. Gegenereignisses. Je weniger verlässlich die vorliegenden Hinweise sind, desto größer ist die Unwissenheit.

In [7] wird zur Abbildung der Abhängigkeiten zwischen den Zuständen der einzelnen Funktionseinheiten des Betriebsmittels und dem Zustand des gesamten Betriebsmittels ein vereinfachter Fehlerbaum benutzt. Dieser ist im Bild 4.6 dargestellt. Von den im Bild grün dargestellten Informationsquellen gehen Hinweise in Form von Glaubensgraden für mangelfreien oder –behafteten Zustand aus. Diese werden in verschiedenen Ebenen nach den Regeln der Evidenztheorie zusammengefasst und liefern zuletzt eine Aussage über den Zustand des Leistungsschalters.

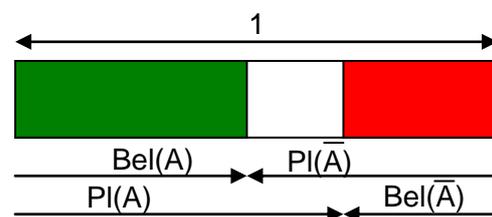


Bild 4.5 Balkendiagramm zur Darstellung der Glaubens- und Plausibilitätsgrade eines Ereignisses und seines Gegenereignisses

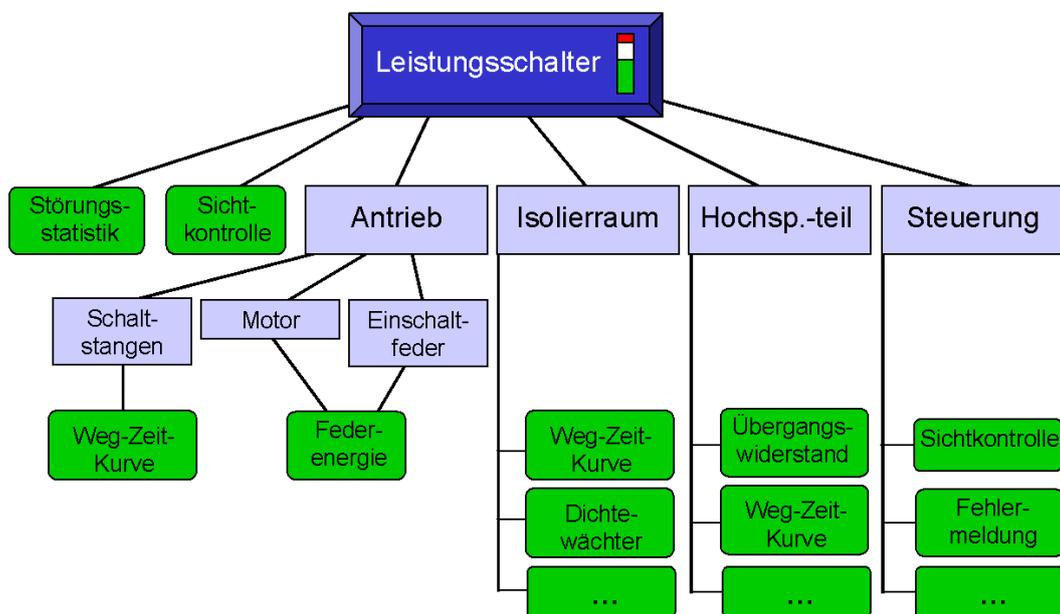


Bild 4.6 Vereinfachtes Fehlerbaum-Modell für einen Leistungsschalter [7]

In diesem Modell wird unterschieden zwischen Hinweisen, die den Zustand des Leistungsschalters als ganzes betreffen, und Hinweisen, die nur den Zustand einzelner Funktionseinheiten des Leistungsschalters beschreiben. Dabei wird zwischen dem Antrieb, dem Isolierraum, dem Hochspannungsteil und der Steuerung unterschieden. Der Antrieb wird nochmals

unterteilt in Schaltstangen, Motor und Einschaltfeder. Für jede dieser Einheiten sind beispielhaft einige denkbare Informationsquellen angegeben, die Hinweise auf deren Zustand liefern können.

Allgemein können die Hinweise unterschiedliche Glaubensgrade (Masse) aufweisen, die auch die Zuverlässigkeit bzw. Aussagekraft der Informationsquellen bei der Ermittlung des Zustands der Einheit beinhalten. Im Bild 4.6 wird nur das Resultat gezeigt, das sich nach Verknüpfung der einzelnen Hinweise zum Zustandsaussage des Leistungsschalters zusammenfügt. Dies geschieht mit Hilfe der sogenannten Dempster'schen Regel, die im Abschnitt 5.4.1 vorgestellt wird.

Der dargestellte Fehlerbaum kann stets nur eine Momentaufnahme der Zustandsbeschreibung darstellen. Vom Modell werden jedoch Projektionen des Zustands in die Zukunft erwartet, um Instandhaltungen rechtzeitig planen zu können. Neumann schlägt in [7] deshalb vor, die bekannte Zustandsbeschreibung aus Gegenwart und Vergangenheit z.B. durch lineare Extrapolation fortzuschreiben. Somit sei bei geeigneter Parametrisierung bzw. Modellierung der Eingangsinformationen mit Hilfe der Aufzeichnung der Zustandsbeschreibungen über die Nutzungsdauer der Betriebsmittel eine Prognose des Zeitpunktes möglich, ab welchem eine Instandhaltungsmaßnahme angesetzt werden sollte.

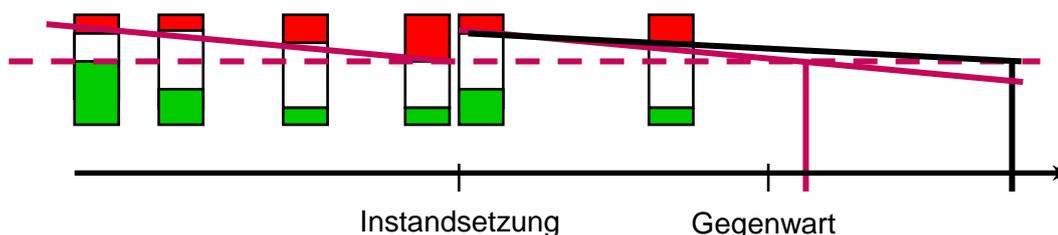


Bild 4.7 Zustandsbeschreibungen über die Nutzungsdauer und Projektion in die Zukunft

Eine lineare Extrapolation in die Zukunft nach Bild 4.7 wirft jedoch prinzipielle Fragen auf. Durch eine Instandsetzung z.B. erfolgt nämlich in der Regel eine sprunghafte Verbesserung des Zustandes. Danach muss entweder die alte Trendlinie (vertikal verschoben) fortgeschrieben werden oder aber eine neue berechnet werden. Diese werden sich häufig unterscheiden, wenn z.B. eine sprunghafte Verschlechterung des Zustands in der Vergangenheit (beispielsweise durch eine einmalige Extrembeanspruchung oder Ansprechen einer Warnmeldung vor der Instandsetzung) für eine schneller fallende Trendlinie als nach der Instandsetzung sorgte.

Für die Benutzung der alten Trendlinie spricht, dass sich solche Zustandsverschlechterungen der Vergangenheit mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wiederholen können (Erfahrung). Dagegen spricht jedoch, dass die Benutzung der alten Trendlinie für eine zu frühe Instandhaltungsmaßnahme sorgt, wenn dies nicht eintritt. Vor allem aber ist die Gültigkeit einer Fortschreibung des gleichen Abnutzungsverhaltens in die Zukunft ohne Berücksichtigung des zunehmenden Alters des Betriebsmittels anzuzweifeln. Ein weiterer

Schwachpunkt dieser Methode ist, dass lediglich die Trendlinie des Individuums berücksichtigt wird. Erfahrungen über das Abnutzungsverhalten baugleicher Schalter bleibt unberücksichtigt. Dies kann zu unnötig großen Abweichungen zwischen Prognose und realer Zustandsentwicklung führen.

Das in [7] vorgestellte mathematische Modell und der dort aufgezeigte Ansatz für das Zustandsmodell eines Hochspannungs-Leistungsschalters scheint, mit einigen Anpassungen, geeignet, um die in diesem Projekt angestrebten Eigenschaften des Zustandsmodells dort zu implementieren. Es wurde deshalb als Grundlage für die Modellbildung in diesem Vorhaben gewählt. Im Abschnitt 5.4 wird auf das mathematische Verfahren, dessen Anpassung an die Aufgabenstellung sowie auf die Wahl der Parameter für das Modell detailliert eingegangen.

5 Arbeitsschritte zur Entwicklung des Zustandsmodells

5.1 Auswahl geeigneter Schaltertypen

Wie sich aus Bild 5.1 erkennen lässt, ist die Sichtung einer Liste mit allen bei den am Projekt beteiligten Netzbetreibern eingesetzten Schaltertypen der Ausgangspunkt aller folgenden Arbeiten, die zur Erstellung des Modells erforderlich sind. Hierauf baut in einem ersten Schritt auch die Auswahl der für das Vorhaben geeigneten Schaltertypen auf.

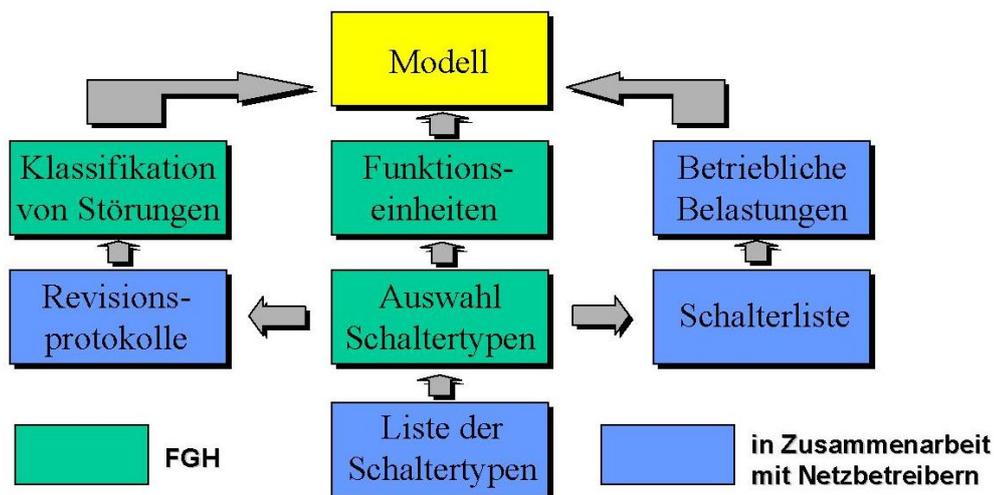


Bild 5.1 Arbeitsschritte zur Modellerstellung

Zu Beginn des Vorhabens legten daher die drei an einer Zusammenarbeit interessierten Netzbetreiber (ein Netzbetreiber musste wegen interner Umstrukturierungen und den damit verbundenen personellen Engpässen im Laufe des Projekts ausscheiden) Listen vor, die neben der Auflistung der in Ihrem 123-kV-Netz eingesetzten Schaltertypen auch Angaben zum Löschmedium, zum Antrieb und zur Anzahl der jeweils im Betrieb befindlichen Schalter enthielten.

Wie weiter vorn bereits ausgeführt, sollte die Auswahl auf zunächst einen Schaltertyp fallen, von dem eine ausreichend große Zahl mit möglichst langer Betriebshistorie vorlag, um umfangreiche Daten über das Instandsetzungsgeschehen und über mögliche Belastungen sammeln zu können. Andererseits sollte ein Schaltertyp gewählt werden, der hinsichtlich Lösch- und Antriebsmedium repräsentativ für Leistungsschalter im 123-kV-Netz steht.

Da sich bei den Löschmedien in den letzten beiden Jahrzehnten eine Verschiebung weg von den ölarmen Schaltern zu SF₆-gefüllten Schaltkammern vollzogen hat, war sehr rasch absehbar, dass es nicht möglich war, beide genannten Forderungen mit einem Schaltertyp zu vereinbaren. Bild 5.2 zeigt die Verteilung der Löschmedien der im Jahre 1998 bei den interessierten Netzbetreibern im 123-kV-Netz eingesetzten Leistungsschaltern (Gesamtumfang: 1931 Schalter).

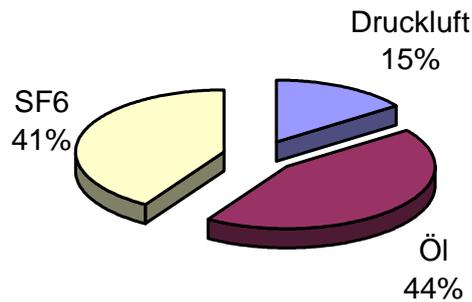


Bild 5.2 Verteilung der Löschmedien im 123-kV-Netzen (Stand 1998)

Einerseits bilden die ölarmen Schalter mit 44% der eingesetzten Leistungsschalter die größte Gruppe, andererseits erfolgte in dieser Gruppe wie auch bei den mit Druckluft löschenden Leistungsschaltern in den beiden letzten Jahrzehnten praktisch kein Zubau mehr. Der Anteil der zweitgrößten Gruppe, der Leistungsschalter mit SF₆-gefüllten Schaltkammern wächst hingegen ständig weiter. Daher wurde an dieser Stelle der Beschluss getroffen, zunächst zweigleisig weiterzufahren und sowohl einen SF₆- wie auch einen ölarmen Leistungsschalterttyp für die Modellbildung auszuwählen. Hinsichtlich der Antriebsarten dominierten in der vorliegenden Zusammenstellung die elektromechanischen Antriebe (37%) und die pneumatischen bzw. elektro-pneumatischen Antriebe (35%). Allerdings zeigt sich bei genauerer Betrachtung, dass sich die Antriebsarten bei Schaltern mit unterschiedlichen Löschmedien erheblich unterscheiden. So rührt die große Anzahl pneumatischer Antriebe auch daher, dass alle mit Druckluft löschenden Schalter aus Gründen der einfachen Verfügbarkeit diese Antriebsart aufweisen. Die Bilder 5.3 und 5.4 zeigen die Antriebsarten der SF₆- und ölarmen Schalter. Bei beiden Gruppen haben elektro-mechanische Antriebe mit 45% bzw. 44% den größten Anteil. Während bei SF₆-Leistungsschaltern der Rest ein recht inhomogenes Bild zeigt, gibt es bei den ölarmen Schaltern mit elektrohydraulischem bzw. pneumatischen Antrieb nur zwei weitere, ebenfalls recht große Gruppen.

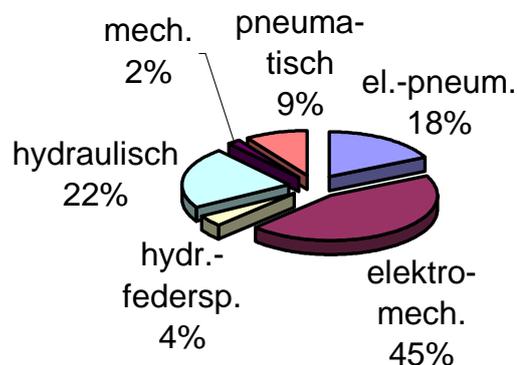


Bild 5.3 Antriebsarten der betrachteten SF₆-Leistungsschalter in den 123-kV-Netzen

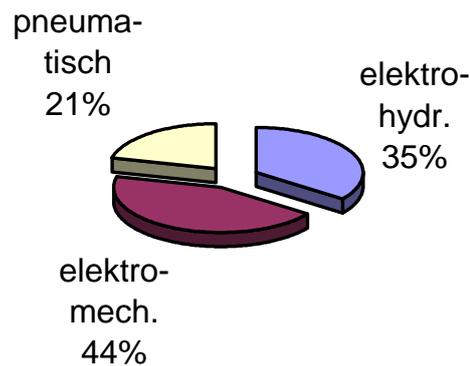


Bild 5.4 Antriebsarten der betrachteten ölarmen Leistungsschalter in den 123-kV-Netzen

Glücklicherweise zeigte sich, dass es in den Listen der Netzbetreiber einen SF₆-Leistungsschalter mit elektromechanischem Antrieb gab, der in großer Anzahl eingesetzt wird, sowie einen ölarmen Leistungsschalter, der die weitaus größte Verbreitung aufwies und sowohl mit elektrohydraulischem als auch pneumatischen Antrieb ausgeführt ist. Auf diese Weise konnten alle häufigen Antriebsarten mit der Wahl dieser beiden Schaltertypen abgedeckt werden.

Die Auswahl fiel somit auf die folgenden Schaltertypen:

Concordia HGF111 und die praktisch baugleichen Concordia HGF112 bzw. Sprecher HGF112/1 mit SF₆-gefüllter Schaltkammer und elektromechanischem Antrieb. Ursprünglich betrug die Gesamtmenge der bei den Netzbetreibern eingesetzten Schalter dieses Typs 176 Stück mit insgesamt 1.950 Betriebsjahren. Leider konnten wir nicht zu allen diesen Schaltern Instandhaltungsdaten sammeln, so dass sich die Gesamtheit auf 132 Schalter mit 1.481 Betriebsjahren reduzierte.

Siemens H800 und H801 bzw. H801E, ein ölarmer Leistungsschalter mit pneumatischem, bzw. elektrohydraulischem Antrieb. Die Gesamtheit der bei den Netzbetreibern eingesetzten Schalter dieses Typs umfasste anfangs 368 Geräte mit insgesamt rund 9.000 Betriebsjahren. Durch das Ausscheiden eines Projektpartners und der nicht vollständig vorliegenden Dokumentation des Instandhaltungsgeschehens wurde diese Anzahl auf 227 Schalter mit 5.973 dokumentierten Betriebsjahren reduziert.

5.2 Zuordnung betrieblicher Belastungen

Die Ermittlung betrieblicher Belastungen der betrachteten Leistungsschalter erwies sich als äußerst problematisch. Es lagen praktisch keine verwertbaren Aufzeichnungen über ausgeschaltete Kurzschlussströme (Einzel- und Summenstrom) vor. Entsprechende Datensammlung existierten entweder gar nicht oder deckten nur punktuell einige Betriebsjahre weniger Schalter ab. Nur wenige Fehlerausschaltungen wurden aufgezeichnet, dann jedoch fehlten verlässliche Angaben zur Höhe des Fehlerstromes, so dass eine Bewertung der hieraus

entstandenen Belastung aufgrund eines Vergleichs mit dem Bemessungsausschaltstrom des Schalters nicht möglich war.

Auch die Gesamtanzahl der Schaltvorgänge wurde in der Vergangenheit nicht systematisch erfasst und lässt sich daher nur abschätzen. Die Möglichkeit, die Schalhäufigkeit aus dem Zählerstand der Schalter zu ermitteln, wurde verworfen, da hier hauptsächlich Leerlaufschaltungen gezählt werden, die bei Wartungs- und Revisionsarbeiten durchgeführt werden. Nach einer Umfrage ergab sich, dass 92% der Leistungsschalter in der Regel weniger als 5 mal im Jahr betätigt werden. Alle übrigen werden in der Regel weniger als 20 Mal pro Jahr betätigt. In die letztere Gruppe fallen vor allem die Schalter zur Sammelschienenkupplung in Hochspannungs-Schaltanlagen, die dabei häufig geringer elektrischer Beanspruchung im Vergleich zu ihrem in Typprüfungen nachgewiesenen Schaltvermögen ausgesetzt sind.

Eine Zuordnung der betrieblichen Belastungen zu den individuellen Betriebshistorien der einzelnen Schaltgeräte wurde wegen der nur punktuellen Dokumentation als nicht sinnvoll erachtet. Die ursprünglich vorgesehene Verifizierung der Auswirkung dieser Belastungen auf den Instandsetzungsbedarf der individuellen Schaltgeräte, d.h. die Bestätigung einer Korrelation zwischen Belastung und Abnutzung wäre angesichts der geringen Anzahl der erfassten Vorgänge und der dann nicht mehr vorhandenen Vergleichbarkeit der Zustandsentwicklung verschiedener Schalter nicht möglich gewesen.

Stattdessen wurde das Augenmerk darauf gerichtet, die statistisch übliche Belastung von Leistungsschaltern im 123-kV-Netz zu ermitteln, um Aussagen über die hieraus resultierende Abnutzung zumindest für das Kollektiv ableiten zu können. Die umfangreichen Untersuchungen von Becker et al. [14] zu diesem Thema können hierfür als Grundlage herangezogen werden. Hier wurden die fehlenden Werte durch konservative Annahmen und Abschätzungen auf der sicheren Seite ergänzt. Insgesamt wurden dabei 1121 Leistungsschalter im 123-kV-Netz betrachtet.

Zunächst wird die **Belastung durch das Schalten von Lastströmen** untersucht. Dabei zeigte sich, dass nur 17 der untersuchten Schalter (entsprechend 1,5%) mit mehr als 40% ihres Bemessungsstromes belastet werden. Für 95% der 123-kV-Leistungsschalter ist der Laststrom demnach kleiner oder gleich 24% des Bemessungsstromes I_r . Die Gründe hierfür sind [14]:

- Für Fehlerfälle und betriebsbedingte Ausschaltungen ist in der Regel eine Redundanz nach dem (n-1)-Kriterium vorgesehen. Dies schließt eine 100prozentige Auslastung der Betriebsmittel im normalen Betrieb aus und ermöglicht oftmals nur Werte kleiner 50%.
- Für die geplante Betriebsdauer von 30 oder mehr Jahren wurde ein Lastzuwachs einkalkuliert.
- Mögliche Bemessungsströme für Leistungsschalter sind nur in festgelegten Größen genormt.

- Darüber hinaus richtet sich die Auswahl der Leistungsschalter in der Regel nach den zu beherrschenden Kurzschlussströmen, so dass sich konstruktionsbedingt aus den hohen Ausschaltströmen ein Schaltvermögen ergibt, das meist weit über den Anforderungen liegt.

Auch bei dieser Untersuchung waren Daten über die Schalthäufigkeit von Betriebsströmen nicht verfügbar. Deshalb wurde angenommen, dass bei Leistungsschaltern in der Regel weniger als 5 Schaltungen je Jahr unter Last durchgeführt werden. Ausgehend von dieser geringen Anzahl wurde konstatiert, dass Lastschaltungen unter den festgestellten geringen Beanspruchungen kaum zur Verkürzung der Lebensdauer der Schaltkammer von Leistungsschaltern beitragen, sofern es sich nicht um Schalter handelt, die betrieblich viele Schaltungen vornehmen müssen, wie Schalter für Kompensationseinrichtungen oder Pumpspeicherkraftwerke. Solche Schalter sind jedoch nicht in der Gruppe der in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Schalter enthalten.

Als zweiten Schwerpunkt beschreibt [14] die zu erwartende **Belastung durch das Abschalten von Fehlerströmen**. Da die 123-kV-Netze bei den untersuchten EVU wie bei den an unserem Projekt beteiligten Netzbetreibern kompensiert betrieben werden, war eine Betrachtung der gegenüber 1-poligen Fehlern wesentlich selteneren 3-poligen Kurzschlüsse [15] ausreichend. Zunächst wurden hierfür die möglichen maximalen Fehlerströme errechnet, indem als Fehlerort bei Klemmenkurzschluss stets die Seite des Leistungsschalters angenommen wurde, die den größeren Strom zur Folge hat, also entweder ein Fehler im Abgangsfeld oder an der Sammelschiene.

Es ergeben sich dadurch maximale Ströme, die im 123-kV-Netz in etwa normalverteilt bei einem Mittelwert von rund 55% zwischen 15% bis 100% des Bemessungsausschaltstromes I_{rb} liegen. Die 95%-Percentile liegt bei 91% des Bemessungsausschaltstromes I_{rb} .

Die Auswertung der Häufigkeit von Fehlerausschaltungen basierte auf Störungsmeldungen der EVU über einen Zeitraum von rund 10 Jahren von 1989 bis 1999. Demnach zeigen von 1797 Schalterpolen 1509 (entsprechend 84%) keine Ausschaltung in dem betrachteten Zeitraum. 210 Pole (12%) schalteten einen Fehlerstrom aus, 56 Pole (3%) zwei Fehlerströme und 22 Pole (1%) drei bis maximal sechs Fehlerströme. Da für die meisten Fehler der Fehlerort auf den Freileitungen nicht bekannt ist, wurden als ungünstigste Abschätzung alle abgeschalteten Fehler als Klemmenkurzschlüsse angenommen. Die daraus resultierenden Ströme wurden für jeden Pol summiert und auf den Bemessungsstrom I_{rb} bezogen. Dabei ergab sich, dass 96% der 123-kV-Schalterpole innerhalb der betrachteten 10 Jahre einen kumulierten Summenkurzschlussstrom aufwiesen, der kleiner dem Bemessungsstrom war. Diese Belastung durch Fehlerausschaltungen wurde in [14], auch unter der Annahme, dass die Belastung auf 35 Betriebsjahre projiziert werden muss, als zu gering angesehen, um daraus eine vorzeitige Alterung der Löschkammer durch Fehlerausschaltungen ableiten zu können.

Für eine genauere Betrachtung der Gesamtbelastung durch Fehlerausschaltungen wurde schließlich noch eine weitere Methode herangezogen, ausgehend von der Annahme, dass

die Fehler auf Freileitungen gleichverteilt sind und der erste Fehler stets ein Klemmenkurzschluss ist. Für diese Fehlerorte wurden die Kurzschlussströme berechnet und summiert. Mit der Monte-Carlo-Methode wurde dies für jede Leitung 10.000 Mal durchgeführt und anschließend die 95%-Percentile der so gewonnenen Werte ermittelt. Die 95%-Percentile gibt dann unter den getroffenen Voraussetzungen die Summe der geschalteten Ströme an, die in 95% der Fälle größer oder gleich groß den tatsächlich geschalteten Strömen ist. Damit erhält man eine Abschätzung, die zwar immer noch stark auf der sicheren Seite liegt, aber deutlich genauere Ergebnisse liefert. Mit der Monte-Carlo-Methode ergibt sich für 98% der Schalterpole in den 123-kV-Netzen keine vorzeitige Alterung durch Fehlausschaltungen.

Da die in [14] getroffenen Annahmen wie oben bereits ausgeführt sehr konservativ sind und mit Sicherheit auf der sicheren Seite liegen, kann angenommen werden, dass nur sehr wenige Leistungsschalter durch betriebliche Belastungen (sowohl Ausschalten von Last- wie auch Fehlerströmen) vorzeitig im Betrieb altern. Eine wesentliche Alterung braucht nur in solchen Fällen berücksichtigt werden, die aufgrund ihres Einbauortes bzw. Einsatzzweckes einer außerordentlichen Belastung ausgesetzt sind. Solche Schalter sind aber im Kollektiv der in diesem Vorhaben betrachteten Schalter nicht enthalten, so dass eine zusätzliche Abnutzung durch betriebliche Belastung im Modell nicht berücksichtigt wurde.

5.3 Sichtung und Klassifikation vorliegender Instandhaltungsdaten

5.3.1 Allgemeines

Für eine Zustandsbeschreibung eines Hochspannungs-Leistungsschalters ist eine geeignete Datenbasis als Eingangsinformation erforderlich. Eine solche liegt derzeit bei der Mehrzahl der Netzbetreiber nicht in dem Maße vor, wie sie hierfür notwendig oder zumindest wünschenswert wäre. Die Daten mussten deshalb noch aufwendig händisch ausgewertet werden, um die notwendigen Eingangsinformationen für das Modell zu ermitteln. Ziel dieses Vorhabens ist es darum auch, alle erforderlichen Daten und ihre wünschenswerten Auswertung für die Zustandsbewertung zu benennen, damit diese in zukünftigen Datenbanken in entsprechender Form aufgenommen werden. Prinzipiell können die Daten aus unterschiedlichen Quellen gewonnen werden:

- Ergebnisse von Sichtungen, Revisionen und Diagnosen
- Meldungen von Überwachungseinrichtungen
- Statistiken zur Beschreibung des Instandsetzungsbedarfes

Die Methodik der Auswertung dieser Datenquellen und die Klassifikation der Ergebnisse soll in den folgenden Abschnitten erklärt werden.

5.3.2 Ergebnisse von Sichtkontrollen, Revisionen und Diagnosen

Aus Sichtkontrollen, Revisionen und Diagnosen lassen sich wichtige Hinweise auf den Zustand der einzelnen dabei untersuchten Funktionseinheiten des individuellen Schalters gewinnen, da sie turnusmäßig durchgeführt werden und somit regelmäßige Rückmeldungen über den aktuellen Zustand an das Modell liefern, wo diese Ergebnisse mit der Zustandsprognose verglichen bzw. korrigierend eingebracht werden können. Leider sind die in noch kürzeren zeitlichen Abständen durchgeführten Begehungen häufig nicht dokumentiert, so dass diese nicht als Rückmeldung für das Modell dienen konnten.

In der Vergangenheit betrug der Zyklus für Revisionen für den Typ des ölarmen Schalters abhängig von Betreiber und Standort des Leistungsschalters zumeist 4 bis 6 Jahre. Jede dritte Revision wurde als große Revision durchgeführt, die mit aufwendigeren Kontrollen und einigen zusätzlichen routinemäßigen Eingriffen (z.B. Austausch des Hydrauliköls bei hydraulischem Antrieb) einhergeht. Insgesamt ergeben sich somit für das betrachtete Schalterkollektiv etwa 900 Revisionen. Bei den betrachteten SF₆-Schaltern wurden Zyklen von 6 Jahren für Sichtkontrollen bzw. 12 Jahren für kleine Revisionen und 24 Jahre für große Revisionen eingeführt, so dass hier – auch wegen der deutlich kleineren Zahl der Betriebsjahre – weniger als 100 Sichtkontrollen und Revisionen durchgeführt wurden.

Für den ölarmen Schaltertyp lagen etwa 140 Revisionsprotokolle zur Auswertung vor. Hinzu kamen Listen mit den Daten durchgeführter Revisionen und Instandsetzungen. Letzgenannte Listen wurden dahingehend untersucht, wie oft die durchgeführten Revisionen zu Beanstandungen führten, die eine Instandsetzung zur Folge hatten. Dabei ergab sich, dass kaum mehr als 5 % der Revisionen zu einer nachfolgenden Instandsetzung führten. Daraus folgt, dass weniger als ein Drittel des dokumentierten Instandsetzungsbedarfs durch Revisionen ermittelt wird oder, mit anderen Worten, die weitaus größere Zahl der Instandsetzungen offensichtlich aufgrund anderer Aufdeckung des Bedarfes, z.B. nach Begehungen, aufgrund von Warn- oder Fehlermeldung oder (in seltensten Fällen) aufgrund aufgetretener Störungen initiiert wurde.

Zu bedenken ist allerdings, dass routinemäßige vorgesehene Eingriffe, wie das Wechseln einiger Dichtungen und Membranen während einer Revision, nicht als Instandsetzungsmaßnahmen aufgeführt wurden. Der Vergleich aller aus den Revisionsprotokollen detektierter Instandsetzungen mit den Instandsetzungslisten zeigte zudem, dass nicht jede Instandsetzung während einer Revision auch als solche gelistet wurde. Einige kleinere Instandsetzungen, wie das Austauschen von defekten Schutzschläuchen für Steuerleitungen, das Entrosten von Dichtungsflächen oder das Nachfüllen von Stickstoff werden offensichtlich häufig als zu geringfügig betrachtet, um diese Arbeiten als „echte“ Instandsetzungen in die Liste zu übernehmen. Da sich in den Listen der Instandsetzungen aber durchaus auch vergleichbare Arbeiten finden, muss angenommen werden, dass die Zahl der tatsächlichen Instandsetzungen etwas höher ist als dokumentiert. Leider stand nur ein Teil der Revisionsprotokolle zur Auswertung zur Verfügung, so dass hierzu keine verlässlichen Zahlen ermittelt werden konnten.

Da sich zudem im Nachhinein nicht mehr für jeden Fall die Notwendigkeit der zusätzlich „entdeckten“ Instandsetzungen beurteilen lässt und weil nur Protokolle der jüngeren Revisionen betrachtet wurden, wurde auf eine Aufnahme der zusätzlichen Instandsetzungen in die Liste der in die Statistik einflussenden Instandsetzungen (siehe Abschnitt 6.1) verzichtet, um eine möglicherweise falsche Häufung von Instandsetzungen während der letzten Betriebsjahre zu vermeiden.

Warum der Anteil des bei Revisionen entdeckten Instandsetzungsbedarfes dennoch verhältnismäßig gering ist, kann bei einer detaillierten Betrachtung der Instandsetzungsarbeiten erklärt werden. Sie zeigt, dass die überwiegende Anzahl der Instandsetzungen auf Öl- oder Stickstoffleckagen im Antrieb zurückgeht, die typischerweise auch bei Begehungen (Ölleckagen) oder durch Warnmeldungen (Druckwächter) detektiert werden können. Bei Revisionen wird hingegen an solchen Einheiten des Leistungsschalters überdurchschnittlich viel instandgesetzt, an denen eine vorsorgliche Instandsetzung sinnvoll ist. Hierzu gehört vor allem das Entrosten und Einfetten von Dichtflächen, der Austausch beschädigter Schutzschläuche für Steuerleitungen und in einigen Fällen der Austausch der Schaltkontakte, wenn diese abgebrannt oder beschädigt sind. Bild 5.5 belegt die Unterschiedlichkeit der während Revisionen durchgeführten Instandsetzungen gegenüber der Gesamtheit der erfassten Instandsetzungen für den Typ des ölarmen Schalters.

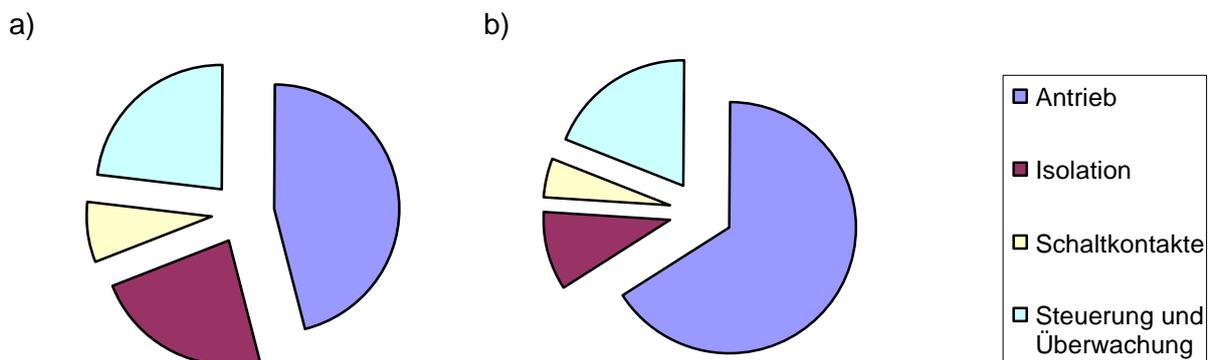


Bild 5.5 Verteilung der Instandsetzungsarbeiten
a) während (und nach) Revisionen und
b) aller erfassten Instandsetzungen
auf die Einheiten des Leistungsschalters Siemens H800/H801(E)

Während der weitaus größte Teil der insgesamt ausgeführten Instandsetzungen (rund 66%) den Antrieb der Schalter betraf, beträgt er bei dem während Revisionen detektierten Instandsetzungsbedarf anteilmäßig deutlich weniger (46%). Dafür ist der Anteil der Instandsetzungen an Isolierraum, Schaltkontakten und Steuerung überdurchschnittlich hoch.

Wie eingangs dieses Abschnitts bereits festgestellt, haben Revisionen über die Aufdeckung von Instandsetzungsbedarf hinaus noch eine wichtige Rolle im Sinne der Überprüfung bzw. ggf. Korrektur des vom Modells vorhergesagten Zustands einzelner Einheiten des Schalters. So kann z.B. die Notiz „Schaltstücke ggf. bei nächster Revision austauschen“ als Hinweis

auf eine festgestellte deutliche Abnutzung gewertet werden. Leider sind Notizen wie die genannte in Revisionsprotokollen selten. Die Aussagekraft der in Revisionsprotokollen angegebenen Ergebnisse von Messungen der Durchschlagsspannung des Isolieröls oder der Länge des Schaltstiftkopfes als Maß für eine zu erwartende Störung in Folge einer Abnutzung wurden zudem vom zuständigen Betriebspersonal der Netzbetreiber in Zweifel gezogen, da in der Vergangenheit stets frühzeitig ein Austausch erfolgte, sobald erhöhte Wahrscheinlichkeiten für eine Funktionsbeeinträchtigung angenommen wurden. Dennoch ist der Wert eines Revisionsprotokolls für den Abgleich des Zustandsmodells angesichts der geringen Anzahl von während der Betriebszeit eingehenden Hinweisen auf den Zustand des Schalters von großer Bedeutung.

5.3.3 Meldungen von Überwachungseinrichtungen

Diese können, z.B. in Form eines Dichtewächters im Isolierraum, eines Druckwächters für die Antriebshydraulik oder einer Selbstüberwachung für den Bereich Steuerung und Überwachung wertvolle Hinweise auf den Zustand des Schalters liefern. Allerdings unterliegen auch Überwachungseinrichtungen einer Störanfälligkeit, so dass eine Fehlermeldung nicht selten auch auf eine Störung der Sekundärtechnik zurückgeht.

Leider lässt sich aus den Instandsetzungsprotokollen nur selten erkennen, ob eine Warn- bzw. Fehlermeldung einer Überwachungseinrichtung vorausging. Das Eintreffen einer solchen Meldung muss aus Sicherheitsgründen jedoch immer zur baldigen Überprüfung der entsprechenden Einheit vor Ort führen. Für das Modell bedeutet dies, dass nur das Nicht-Vorliegen einer Meldung als Hinweis (auf das Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfs) gewertet werden kann. Das Vorliegen einer Meldung führt in jedem Fall, unabhängig vom prognostizierten Zustand, zur Überprüfung der Einheit vor Ort, eine Berücksichtigung im Modell erübrigt sich.

5.3.4 Ermittlung der statistischen Verteilung der Instandsetzungen

Allgemein gesprochen ist eine Instandhaltungsmaßnahme, d.h. eine Revision oder zumindest eine Inspektion, immer dann zu empfehlen, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass ein **Instandsetzungsbedarf** am Betriebsmittel besteht, größer ist als eine tolerierbare Grenze. Diese Grenze ergibt sich nicht nur aus rein technischen oder wirtschaftlichen Betrachtungen, z.B. auf Grund einer Vorgabe einer angestrebten Mindestverfügbarkeit des Betriebsmittels, sondern auch durch rechtliche Vorgaben z.B. aus dem Umweltschutzrecht oder zum Schutze von Personen. Aus diesem Grund sind auch solche Instandsetzungen in diese Statistik einzubeziehen, deren Unterlassen nicht oder nur über einen langen Betrachtungszeitraum zu einem Verlust der Funktionsfähigkeit geführt hätte, wie z.B. die Abdichtung geringfügiger Ölleckagen. Die tolerierbare Grenze wird bei verschiedenen Netzbetreibern voneinander abweichen und sich auch, abhängig z.B. von der Bedeutung des Betriebsmittels (siehe systembezogene Einflüsse in Bild 3.1), von Gerät zu Gerät unterscheiden. Es ist deshalb in diesem Bericht nicht möglich, eine einheitlich sinnvolle Grenze zu benennen.

Mit korrekten Daten ausreichender Quantität aufgefüllt, sind solche Statistiken geeignet, die Entwicklung der Wahrscheinlichkeit eines Instandsetzungsbedarfs am Schalter oder besser an einer Funktionseinheit des Schalters zu beschreiben, solange an der betrachteten Einheit selbst kein Zustand verändernder Eingriff geschieht. Zu beachten sind mögliche Abhängigkeiten vom Alter der Funktionseinheit sowie von Umgebungsbedingungen (elektrisch und klimatisch), sofern diese von denen des Kollektivs bekanntermaßen abweichen. Die Frage der Quantifizierbarkeit solcher Abhängigkeiten ist jedoch stets mit der Betrachtung entsprechend großer Kollektive verbunden, was im Rahmen dieses Vorhabens zumindest in der Frage der Umgebungsbedingungen nicht gegeben war.

Von den anfänglichen Plänen, Störungsstatistiken heranzuziehen, um durch deren Auswertung zu optimierten Instandhaltungsterminen zu gelangen, wurde aus zwei Gründen Abstand genommen:

- Wie bereits angesprochen, sind nicht nur technische Betrachtungen bei der Feststellung eines Instandsetzungsbedarfs zu betrachten. Vielmehr müssen auch alle Instandsetzungen berücksichtigt werden, die aus rechtlichen Gründen (Personen- und Umweltschutz) rechtzeitig ausgeführt werden müssen.
- Bei der Auswertung der Störungsstatistik muss bedacht werden, dass das Störungsgeschehen der Vergangenheit durch die angewandte Instandhaltungsstrategie beeinflusst wurde. So kann z.B. der vorsorgliche, zyklische Austausch einzelner Komponenten dazu führen, dass bestimmte Störungen im Betrieb gar nicht auftreten. Deshalb müssten die „verhinderten Störungen“ aufgrund durchgeführter Vorsorgemaßnahmen ermittelt und datiert werden. Letzteres ist jedoch nur mit groben Schätzungen möglich, da das Stadium der Abnutzung sich meist schlecht quantifizieren lässt. Eine Revision soll in jedem Fall rechtzeitig vorher durchgeführt werden, um das Auftreten einer Störung zu vermeiden.

Stattdessen wurden alle von den Netzbetreibern erfasste Instandsetzungen dahingehend ausgewertet, ob sie einen notwendigen „Instandsetzungsbedarf“ befriedigten und wann dieser voraussichtlich aufgetreten ist. Hierzu wurden alle gelisteten Instandsetzungen nach folgender Einteilung klassifiziert:

Klasse 1A:

Instandsetzungen, die einer Störungsbehebung an der Schaltkammer oder am Antrieb dienten. Der Schalter war zuvor nicht funktionsfähig. Die Störung trat vermutlich alterungs- bzw. abnutzungsbedingt ein.

Klasse 1B:

Instandsetzungen an er Schaltkammer oder am Antrieb, die vorbeugend vorgenommen wurden, d.h. einen Mangel behoben, der ohne Eingriff zu einer Störung geführt hätte. Der Schalter war noch funktionsfähig. Der Mangel trat vermutlich alterungs- bzw. abnutzungsbedingt ein.

Klasse 2:

Instandsetzungen, die die Sekundärtechnik (Steuerung und Überwachungseinrichtungen) betrafen. Zumeist handelt es sich hier um den Austausch defekter Bauteile, in selteneren Fällen um vorbeugende Maßnahmen, wie z.B. den Austausch eines Schutzschlauches. Defekte oder Störungen der Sekundärtechnik führen nicht immer auch zum Verlust der Funktionsfähigkeit des Schalters, sondern werden teilweise rechtzeitig durch Stör- oder Warnmeldungen erkannt.

Klasse 3:

Instandsetzungen, die Ölundichtigkeiten am Antrieb oder (in seltenen Fällen) an der Schaltkammer betrafen (nur ölarmer Schalter des Typs Siemens H800/H801). Eine Beeinträchtigung der technischen Eigenschaften oder der Funktionsfähigkeit des Schalters durch Ölundichtigkeiten ist im Betrieb in der Regel nicht zu erwarten, da es im Falle eines größeren Ölverlustes zu einer Warnmeldung des Druck- bzw. Dichtewächters kommt.

Klasse 4:

Instandsetzungen, die nach Stickstoff-Druckverlust (im Antrieb) lediglich das Wiederauffüllen des N₂-Speichers zur Folge hatten. Es erfolgt kein Austausch von Teilen.

Bei Klasse 5:

Alle anderen Instandsetzungen, insbesondere solche, die Mängel betrafen, die offensichtlich nicht alterungs- bzw. abnutzungsbedingt eintraten (Fertigungsfehler, Materialfehler, äußere Einflüsse wie z.B. Steinwurf, betriebsbedingter Austausch von Komponenten z.B. bei Umstellung der Spannungsversorgung für Sekundärtechnik).

Klasse 6:

Instandsetzungen, deren Art und Inhalt nicht bekannt sind, die aber gelistet und datiert wurden.

Für die in das Modell eingeflossene Statistik wurden alle Instandsetzungen der Klassen 4 bis 6 nicht berücksichtigt. Die Gründe hierfür sind

- für Klasse 4:
dass das reine Wiederauffüllen des Stickstoffspeichers nicht als Instandsetzung im Sinne einer notwendigen Maßnahme zum Erhalt der Funktionsfähigkeit des Schalters bewertet wurde. Über den Druckwächter wird im Falle eines größeren Druckverlustes rechtzeitig vor Verlust der Funktionsfähigkeit eine Warnmeldung generiert, die zu einer Vor-Ort-Überprüfung und ggf. zu einer Instandsetzung (mit Austausch von Dichtungen etc.) führt.
- für Klasse 5:
dass der Instandsetzungsbedarf aufgrund nicht alterungs- oder abnutzungsbedingter Mängel als rein stochastisch betrachtet werden muss: Fertigungs- oder Materialfehler werden bei gehäuftem Auftreten vom Hersteller beseitigt und tauchen bei Produktionsreihen späterer Baujahre nicht mehr auf; äußere Einflüsse wie Steinwurf oder andere Beschädigungen sind nicht vorhersagbar; bei betriebsbedingtem Austausch von

Komponenten entscheidet allein der Netzbetreiber ob, wann und mit welcher Dringlichkeit der Austausch stattfindet.

- für Klasse 6:
dass es bei diesen Fällen nicht möglich war, die Notwendigkeit der Maßnahme zu überprüfen und sie einer Funktionseinheit zuzuordnen.

Hinsichtlich der Datierung wurde angenommen, dass nahezu alle Instandsetzungen der Klassen 1 bis 3 eben dann vorgenommen wurden, wenn sie notwendig waren. Diese Vereinfachung erschien sinnvoll, da aus den Bemerkungen zu den Instandsetzungsarbeiten in der Regel nicht die Dringlichkeit abzulesen war. Es kann angenommen werden, dass ein Teil der Maßnahmen früher als notwendig ausgeführt wurde (z.B. als Präventivmaßnahme bei Revisionen oder im Anschluss an Begehungen), andere Mängel jedoch erst spät bemerkt und deshalb später als wünschenswert beseitigt wurden (z.B. nach Störungseintritt). Unterstellt man eine gleichmäßige Streuung beiderseits des Ausführungstermins, ist die getroffene Annahme gerechtfertigt. Lediglich bei einigen Instandsetzungen der Klasse 1B wurde das Datum des Instandsetzungsbedarfs nach hinten korrigiert (z.B. bei präventivem Isolierölwechsel wegen reduzierter Durchschlagsspannung während einer Revision).

Die Datierung der Instandsetzungsmaßnahme wurde genutzt, um zusammen mit dem Baujahr des betroffenen Schalters die Häufigkeitsverteilung des Instandsetzungsbedarfs abhängig vom Alter zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Klassifikation und die Häufigkeitsverteilungen finden sich im Abschnitt 6.1 dieses Berichtes.

Routinemäßig stattfindende Instandsetzungen während der Revisionen, die nur teilweise dokumentiert wurden, wurden nicht in die Auswertung einbezogen. Ihre (zeitliche oder belastungsabhängige) Notwendigkeit muss in weiteren Gesprächen mit den Herstellern geklärt werden. Bild 5.6 gibt einen Überblick über die Verfahrensweise zur Klassifizierung der Daten.

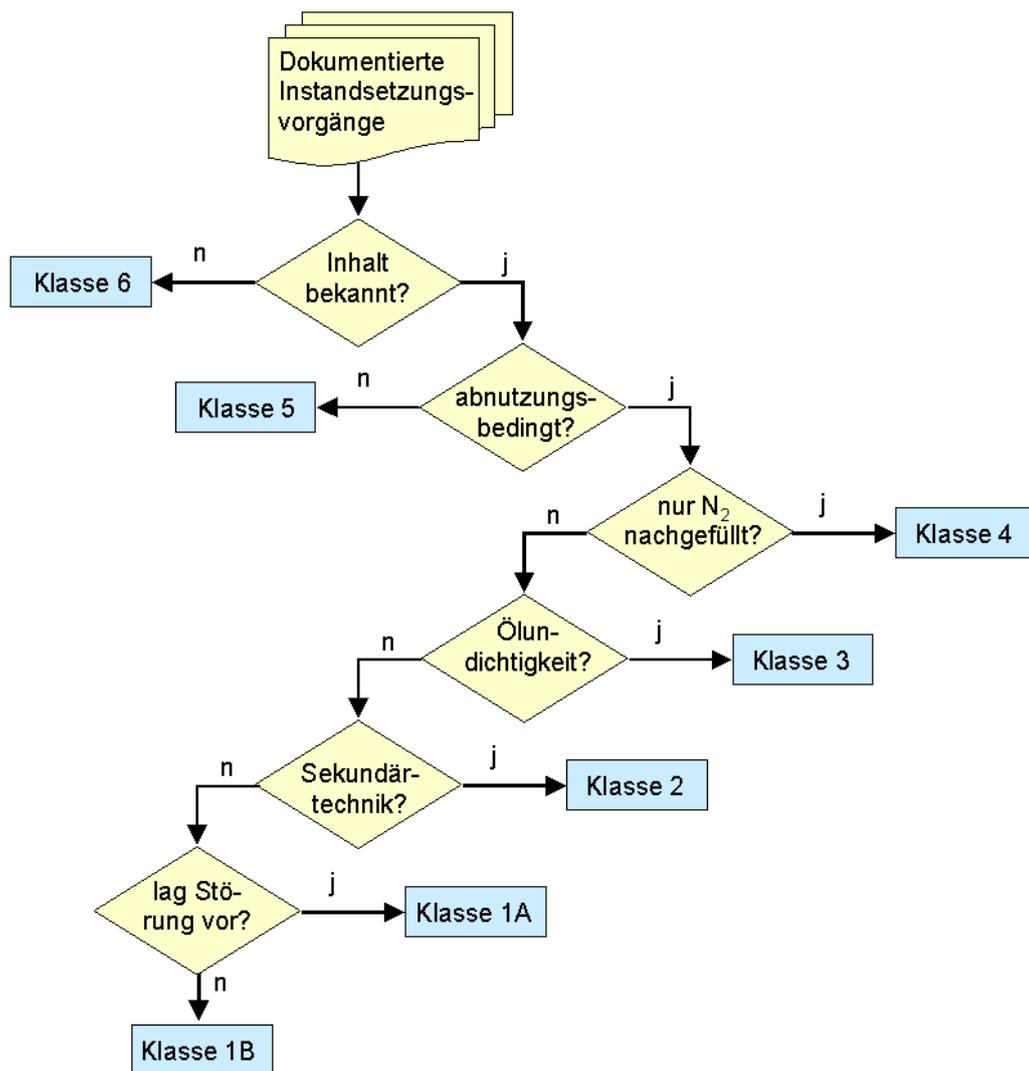


Bild 5.6 Flussdiagramm zur Klassifizierung der dokumentierten Instandsetzungsmaßnahmen

5.4 Modellbildung

5.4.1 Evidenztheorie

Wie bereits im Abschnitt 4.3 erwähnt, wurde für die Modellbildung die Evidenztheorie gewählt, die eingehend in [7,12,13] beschrieben wird. Hier sollen die Grundlagen nur in der gebotenen Kürze dargestellt werden.

Die Evidenztheorie kann als eine Verallgemeinerung der klassischen (Bayes'schen) Wahrscheinlichkeitsrechnung betrachtet werden und bietet ein mathematisches Modell für plausible Schlüsse durch Bestätigung oder Widerlegung von Aussagen (sog. Hypothesen) mittels einer Berücksichtigung eingehender Hinweise. Im Gegensatz zur klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie kennt die Evidenztheorie dabei zwei Wahrscheinlichkeitsmaße, nämlich den Glaubensgrad *Bel* (degree of belief) und den Plausibilitätsgrad *Pl* (degree of plausibility), wobei der erste stets kleiner ist als der zweitgenannte:

$$Bel(A) \leq Pl(A) \quad (5.1)$$

Ein Vorzug der Evidenztheorie für die Anwendung im Zustandsmodell ist, dass im Gegensatz zur klassischen Wahrscheinlichkeitslehre hier ein schwacher Hinweis für ein Ereignis nicht als starker Hinweis auf das Gegenereignis gedeutet wird. Das wiederum bedingt, dass die Summe der Glaubensgrade für ein Ereignis und das zugehörige Gegenereignis nicht identisch eins betragen muss. Vielmehr gilt, dass ein Hinweis für ein Ereignis lediglich die Möglichkeit und damit die Plausibilität für das Gegenereignis einschränkt. Nennt man das zu einem Ereignis A zugehörige Gegenereignis \bar{A} , so gilt also:

$$Pl(\bar{A}) = 1 - Bel(A) \quad (5.2)$$

Die Differenz zwischen Plausibilitätsgrad und Glaubensgrad entspricht der Unwissenheit. Je weniger verlässlich die vorliegenden Hinweise sind, desto größer ist die Unwissenheit. Jeder weitere Hinweis auf das Ereignis oder Gegenereignis (oder beides im Falle eines widersprüchlichen Hinweises) verringert die Unwissenheit. Treffen ausreichend viele Hinweise ein, so geht die Unwissenheit gegen Null, und die Summe der Glaubensgrade gegen eins. Die Menge aller möglichen Aussagen wird Betrachtungsrahmen Θ genannt. Die Menge aller möglichen Teilmengen T von Θ besteht dann aus 2^{Θ} Elementen. Besteht die Grundmenge aller Hypothesen z.B. aus 2 Elementen

$$X = \{A, B\} \quad (5.3)$$

so beinhaltet der Betrachtungsrahmen

$$\Theta = A \times B = \{(a, b), (a, \bar{b}), (\bar{a}, b), (\bar{a}, \bar{b})\} \quad (5.4)$$

und die 16 möglichen Teilmengen werden beschrieben durch

$$T = \{\emptyset, (a), (b), (\bar{a}), (\bar{b}), (a, \bar{a}), (b, \bar{b}), (a, b), (a, \bar{b}), (\bar{a}, b), (\bar{a}, \bar{b}), (a, \bar{a}, b), (a, \bar{a}, \bar{b}), (a, b, \bar{b}), (\bar{a}, b, \bar{b}), \Theta\} \quad (5.5)$$

Alle Aussagen der Menge Θ , die einen positiven Glaubensgrad besitzen, werden *fokale Elemente* genannt, die zugehörigen Glaubensgrade für exakt die angegebene Menge *Massezahlen* m

$$m \in [0, 1] \quad (5.6)$$

$$\text{mit } \sum_{T \subseteq \Theta} m(T) = 1 \quad (5.7)$$

Für den Glaubensgrad eines Ereignisses A gilt, dass er sich aus der Summe der Massezahlen für alle Teilmengen von A ergibt

$$Bel(A) = \sum_{T \subseteq A} m(T) \quad (5.8)$$

und für den Plausibilitätsgrad des Ereignisses A, dass er gleich ist der Summe der Massezahlen jener Teilmengen, die eine gemeinsame, nichtleere Schnittmenge mit A haben

$$Pl(A) = \sum_{T \cap A \neq \emptyset} m(T) \quad (5.9)$$

Vorzugsweise wird die Evidenztheorie in solchen Fällen eingesetzt, in denen das Eintreffen mehrerer Hinweise, möglicherweise auch widersprüchlicher Hinweise erwartet wird. Die resultierenden Massezahlen werden dann aus den Massezahlen der einzelnen Hinweise mit Hilfe der *Dempster'schen Regel* ermittelt. Das Verknüpfen zweier Hinweise liefert hierbei

$$m_{1,2}(A) = m_1(A) \oplus m_2(A) = \frac{\sum_{T_1 \cap T_2 = A} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2)}{1 - \sum_{T_1 \cap T_2 = \emptyset} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2)} \quad (5.10)$$

Falls nacheinander n Hinweise mit der Dempsterschen Regel verknüpft werden müssen, sind die resultierenden Massezahlen $m_{1,\dots,n}$ gemäß

$$m_{1,\dots,n} = (\dots((m_1 \oplus m_2) \oplus m_3) \oplus \dots m_n) \quad (5.11)$$

zu berechnen. Die Reihenfolge, in der die kombinierten Hinweise miteinander verknüpft werden, ist hierbei unwesentlich. Dabei gilt, dass die Unwissenheit bezüglich einer Hypothese nach jeder weiteren Verknüpfung kleiner dem vorherigen Grad ist, d.h. die Summe der Glaubensgrade („Wissen“) wird durch jeden weiteren Hinweis vergrößert. Lediglich die Verknüpfung mit einem „leeren“ Hinweis (Massezahl der Unwissenheit gleich eins) führt korrekterweise zu keiner Veränderung der vorherigen Massezahlen.

Mit Hilfe der durch Gl. (5.10) ermittelten resultierenden Massezahlen werden ein neuer Evidenzkörper und daraus mit Hilfe von Gl. (5.8) neue Glaubensgrade definiert.

5.4.2 Anpassung an die Aufgabenstellung

Die mathematisch zunächst sehr komplexe Ausgestaltung der Regeln der Evidenztheorie vereinfacht sich, wenn wie in dieser Aufgabenstellung lediglich Hinweise zu einer Hypothese („Instandsetzungsbedarf“) eintreffen. Für unsere Anwendung soll das „positive“ Ereignis A lauten „Es besteht Instandsetzungsbedarf“ und das zugehörige Gegenereignis \bar{A} „Es besteht kein Instandsetzungsbedarf“.

Damit reduziert der Betrachtungsrahmen auf 2 Elemente

$$\Theta = \{A, \bar{A}\} \quad (5.12)$$

und die Zahl der möglichen Teilmengen auf $2^{|\Theta|}$ gleich 4

$$T = \{\emptyset, A, \bar{A}, \Theta\} \quad (5.13)$$

Der Glaubensgrad des Ereignisses ist gleich der Massezahl von A

$$Bel(A) = \sum_{T \subseteq A} m(T) = m(A) \quad (5.14)$$

und der Plausibilitätsgrad vereinfacht sich zu

$$Pl(A) = \sum_{T \cap A \neq \emptyset} m(T) = m(A) + m(\Theta), \quad (5.15)$$

wobei $m(\Theta)$ die Unwissenheit beschreibt. Entsprechend gilt für das Gegenereignis \bar{A}

$$Bel(\bar{A}) = m(\bar{A}) \quad (5.16)$$

$$Pl(\bar{A}) = m(\bar{A}) + m(\Theta), \quad (5.17)$$

Jeder Hinweis zeichnet sich demnach durch drei Massezahlen, nämlich

- $m(A)$ für das Ereignis „Es besteht Instandsetzungsbedarf“
- $m(\bar{A})$ für das Gegenereignis „Es besteht kein Instandsetzungsbedarf“
- $m(\Theta)$ und für die Unwissenheit

aus. Die Verknüpfung zweier Hinweise nach der Dempster'schen Regel vereinfacht sich hiermit zu

$$Bel_{1,2}(A) = m_{1,2}(A) = \frac{m_1(A) \cdot m_2(A) + m_1(A) \cdot m_2(\Theta) + m_1(\Theta) \cdot m_2(A)}{1 - (m_1(A) \cdot m_2(\bar{A}) + m_1(\bar{A}) \cdot m_2(A))} \quad (5.18a)$$

$$Bel_{1,2}(\bar{A}) = m_{1,2}(\bar{A}) = \frac{m_1(\bar{A}) \cdot m_2(\bar{A}) + m_1(\bar{A}) \cdot m_2(\Theta) + m_1(\Theta) \cdot m_2(\bar{A})}{1 - (m_1(A) \cdot m_2(\bar{A}) + m_1(\bar{A}) \cdot m_2(A))} \quad (5.18b)$$

$$m_{1,2}(\Theta) = \frac{m_1(\Theta) \cdot m_2(\Theta)}{1 - (m_1(A) \cdot m_2(\bar{A}) + m_1(\bar{A}) \cdot m_2(A))} \quad (5.18c)$$

Die mathematische Behandlung des Modells ist damit so überschaubar geworden, dass eine Umsetzung eines Prototyps mit jedem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm möglich ist. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die Umsetzung mit Microsoft Excel[®] ausgeführt.

Für den hier beschriebenen Anwendungsfall erscheint jedoch eine Modifikation des oben aufgeführten Regelwerks notwendig: Da ein Leistungsschalter während der Betriebszeit Abnutzung und Alterung erfährt, müssen auch alle Hinweise auf einen nicht-vorhandenen Instandsetzungsbedarf „altern“, die aus Informationsquellen stammen, die den Zustand nur zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben. Bis zum Eintreffen des nächsten, aktualisierten Hinweises aus der gleichen Informationsquelle muss die durch den ursprünglichen Hinweis reduzierte Unwissenheit allmählich wieder ansteigen, d.h. die Aussagekraft hinsichtlich des nicht-vorhandenen Instandsetzungsbedarfes (Massezahl $m_H(\bar{A})$) muss sich verringern.

Ein anschauliches Beispiel hierfür sind positive Ergebnisse einer Sichtkontrolle oder einer offline durchgeführten Diagnose. Je weiter solche Hinweise auf eine einwandfreie Funktion in der Vergangenheit liegen, desto geringer ist ihre Aussagekraft. Wie bereits weiter oben ausgeführt, ist jedoch ein (Wieder-)Anstieg der Unwissenheit nicht durch eine Verknüpfung mit einem weiteren Hinweis zu erreichen.

Deshalb wurde im Modell zusätzlich zu den oben erläuterten Regeln der Evidenztheorie noch eine zusätzliche Vereinbarung getroffen:

Das Modell berechnet den Zustand in diskreten Zeitschritten neu. Hinweise auf das Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfes müssen stets aktualisiert werden, bevor sie mit den anderen Hinweisen zu einer Gesamtaussage über den Zustand neu verknüpft werden.

Stammt der Hinweis aus einer Online-Überwachung (z.B. Dichtewächter), kann er unter Beachtung der Zuverlässigkeit der Überwachungseinrichtung und seiner Bedeutung für die Funktionseinheit stets als aktueller Hinweis übernommen und verknüpft werden.

Wurde der Hinweis aber aus einem Untersuchungsergebnis abgeleitet, das den Zustand nur zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Vergangenheit korrekt beschreibt, so wird der im Hinweis enthaltene Glaubensgrad für jeden neuen Zeitschritt des Modells durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor c verringert:

$$m(\bar{A}, t + \Delta t) = c \cdot m(\bar{A}, t) \quad (5.19)$$

mit $0 < c < 1$

Somit schrumpft die Aussagekraft einer zum Zeitpunkt t_0 durchgeführten Untersuchung exponentiell, nach n Zeitschritten des Modells beträgt sie:

$$m(\bar{A}, t_0 + n \cdot \Delta t) = c^n \cdot m(\bar{A}, t_0) \quad (5.20)$$

Da bei einem Hinweis auf nicht-vorhandenen Instandsetzungsbedarf zu jedem Zeitpunkt gilt

$$m(\ominus) = 1 - m(\bar{A}) = 1 - Bel(\bar{A}), \quad (5.21)$$

steigt die Unwissenheit aus diesem Hinweis im gleichen Maße wie der Glaubensgrad sich reduziert. Mit Gl. (5.15) erhöht sich mit der steigenden Unwissenheit auch die Plausibilität für einen Instandsetzungsbedarf mit fortschreitender Zeit wieder. Dies spiegelt die Wirklichkeit korrekt wider.

5.4.3 Wahl der Funktionseinheiten und Informationsquellen

Wie bereits ausgeführt, soll das in diesem Vorhaben entwickelte Zustandsmodell Aussagen über die Wahrscheinlichkeit eines Instandsetzungsbedarfes am Leistungsschalter liefern. Ein Instandsetzungsbedarf betrifft in der Regel nur einen Teilbereich des Leistungsschalters. Solche Teilbereiche können Funktionseinheiten zugeordnet werden. Aus diesem Grund werden die aus verschiedenen Informationsquellen stammenden Hinweise auf vorliegenden bzw. nicht-vorliegenden Instandsetzungsbedarf einzelnen Funktionseinheiten zugeordnet.

Abweichend von dem von Neumann [7] vorgeschlagenen und im Bild 4.6 dargestellten Modell wurde im Rahmen dieses Vorhabens aber darauf verzichtet, aus den Aussagen über einen möglichen Instandsetzungsbedarf einer jeden Funktionseinheit eine resultierende Aussage für den gesamten Leistungsschalter abzuleiten. Sinnvoller erschien es, für jede Funktionseinheit einen eigenen Grenzwert für die im Betrieb maximal tolerierte Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf und ggf. für eine maximal tolerierte Unwissenheit über deren Zustand zu definieren. Wird z.B. für den Antrieb diese Grenze überschritten, so ist eine intensive Zustandskontrolle (Revision) für diese Funktionseinheit erforderlich. Gegebenenfalls kann es sinnvoll sein, dann auch andere Funktionseinheiten instandzuhalten, für die die zulässigen Grenzwerte in absehbarer Zeit erreicht werden.

Eine Zusammenfassung der Aussagen über die einzelnen Funktionseinheiten zu einer Aussage über den Leistungsschalter als Ganzes liefert mit den ursprünglichen Regeln der Evidenztheorie keine sinnvollen Ergebnisse. Hier kann nämlich ein hoher Glaubensgrad für einen nicht-vorliegenden Instandsetzungsbedarf einer einzelnen Funktionseinheit dazu führen, dass für den gesamten Leistungsschalter eine (zu) günstige Zustandsbeschreibung erfolgt, obwohl eine andere Funktionseinheit eine kritische Grenze bereits überschritten hat und deshalb eine zumindest auf diesen Teil beschränkte Revision durchgeführt werden sollte. In [7] wurde deshalb eine Modifikation der Dempster'schen Regel für die Verknüpfung zu einer sinnvollen Gesamtzustands-Aussage eingeführt. Darauf wurde hier verzichtet, da eine getrennte Betrachtung der prognostizierten Zustände der einzelnen Einheiten ebenso

einfach zu realisieren ist und zudem den Vorteil der Möglichkeit einer Empfehlung eingeschränkter Revisionen beinhaltet.

Will man letztgenannten Vorteil nutzen, kommt der Bestimmung von sinnvollen, d.h. für eine Revision unterteilbaren Funktionseinheiten eine besondere Bedeutung zu. Die gewählte Unterteilung wird in der Übersicht der Funktionseinheiten und der zugehörigen Informationsquellen im Bild 5.7 erkennbar. Das Modell lässt sich aber ohne großen Aufwand um weitere Einheiten ergänzen, wenn dies für einen Netzbetreiber sinnvoll erscheint. Ebenso können die gewählten Funktionseinheiten

- Öldichtigkeit
- Antrieb
- Schaltkontakte
- Isolation und
- Steuerung und Überwachung

bei Bedarf weiter unterteilt werden. Hier ist neben einer geringfügigen Erweiterung des Modells lediglich die Splittung der zugehörigen Informationsquellen und im Fall der Informationsquelle Instandsetzungsbedarf-Statistik eine Aufteilung derselben erforderlich.

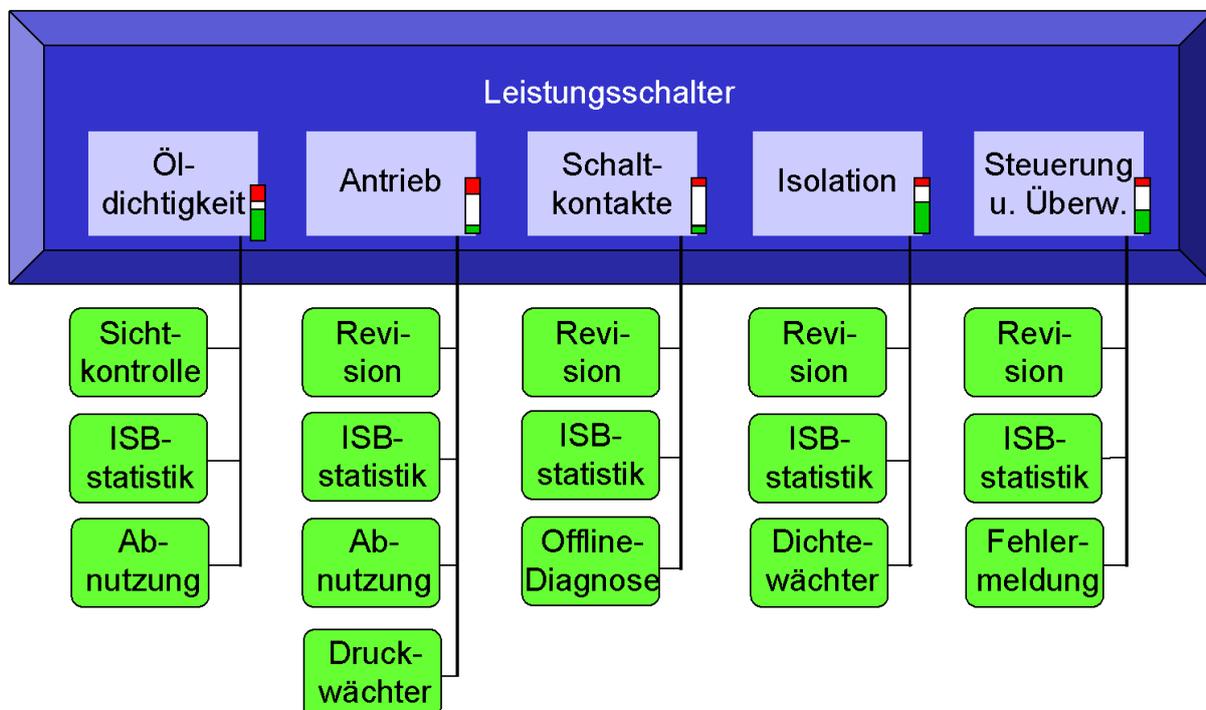


Bild 5.7 Gewähltes Modell mit seinen Funktionseinheiten und den zugehörigen Informationsquellen zur Zustandsbeschreibung (ISB = Instandsetzungsbedarf)

Es ist zu erkennen, dass eine zusammenfassende Zustandsbeschreibung für jede im Leistungsschalter integrierte Funktionseinheit getrennt erfolgt. Gegenüber dem in Bild 4.6 gezeigten, von Neumann [7] entwickelten Modell kennt das Modell deshalb auch keine Informationsquellen, die Hinweise über den Gesamtzustand des Leistungsschalters liefern. Stattdessen sind alle Informationsquellen direkt einer Funktionseinheit zugeordnet.

Während die Funktionseinheiten „Antrieb“, „Schaltkontakte“, „Isolation“ und „Steuerung und Überwachung“ nur im Zuge von Revisionen untersucht werden können, kann eine Öldichtigkeit auch während einer Begehung (Sichtkontrolle) festgestellt werden. Deshalb wurde „Öldichtigkeit“ als getrennte Einheit in das Modell eingeführt, und hierfür eine eigene, getrennte Statistik zur Ermittlung geeigneter Begehungszyklen geführt. Somit ist für die spätere Anwendung die notwendige Trennung der Ermittlung von Revisions- und Begehungszyklen möglich.

Jeder der Funktionseinheiten sind die Informationsquellen „Sichtkontrolle“ bzw. „Revision“ und „ISB-statistik“ (Instandsetzungsbedarfsstatistik) zugeordnet. Dabei berücksichtigt erstere die Ergebnisse aus Revisionen (bzw. Sichtkontrollen) zur jeweiligen Einheit. Wird bei einer Untersuchung kein Mangel festgestellt, so liefert diese Informationsquelle einen Hinweis mit einem hohen Glaubensgrad für einen nicht-vorliegenden Instandsetzungsbedarf. Wird ein Mangel, etwa „Schaltkontakte bei nächster Revision unbedingt messen und ggf. austauschen“ notiert, so kann beispielsweise daraus bereits ein kleiner Glaubensgrad für einen vorliegenden Instandsetzungsbedarf abgeleitet werden und (gleichzeitig) ein gegenüber einem einwandfreien Resultat verringerter Glaubensgrad für einen nicht-vorliegenden Instandsetzungsbedarf. Beachtet werden muss, dass der Glaubensgrad für nicht-vorliegenden Instandsetzungsbedarf aus dieser Informationsquelle in der Regel nur an einen bestimmten Zeitpunkt gebunden ist und deshalb von Zeitschritt zu Zeitschritt im Modell gemäß Gl. (5.19) verringert wird, wodurch die durch eine Revision verringerte Plausibilität für Instandsetzungsbedarf allmählich wieder ansteigt.

Die Informationsquelle „Instandsetzungsbedarfsstatistik“ liefert die auf das Alter des Schalters (oder, falls abweichend, der Funktionseinheit) bezogenen summierten Wahrscheinlichkeiten für einen Instandsetzungsbedarf. Abschnitt 6.1 erläutert, wie diese Größe ermittelt wird und welche Werte sie annimmt. Dieser Hinweis enthält nur einen „positiven“ Hinweis auf die Hypothese „Instandhaltungsbedarf“. Ein Glaubensgrad für das Gegenereignis „kein Instandsetzungsbedarf“ wird aus der Statistik nicht abgeleitet, lediglich die Plausibilität hierfür.

Überwachungseinrichtungen wurden für die Funktionseinheiten „Isolation“ (Dichtewächter), „Antrieb“ (Druckwächter) und „Steuerung und Überwachung“ (Fehlermeldung) als mögliche Informationsquellen zur Zustandsbeschreibung berücksichtigt. Solange sie keine Warnmeldung abgeben, liefern diese Informationsquellen einen Hinweis auf nicht-vorliegenden Instandsetzungsbedarf. Die Größe der zugehörigen Massezahl richtet sich nach dem Anteil der Instandsetzungen, die durch diese Überwachungseinrichtung rechtzeitig erkannt werden können, bezogen auf die Gesamtzahl der gezählten Instandsetzungen an dieser Einheit. Zahlen hierzu können aus den Statistiken des Instandsetzungsbedarfes abgeleitet werden

und sind im folgenden Abschnitt 5.4.4 angegeben. Ebenso wird die Zuverlässigkeit der Überwachungseinrichtung berücksichtigt, indem die Massezahl hiermit multipliziert wird.

Möglicher Bedarf für routinemäßig während Revisionen durchgeführte und in den Statistiken nicht aufgeführte Instandsetzungen wurden für den Antrieb und die Öldichtigkeit als Informationsquelle „Abnutzung“ eingebracht. An beiden genannten Funktionseinheiten werden während jeder Revision zustandsverbessernde Arbeiten in Form von Austausch von Dichtungen, bzw. Schmieren und Reinigen von beweglichen Teilen vorgenommen. Die Form und Höhe dieser „Abnutzung“ wird im Modell so bestimmt, dass nur bei einem weiterhin sechsjährigen Zyklus der Revisionen die Statistik für den Instandsetzungsbedarf unverändert bleibt, eine genaue Erläuterung findet sich im Abschnitt 6.1. An allen anderen Funktionseinheiten werden vergleichbare Eingriffe nicht oder nur in (wahrscheinlich) vernachlässigbarem Umfang routinemäßig (d.h. ohne besondere Kennzeichnung als Instandsetzung) ausgeführt. Daher wird für diese Einheiten auf eine solche Informationsquelle „Abnutzung“ im Modell verzichtet.

Schließlich wurde für die Funktionseinheit „Schaltkontakte“ noch eine weitere Informationsquelle „Offline-Diagnose“ im Modell hinzugefügt. Da Offline-Diagnosen, z.B. Weg-Zeit-Messungen oder dynamische Widerstandsmessungen (DRM) während Revisionen, an 123-kV-Schaltern sehr selten durchgeführt werden (für das in diesem Vorhaben betrachtete Schalterkollektiv sind keine solchen Messungen dokumentiert), ist der von ihr ausgehende Hinweis in der Regel „leer“, d.h. die Massezahl der Unwissenheit ist hierfür stets eins, wenn nicht ausdrücklich anders vermerkt. Dies führt zu einem gleichen resultierenden Zustand wie eine Betrachtung ohne diesen Hinweis, ein Ergebnis einer Diagnose kann aber hierüber jederzeit in das Modell eingebracht werden.

5.4.4 Wahl der Startwerte und Parameter

Die in den Abschnitten 6.2 und 6.3 gezeigten Ergebnisse des Modells umspannen jeweils den Zeitraum von der Installation des Schalters bis 30 Jahre danach. Dabei werden die vorliegenden Hinweise zum Feststellen eines Instandhaltungsbedarfs in festen Zeitschritten ggf. neu berechnet und danach verknüpft. So ergibt sich für jeden Zeitschritt eine Bewertung der Wahrscheinlichkeiten in einem „Balken“ wie im Bild 4.5 gezeigt, mit resultierenden Massezahlen zur Unterstützung der Hypothese „Instandsetzungsbedarf“, zu deren Widerlegung und zur Unwissenheit bezüglich dieser Hypothese.

Als Schrittweite wurde für das Modell 1 Jahr gewählt, d.h. es gibt für jedes Jahr nur eine Zustandsprognose. Eine Unterteilung in kleinere Schrittweiten ist aus mathematischer Sicht völlig unproblematisch, erfordert aber die Betrachtung größerer Kollektive, um für jeden Zeitschritt (entsprechend einem Altersabschnitt der betrachteten Schalter) eine ausreichend große Anzahl von Instandsetzungsvorgängen vorweisen zu können, um statistische Aussagen hieraus ableiten zu können. Zudem erscheint die Wahl eines Zeitschrittes von einem Jahr ausreichend genau, da eine Empfehlung für einen Revisionszeitpunkt aufgrund der überwiegend „weichen“ Zustandshinweise kaum auf einen engeren Zeitraum sinnvoll beschränkt werden kann. Zwar ließe sich das Überschreiten einer Toleranzgrenze beliebig

genau, z.B. auf einen Monat oder eine Woche genau, eingrenzen, der Wert einer entsprechenden Empfehlung, die Revision innerhalb eines solch kurzen Zeitraums durchzuführen, wäre jedoch anzuzweifeln.

Für die Initialisierung des Modells, d.h. die „Zustandsprognose“ für das Jahr der Inbetriebnahme (Jahr null) ist es wichtig, geeignete Startwerte für Hinweise der im Modell berücksichtigten Informationsquellen zu wählen. Für die Informationsquellen „Revision“ wurde angenommen, dass diese nach der Inbetriebnahme einen nahezu optimalen Zustand dokumentieren. Deshalb werden diese im Anfangszustand mit der Massezahl 95% für das Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfs entsprechend stark für alle Funktionseinheiten gewichtet. Die Informationsquellen „Revision“ liefern im Modell nur nach Revisionen einen neuen Hinweis. Die Massezahl für einen nicht-vorliegenden Instandsetzungsbedarf wird zwischen den Revisionen jährlich mit dem Faktor $c=0,8$ multipliziert. Die Verminderung der Gewissheit über das Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfes führt bei diesem Faktor zu einer Reduktion der Aussage um rund die Hälfte nach 3 Jahren (auf 48,6%), um rund 2/3 nach 5 Jahren (auf 31,1%) und um mehr als 8/9 nach 10 Jahren (auf 10,2%), wenn in diesem Zeitraum keine erneute Revision durchgeführt wird. Dies deckt sich gut mit Erfahrungswerten, weshalb diese Wahl des Faktors c sinnvoll erschien.

Wird eine große Revision durchgeführt, wird der ursprüngliche Startwert (95%) der Massezahl wieder hergestellt, wenn das Ergebnis ohne Beanstandung bleibt (ggf. nach notwendig erachteten Instandsetzungen). Ebenso nach jeder Instandsetzung an der entsprechenden Einheit. Nach einer kleinen Revision wird der Wert der Massezahl lediglich auf 90% erhöht.

Für die Funktionseinheit „Öldichtigkeit“ wurde abweichend vom oben genannten Wert ein Startwert von 90% für das Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfs angenommen, der jedoch nach jeder Sichtkontrolle (Begehung, Revision oder Instandsetzung) wieder hergestellt wird.

Ausgehend von den Ergebnissen der statistischen Auswertung und Klassifizierung der durchgeführten Instandsetzungen am betrachteten Schalterkollektiv wurde die Aussagekraft der Hinweise auf Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfes für den Dichtewächter des Isolierraums auf 20%, für den Druckwächter des Antriebs auf 33% und für die Fehlermeldungen der Selbstüberwachung der Sekundärtechnik auf 50% festgelegt. Dies berücksichtigt den Anteil der Instandsetzungen, die durch die jeweilige Überwachungseinrichtung erkannt werden können, an der Gesamtzahl der in die Statistik eingeflossenen Instandsetzungen an der entsprechenden Funktionseinheit. Weil die Hinweise aus Überwachungseinrichtungen kontinuierlich eintreffen, sind sie im Modell keiner „Alterung“ unterzogen. Allerdings werden sie in jedem Zeitschritt mit dem jeweiligen Faktor $(1-f_{sü})$ multipliziert, wobei $f_{sü}$ die aus der Statistik aufsummierte Wahrscheinlichkeit für Instandsetzungsbedarf im jeweiligen Betriebsjahr an der Funktionseinheit „Steuerung und Überwachung“ beschreibt. Diese Multiplikation soll die reduzierte Glaubwürdigkeit einbeziehen, die aus der Wahrscheinlichkeit für einen Fehler der Überwachungseinrichtung herrührt.

Die Informationsquellen „Instandsetzungsbedarfs-(ISB-)Statistik“ liefern aufsummierte, aus den erstellten Instandsetzungsstatistiken berechnete Werte jeweils abhängig vom Betriebsalter der Funktionseinheit. Daraus ergeben sich für jeden Zeitschritt Massezahlen für die Annahme (Glaubensgrad) eines Instandsetzungsbedarfes entsprechend den Regeln der Summierung von Wahrscheinlichkeiten. Startwert ist die Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf an der jeweiligen Einheit im ersten Betriebsjahr. Eine Rücksetzung auf den allein dem laufenden Betriebsjahr entsprechenden Wert erfolgt nach jeder Revision.

Prognoserechnungen aufgrund der schon im Abschnitt 4.3 diskutierten und auch bei Neumann [7] gezeigten Trendlinien können in diesem Modell entfallen, wenn Statistiken über den zu erwartenden Instandsetzungsbedarf und Prognosen für die Belastungen vorliegen. Ist dies der Fall, können damit für die Zukunft die resultierenden Aussagen für jede Funktionseinheit berechnet werden und somit die Prognosen erstellt werden. Selbstverständlich gelten diese Prognosen nur bis zur nächsten Revision oder bis ein von den Annahmen abweichender Hinweis festgestellt wird (z.B. Eintreffen einer Warnmeldung).

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Startwerte und Parameter für alle im Modell eingebrachten Hinweise.

Tabelle 5.1 Startwerte und Parameter für die im Modell eingebrachten Hinweise (ISB=Instandsetzungsbedarf), Massezahlen für Unwissenheit ergeben sich für jeden Zeitschritt aus $m(\text{Unwissenheit}) = 1 - m(\text{ISB}) - m(\text{kein ISB})$

¹⁾ $f_{\text{SÜ}}$: die aus der Statistik aufsummierte Wahrscheinlichkeit für Instandsetzungsbedarf im jeweiligen Betriebsjahr an der Funktionseinheit „Steuerung und Überwachung“

²⁾ nur wenn keine Warnmeldung vorliegt, sonst $m(\text{ISB})=(1-f_{\text{SÜ}})$, $m(\text{kein ISB})=0$

³⁾ kann bei bedeutender Abweichung der Belastung vom Kollektiv abweichen

⁴⁾ weicht ab, wenn Ergebnis einer Offline-Diagnose vorliegt

| Informationsquelle | Massezahl | Startwert m_0 | Entwicklung im n-ten Zeitschritt m_n | Rücksetzen erfolgt nach... |
|-----------------------------------|----------------------|--|---|---|
| Sichtkontrolle | $m(\text{ISB})$ | 0 | bleibt | - |
| | $m(\text{kein ISB})$ | 0,9 | $0,8 \cdot m_{n-1}(\text{kein ISB})$ | jeder Sichtkontrolle auf 0,9 |
| Revision | $m(\text{ISB})$ | 0 | bleibt | - |
| | $m(\text{kein ISB})$ | 0,95 | $0,8 \cdot m_{n-1}(\text{kein ISB})$ | großer Rev. auf 0,95; kleiner Rev. auf 0,9 |
| ISB-statistik | $m(\text{ISB})$ | P_0 | $P_n + m_{n-1}(\text{ISB}) - P_n \cdot m_{n-1}(\text{ISB})$ | Revision o. Instandsetzung auf P_n |
| | $m(\text{kein ISB})$ | 0 | bleibt | - |
| Dichtewächter | $m(\text{ISB})$ | $0^{2)}$ | bleibt | - |
| | $m(\text{kein ISB})$ | $0,2 \cdot (1-f_{\text{SÜ}})^{1) 2)}$ | jeweils aktualisiert | - |
| Druckwächter | $m(\text{ISB})$ | $0^{2)}$ | bleibt | - |
| | $m(\text{kein ISB})$ | $0,33 \cdot (1-f_{\text{SÜ}})^{1) 2)}$ | jeweils aktualisiert | - |
| Fehlermeldung | $m(\text{ISB})$ | $0^{2)}$ | bleibt | - |
| | $m(\text{kein ISB})$ | $0,5 \cdot (1-f_{\text{SÜ}})^{1) 2)}$ | jeweils aktualisiert | - |
| Abnutzung (Antrieb/Öldichtigkeit) | $m(\text{ISB})$ | siehe Abschnitt 6.1 ³⁾ | | Revision o. Instandsetzung |
| | $m(\text{kein ISB})$ | 0 | bleibt | - |
| Offline-Diagnose | $m(\text{ISB})$ | $0^{4)}$ | bleibt | Instandsetzung o. Diagnose |
| | $m(\text{kein ISB})$ | $0^{4)}$ | $0,8 \cdot m_{n-1}(\text{kein ISB})$ | Instandsetzung o. Diagnose |

6 Anwendung des Zustandsmodells

6.1 Statistiken zur Beschreibung des Instandsetzungsbedarfes

6.1.1 Ölarmer Leistungsschalter Siemens H800/H801(E)

Die bei den Netzbetreibern am untersuchten Schalterkollektiv ermittelten Instandsetzungsarbeiten wurden wie in Abschnitt 5.3.4 beschrieben in Klassen unterteilt und dahingehend bewertet, welche aufgrund von Alterung oder betrieblicher Abnutzung notwendig wurden. Zudem wurden die Arbeiten den in Abschnitt 5.4.3 genannten Funktionseinheiten zugeordnet, um den statistisch zu erwartenden Instandsetzungsbedarf zu ermitteln. Tabelle 6.1 zeigt das Ergebnis der Klassifizierungen für den ölarmer Leistungsschalter Siemens H800/801(E) im Überblick, Tabelle 6.2 gibt die Aufteilung der in die Statistik aufgenommenen Vorgänge auf die Funktionseinheiten wider. Eine Aufteilung der Statistiken getrennt nach den drei zusammengefassten Schaltertypen H800, H801 und H801E erschien nicht sinnvoll, da auf Grund der dann zum Teil zu kleinen Zahlen der Instandsetzungsvorgänge eine Aussagekraft der Statistiken nicht mehr gegeben gewesen wäre.

Tabelle 6.1 Ergebnis der Klassifizierung der in der Statistik berücksichtigten Instandsetzungen für den Schalter Siemens H800/H801(E)

| Funktionseinheit | Störung/Defekt | vorbeugend |
|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Antrieb | Klasse 1A: 14 Vorgänge | Klasse 1B: 27 Vorgänge |
| Isolation | | |
| Schaltkontakte | | |
| Steuerung u. Überwachung | Klasse 2: 36 Vorgänge | |
| Öldichtigkeit | Klasse 3: 90 Vorgänge | |
| - (nur Stickstoffnachfüllung) | Klasse 4: 30 Vorgänge | |
| - (nicht abnutzungsbedingt) | Klasse 5: 15 Vorgänge | |
| - (Inhalt nicht benannt) | Klasse 6: 6 Vorgänge | |

Insgesamt wurden nur 164 der 167 Vorgänge der Klassen 1 bis 3 für die Statistik gewertet, da eine Auswertung über das 30. Betriebsjahr hinaus wegen des geringen Umfangs des Kollektivs dieser Gruppe nicht sinnvoll erschien und deshalb einige Vorgänge, die ältere Schalter betrafen nicht gewertet werden konnten. Hiervon waren 2 Vorgänge der Klasse 1B und 1 Vorgang der Klasse 2 betroffen. Berücksichtigt man, dass sich die Anzahl der ausgewerteten Betriebsjahre wegen dieser Einschränkung um 338 auf 5.635 reduziert, so ergibt dies (in den ersten dreißig Betriebsjahren) eine durchschnittliche Zeitspanne von mehr als 34 Jahren zwischen zwei erforderlichen Instandsetzungen, die wahrscheinlich auf Alterungs- bzw. Abnutzungsvorgänge zurückzuführen sind. Das heißt, es war weniger als eine Instandsetzung pro Schalter in dem betrachteten Zeitraum erforderlich.

Tabelle 6.2 Ergebnis der Zuordnung der in der Statistik berücksichtigten Instandsetzungen auf die Funktionseinheiten

| Funktionseinheit | Störung/Defekt | vorbeugend | Summe | Anteil |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|---------------|
| Antrieb | 14 | 10 | 24 | 15% |
| Isolation | 0 | 5 | 5 | 3% |
| Schaltkontakte | 0 | 10 | 10 | 6% |
| Steuerung u. Überwachung | 27 | 8 | 35 | 21% |
| Öldichtigkeit | 0 | 90 | 90 | 55% |
| Summe | 41 | 123 | 164 | 100% |
| Anteil | 25% | 75% | 100% | |

Tabelle 6.2 lässt erkennen, dass der weitaus größte Teil der betrachteten Instandsetzungen durchgeführt wurde, bevor es zu einer Störung kam. Nur 25% der Instandsetzungen ging eine Störung bzw. ein Defekt eines Bauteils der Steuerung und Überwachung voraus. Letzteres führt nicht immer zum Verlust der Funktionsfähigkeit des Leistungsschalters, sondern beeinträchtigt zum Beispiel nur die korrekte Funktion einer Hydraulikpumpe, was dann wiederum zu einer Warnmeldung führt, noch bevor diese ausfällt (z.B. Pumpen-Langlauf). Der Löwenanteil der durchgeführten Arbeiten betraf bei diesem Schaltertyp Undichtigkeiten der Ölbehälter, vor allem der Ölhydraulik des Antriebs. Diese werden typischerweise bei Sichtkontrollen oder Begehungen entdeckt und noch vor der automatischen Generierung einer Warnmeldung (nur bei größerem Ölverlust) beseitigt. Dennoch wurde diese Gruppe der Instandsetzungen als wichtig erachtet, da unter Umständen wie weiter oben bereits erwähnt andere als technische Gründe für eine schnelle Beseitigung einer Ölundichtigkeit sprechen. Die restlichen Arbeiten entfallen vor allem auf die Einheiten „Steuerung und Überwachung“ sowie „Antrieb“ (21 % bzw. 15 % Anteil an der Gesamtzahl der Eingriffe), während an den Einheiten „Isolation“ und „Schaltkontakte“ nur sehr selten Eingriffe notwendig waren (3 % bzw. 6 % Anteil).

Für jede Einheit wurden alle Eingriffe dem jeweiligen Betriebsalter zugeordnet, um die Abhängigkeit der Anzahl der Eingriffe über das Alter darzustellen. Wie bereits erwähnt, wurde für das Modell ein Zeitschritt von einem Jahr gewählt, d.h. die Einteilung erfolgte nach ganzen Betriebsjahren. Dabei wurden der Einfachheit halber Kalenderjahre gewählt. Das Jahr der Inbetriebnahme wurde als Jahr null, das Kalenderjahr danach als Jahr eins usw. gezählt. Natürlich sind die Zahlen nur dann miteinander vergleichbar, wenn man die Anzahl der Eingriffe in jedem Jahr auf die Zahl der Schalter bezieht, die mit dem entsprechenden Betriebsjahr ausgewertet werden konnten. Bei der Erstellung der entsprechenden Zahlen zeigte sich, dass bedingt durch eine gewisse stochastische Verteilung und die geringe Anzahl der Vorgänge pro Betriebsjahr, die Anzahl der Vorgänge pro Jahr extremen Schwankungen unterworfen ist, die einer sinnvollen Prognose der Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf entgegenstehen.

Daher wurde neben der Ermittlung der relativen Häufigkeit gemäß der Gleichung

$$H(t_n) = \frac{Z_{ISB}(t_n)}{SZ(t_n)} \quad (6.1)$$

mit $Z_{ISB}(t_n)$: Zahl der Instandsetzungsvorgänge im Betriebsjahr n
und SZ : Zahl der ausgewerteten Schalter im Betriebsjahr n

eine geglättete Häufigkeit eingeführt, die sich gemäß Gleichung (6.2) unter Hinzuziehung der Zahlen für die beiden vorausgegangenen und die beiden nachfolgenden Jahre ergibt:

$$H(t_n) = \frac{Z_{ISB}(t_{n-2}) + Z_{ISB}(t_{n-1}) + Z_{ISB}(t_n) + Z_{ISB}(t_{n+1}) + Z_{ISB}(t_{n+2})}{SZ(t_{n-2}) + SZ(t_{n-1}) + SZ(t_n) + SZ(t_{n+1}) + SZ(t_{n+2})} \quad (6.2)$$

Selbstverständlich ist für das Betriebsjahr null und eins die Glättung mit Vorjahreszahlen nicht bzw. nur eingeschränkt möglich. Für diese beiden Jahre erfolgt die Glättung über Drei- bzw. Vierjahreszeiträume. Wegen der mit der Anzahl der Betriebsjahre sinkenden Anzahl der vorliegenden Betriebshistorien (die 227 ausgewerteten Schalter sind im Schnitt 25 Jahre alt) nimmt das Kollektiv in den Betriebsjahren 22 und höher ab. Schließlich wird es zu gering, um aussagekräftige Wahrscheinlichkeiten ableiten zu können. Deshalb wurde die Auswertung auf den Zeitraum null bis dreißig Betriebsjahre begrenzt (unter Einbeziehung des 31. und 32. Jahres für die Ermittlung der Häufigkeit für das 30. Jahr gemäß Gl. (6.2)). Bild 6.1 zeigt den ungeglätteten und geglätteten Verlauf für die Einheit „Öldichtigkeit“ im Vergleich.

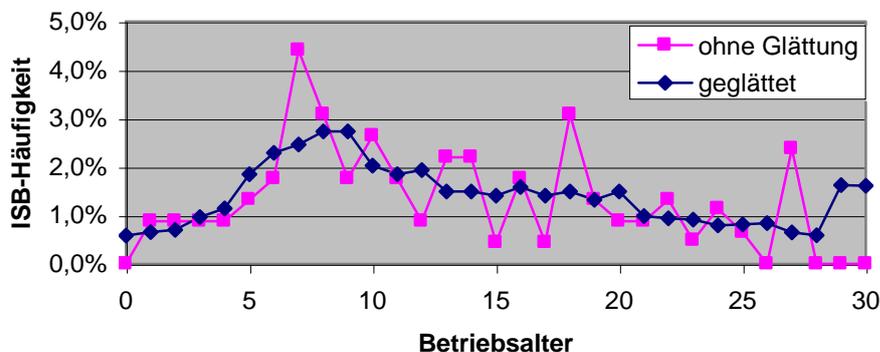


Bild 6.1 Bezogene Häufigkeiten für Instandsetzungsbedarf (ISB) an der Funktionseinheit „Öldichtigkeit“ abhängig vom Betriebsalter in Jahren ohne und mit Glättung

Aus dem Bild ist erkennbar, dass durch die Glättung eine deutliche Vergleichmäßigung eintritt, ohne dass die prinzipielle Charakteristik des Verlaufs über das Alter geändert wird. Der Anstieg der geglätteten Kurve zum Ende des betrachteten Zeitraums ist in der Einbeziehung weiterer Eingriffe im 31. Betriebsjahr begründet. Mit der Glättung wird auch eine mögliche Häufung zu typischen Revisionszeiten vermieden, der exakten Datierung der Notwendigkeit der Instandsetzung kommt eine geringere Bedeutung zu. Aus all den genannten Gründen wurde für das Modell für alle Einheiten eine Glättung der ISB-Statistik vorgenommen. Die Bilder 6.2 a) bis e) zeigen die ermittelten Verläufe abhängig vom Betriebsalter.

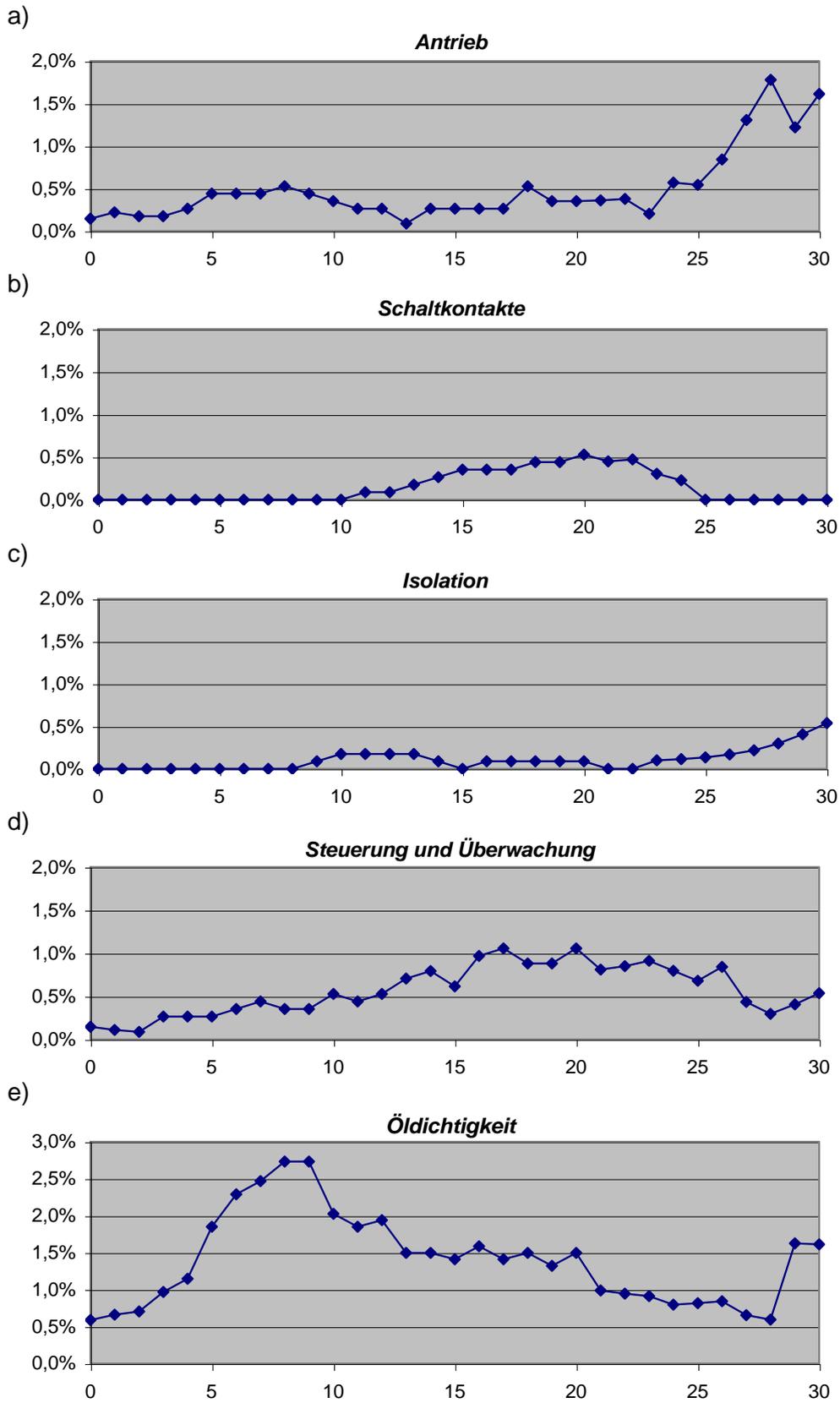


Bild 6.2 Bezogene Häufigkeiten für Instandsetzungsbedarf an den Funktionseinheiten des Schalters Siemens H800/801(E) aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren

Beim Vergleich der im Bild 6.2 gegebenen Verläufe ist zu beachten, dass für die Einheit „Öldichtigkeit“ wegen der Vielzahl der Eingriffe an dieser Einheit für die Darstellung der Häufigkeit eine Skalierung bis 3 % gewählt wurde, während für alle anderen Einheiten die Diagramme eine Skalierung bis 2% aufweisen.

Auffallend ist, dass bei der Einheit „Öldichtigkeit“ die Verteilung der Eingriffe eine Häufung zwischen dem fünften und zehnten Betriebsjahr aufweist und danach nahezu stetig abfällt. Hier scheint eine Schwäche der Dichtungen zu einer Undichtigkeit vorwiegend in diesem Zeitraum zu führen. Gegen einen systematischen Fehler spricht jedoch, dass an nur 90 der betrachteten 227 Schalter eine Undichtigkeit auftrat, und dass diese offensichtlich nach Beseitigung nur noch selten auftrat. Möglicherweise wurde auch nach anfänglich schlechten Erfahrungen mit den Dichtungen der Austausch einiger häufig beschädigter Dichtungen in die routinemäßig während der Revisionen durchzuführenden Arbeiten aufgenommen. Die Ursache für das ermittelte Verhalten konnte nicht abschließend geklärt werden.

Hingegen zeigt eine Betrachtung der anderen Einheiten, dass hier deutlich ein allmählicher Anstieg der Häufigkeiten der erforderlichen Eingriffe mit dem Alter zu verzeichnen ist. Bei den Einheiten „Antrieb“ und „Isolation“ ist zum Ende des betrachteten Zeitraums (30. Betriebsjahr) ein zunehmender Anstieg erkennbar, bei den Einheiten „Schaltkontakte“ und „Steuerung und Überwachung“ scheint es dagegen zwischen dem 25. und 30. Betriebsjahr wieder zu einem Absinken der Anzahl der Eingriffe zu kommen. Hier ist zu bedenken, dass das Kollektiv der betrachteten Schalter in diesem Zeitraum bereits recht klein ist, so dass stochastische Einflüsse die Aussagekraft solcher Ableitungen in Frage stellen. In der Summe der ersten vier dargestellten Einheiten ist aber eine nahezu stetige Zunahme der Zahl der Eingriffe mit dem Alter der Einheit recht gut zu erkennen, wie Bild 6.3 zeigt.

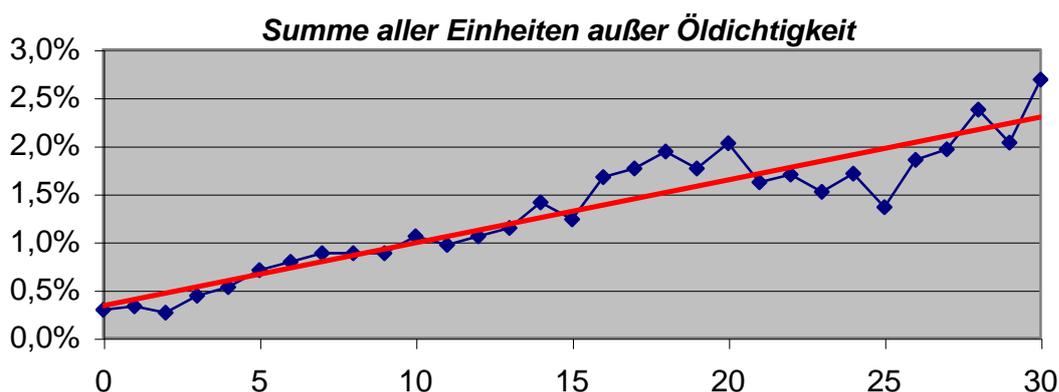


Bild 6.3 Bezogene Häufigkeit für Instandsetzungsbedarf für die Summe der Vorgänge an allen Funktionseinheiten des Schalters Siemens H800/801(E) außer der Einheit „Öldichtigkeit“ aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren
 blau = ermittelter, geglätteter Verlauf aus den erstellten Statistiken
 rot = Trendlinie (linear)

Diese Zunahme kann durch eine lineare Trendlinie (im Bild rot eingezeichnet) sehr gut angenähert werden. Da auf Grund der durchgeführten Klassifizierung der Instandsetzungen nur solche Vorgänge Berücksichtigung fanden, die vermutlich alterungs- oder abnutzungsbedingt notwendig wurden, und durch den Ausschluss der Vorgänge zur Einheit „Öldichtigkeit“ das betrachtete Kollektiv auf die technisch notwendigen beschränkt wurde, lässt sich dieses Ergebnis als Nachweis eines allmählichen Verschleißes der Einheiten mit dem Alter deuten. Ungeklärt bleibt, ob die Zunahme auch über den betrachteten Zeitraum hinaus linear verläuft oder möglicherweise bei Überschreiten eines „kritischen“ Alters in eine exponentielle Kurve übergeht. Hierzu fehlen Erfahrungswerte aus der Vergangenheit.

Für die im Modell benutzten „ISB-Statistiken“ wurden die tatsächlich ermittelten, geglätteten Kurven für jede Funktionseinheit gemäß Bild 6.2 verwendet. Dabei ist die genannte Statistik im Modell nur eine von jeweils mehreren Informationsquellen für Hinweise zum Zustand einer Funktionseinheit. Wenn man die Wahrscheinlichkeit aus dem statistisch ermittelten Instandsetzungsbedarf wie in Tabelle 5.1 dargestellt Jahr für Jahr als von anderen Hinweisen getrennten Hinweis betrachtet, führt dies mit den Regeln der Evidenztheorie dazu, dass der resultierende Glaubensgrad für einen Instandsetzungsbedarf von der statistisch ermittelten Wahrscheinlichkeit abweicht. Dies ist immer dann der Fall, wenn ein anderer, in der Aussage abweichender Hinweis mit dem aus der Statistik abgeleiteten gemäß der Dempster'schen Regel verknüpft wird. Dabei ist die Differenz zwischen resultierendem Glaubensgrad und aus der Statistik abgeleiteter Wahrscheinlichkeit umso größer, je größer die Massezahl für einen Glaubensgrad eines anderen Hinweises ist. Gemäß den Festlegungen in Abschnitt 5 liefern die Ergebnisse von ohne Beanstandung durchgeführten Revisionen Hinweise mit besonders hohem Glaubensgrad (für das Nichtvorhandensein eines Instandsetzungsbedarfs) im Jahr der Revision und den ersten Jahren danach und verändern somit die Ergebnisse in diesem Zeitbereich besonders deutlich.

Prinzipiell muss der Glaubensgrad nicht der Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf entsprechen. Für die Anschaulichkeit der Aussage der Zustandsprognose des Modells ist dies aber dienlich. Hinzu kommt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Instandsetzungsbedarfs zumindest für jene Einheiten, die während Revisionen routinemäßig Eingriffe erfahren (Antrieb und Öldichtigkeit) durch den Revisionszyklus wahrscheinlich beeinflusst wird: Häufige Revisionen, d.h. häufiges Austauschen von Dichtungen und Warten des Antriebs hat bei diesen Einheiten vermutlich eine Verringerung der Wahrscheinlichkeit eines Auftretens eines Instandsetzungsbedarfs zur Folge, seltenere Revisionen einen Anstieg. Deshalb wurde für diese beiden Einheiten ein weiterer Hinweis „**Abnutzung**“ eingeführt, der für jeden Revisionszyklus gerade so bemessen wurde, dass der Glaubensgrad am Ende des Zyklus gerade wieder der Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf entsprach. Die entsprechend ermittelten Werte sind in Tabelle 6.3 wiedergegeben, wobei hier für die Vergangenheit einheitlich ein fester Revisionszyklus von 6 Jahren angenommen wurde.

Tabelle 6.3 Ermittelte Werte für die Zunahme $\Delta m(t)$ der Massezahlen des Glaubensgrades für einen Instandsetzungsbedarf $m(\text{ISB})$ für die Funktionseinheiten „Antrieb“ und „Öldichtigkeit“ des Schalters Siemens H800/801(E)

| Betriebsalter | 0. bis 5. Jahr | 6. bis 11. Jahr | 12. bis 17. Jahr | 18. bis 23. Jahr | 24. bis 30. Jahr |
|---------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Antrieb | 0,00087 | 0,00118 | 0,00084 | 0,00127 | 0,00321 |
| Öldichtigkeit | 0,00342 | 0,00632 | 0,00443 | 0,00356 | 0,00292 |

Die Massezahl $m(\text{ISB})$ für den Hinweis aus der Informationsquelle „Abnutzung“ ergibt sich durch Aufsummierung dieser Werte vom Jahr der letzten Revision (oder Instandsetzung an der Einheit) bis zum Jahr der Betrachtung:

$$m(\text{ISB}, t_{\text{aktuell}}) = \sum_{t=t_{\text{Revision}}}^{t=t_{\text{aktuell}}} \Delta m(\text{ISB}, t) \quad (6.3)$$

Hierdurch wird ein stetig wachsender Offset als zusätzlicher Hinweis derart in das Modell eingebracht, dass bei unveränderten Revisionszyklen zu den Zeiten der Revision der resultierende Glaubensgrad gleich der Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf (ermittelt aus der Statistik) ist. Wird der Zyklus nun auf Grund einer (gegenüber der Vergangenheit) veränderten Instandhaltungsstrategie verlängert, so steigt für diese Einheiten der Glaubensgrad für einen Instandsetzungsbedarf über das aus der Statistik (der Vergangenheit) ermittelte Maß hinaus auf höhere Werte. Setzt man zum Beispiel für die Ermittlung der Revisionszyklen zukünftig das Erreichen eines höheren Glaubensgrades für Instandsetzungsbedarf als entscheidende Größe an, so führt die beschriebene Einführung der zusätzlichen Informationsquelle „Abnutzung“ dazu, dass auf Grund des (gegenüber der aus der Statistik abgeleiteten Wahrscheinlichkeit) erhöhten Glaubensgrades die Verlängerung geringer ausfällt als bei einer Betrachtung nur der Wahrscheinlichkeiten, die aus den Statistiken der Vergangenheit abgeleitet wurden. Bild 6.4 macht dies für die Funktionseinheit Antrieb deutlich.

In der Vergangenheit erfolgte die erste Revision (zumeist) nach sechs Jahren, für diesen Zeitpunkt sagt die Statistik eine Wahrscheinlichkeit von knapp 2 % für einen Instandsetzungsbedarf voraus, wenn noch keine Instandsetzung durchgeführt wurde. Die Kurve für den resultierenden Glaubensgrad wurde durch den zusätzlichen Hinweis der „Abnutzung“ bis zum sechsten Jahr soweit angehoben, dass auch sie zu diesem Zeitpunkt den gleichen Wert aufweist. Wählt man als Kriterium für eine Instandsetzung in Zukunft das Überschreiten der 3%-Grenze, so erhielte man bei der Berücksichtigung der aus den Statistiken der Vergangenheit abgeleiteten Werte die Empfehlung, die Revision im 9. Jahr nach Inbetriebnahme des Schalters durchzuführen, bei Berücksichtigung des (korrigierten) Glaubensgrades aber die Empfehlung dies schon nach 8 Jahren zu tun. Noch deutlich wird dies bei weiterer Erhö-

hung der Grenze. So überschreitet die Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf abgeleitet aus der Statistik erst nach 12 Jahren die 4%-Grenze, der korrigierte Glaubensgrad aber bereits nach 10 Jahren. Dies berücksichtigt die erhöhte Wahrscheinlichkeit für Instandsetzungsbedarf auf Grund der gegenüber der Vergangenheit reduzierten Wartungsarbeiten (Eingriffe während der Revisionen). Wie oben bereits ausgeführt, wäre der Effekt bei einer Senkung der zulässigen Grenze (z.B. für einen Schalter mit hoher Bedeutung im Netz) genau umgekehrt. Die eingeführte „Abnutzung“ bewirkt also stets eine Korrektur hin zu den „alten“ Revisionszyklen.

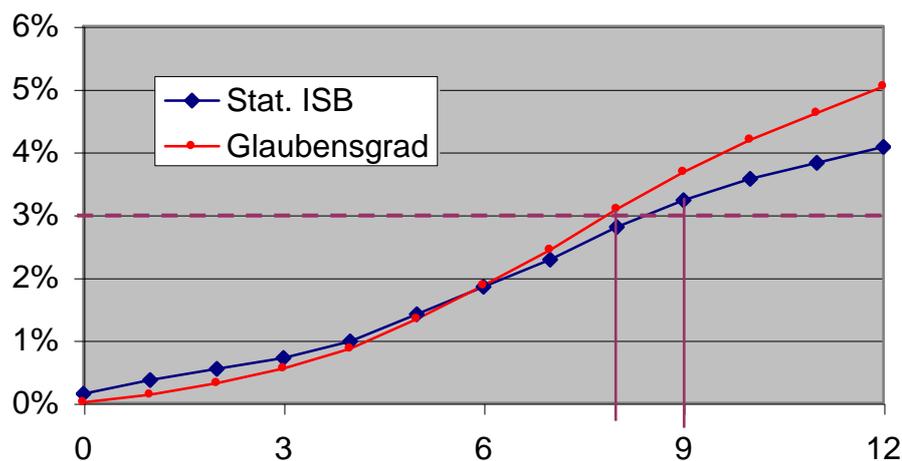


Bild 6.4 Verlauf der Wahrscheinlichkeit (abgeleitet aus der Statistik der Vergangenheit bei sechsjährigem Revisionszyklus) und des Glaubensgrades für Instandsetzungsbedarf (ISB) an der Funktionseinheit „Antrieb“ des Schalters Siemens H801/ H801(E) aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren

Tatsächlich wird der Glaubensgrad für einen Instandsetzungsbedarf an der Funktionseinheit „Antrieb“ durch Berücksichtigung der Informationsquelle „Druckwächter“ noch um rund 1/3 gegenüber den in Bild 6.4 gezeigten Werten reduziert. Dies ist korrekt, weil jeder dritte der in der Statistik erfassten Instandsetzungen derart ist, dass er prinzipiell vom Druckwächter rechtzeitig erkannt werden kann. Für die Betrachtung des Einflusses der Informationsquelle „Abnutzung“ wurde dies außer Acht gelassen, um die Werte miteinander vergleichen zu können.

Für die Funktionseinheiten „Schaltkontakte“, „Isolation“ und „Steuerung und Überwachung“ wurde wie oben bereits erwähnt angenommen, dass während der Revisionen keine wesentlichen Eingriffe ohne zusätzliche Dokumentation in den Instandsetzungslisten ausgeführt wurden. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Revisionszyklus für diese Einheiten ohne wesentlichen Einfluss auf einen sich ergebenden wahrscheinlichen Instandsetzungsbedarf ist. Deshalb wurde für diese Einheiten auf die Einführung einer Informationsquelle „Abnutzung“ verzichtet. Um dennoch sicherzustellen, dass auch hier der Glaubensgrad für einen Instandsetzungsbedarf der Wahrscheinlichkeit hierfür entspricht, wurde das Modell dahin-

gehend modifiziert, dass die Informationsquellen „ISB-Statistik“ und „Revision“ für diese Einheiten einen gemeinsamen Hinweis liefern, wobei die „ISB-Statistik“ die Massezahl $m(\text{ISB})$ und die „Revision“ die Massezahl $m(\text{kein ISB})$ gemäß Tabelle 5.1 liefert. Das Ergebnis ist in Tabelle 6.4 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 6.4 Parameter für den im Modell eingebrachten gemeinsamen Hinweis der Informationsquellen „Revision“ und „ISB-Statistik“ (ISB = Instandsetzungsbedarf) für die Funktionseinheiten „Schaltkontakte“, „Isolation“ und „Steuerung und Überwachung“, Massezahlen für Unwissenheit ergeben sich für jeden Zeitschritt aus $m(\text{Unwissenheit}) = 1 - m(\text{ISB}) - m(\text{kein ISB})$

| Informationsquelle | Massezahl | Startwert | Entwicklung im n-ten Zeitschritt | Rücksetzen erfolgt nach... |
|----------------------------|----------------------|-----------|---|---|
| Revision und ISB-statistik | $m(\text{ISB})$ | P_0 | $P_n + m_{n-1}(\text{ISB}) - P_n \cdot m_{n-1}(\text{ISB})$ | Revision o. Instandsetzung auf P_n |
| | $m(\text{kein ISB})$ | 0,95 | $0,8 \cdot m_{n-1}(\text{kein ISB})$ | großer Rev. auf 0,95; kleiner Rev. auf 0,9 |

Dieses Verfahren bedingt, dass die unabhängig voneinander ermittelten Werte für $m(\text{ISB})$ und $m(\text{kein ISB})$ in der Summe stets weniger als eins betragen. In diesem Modell ist dies zu jeder Zeit erfüllt. Alle weiteren im Bild 5.7 gezeigten Informationsquellen liefern Hinweise, die gemäß der Dempster'schen Regel mit dem gemäß Tabelle 6.4 erstellten Hinweis zur resultierenden Aussage verknüpft werden. Da es sich dabei entweder um unabhängige, in der Vergangenheit nicht zur Verfügung gestandene Informationsquellen (Offline-Diagnose) oder in der Statistik nicht berücksichtigte Informationsquellen handelt (Instandsetzungen, die vom Dichtewächter oder durch Fehlermeldungen erkannt wurden, sind dennoch in die Statistik aufgenommen worden), führt diese Verknüpfung zu korrekten Ergebnissen.

6.1.2 SF₆-gefüllter Leistungsschalter Concordia/Sprecher HGF111/112

Für die Schalter der Typen Concordia bzw. Sprecher HGF111 bzw. 112 mit SF₆ gefüllter Schaltkammer lagen bei den am Projekt beteiligten Netzbetreibern Betriebserfahrungen für nur rund ein Viertel der Zeit wie für den zuvor betrachteten Schaltertyp vor. Insgesamt wurden 45 Instandsetzungsvorgänge erfasst. Das entspricht einer bezogen auf die dokumentierten Betriebsjahre in etwa gleichen Häufigkeit von Eingriffen wie bei den Schaltern vom Typ Siemens H800/801(E).

Eine detaillierte Betrachtung ergab jedoch, dass fast alle dokumentierten Eingriffe zur Klasse 5 (nicht alterungs- oder abnutzungsbedingter Instandsetzungsbedarf) gerechnet werden müssen. Mehr als die Hälfte der Eingriffe fanden auf Grund einer festgestellten Spaltkorrosion an den Armaturen statt, die zu SF₆-Verlusten führte. Schließlich wurden alle im Betrieb befindlichen Schalter saniert, wodurch dieses Problem beseitigt wurde. Die restlichen Eingriffe betrafen überwiegend im Rahmen von Wartungsarbeiten durchgeführte Veränderungen am Antrieb, die ebenfalls nicht Abnutzung oder Alterung zur Ursache hatten.

Schließlich verblieben lediglich zwei Eingriffe, die statistisch verwertbar gewesen wären. Unter diesen Umständen war an eine sinnvolle Auswertung nicht zu denken. Tabelle 6.5 gibt die genannten Ergebnisse der Klassifizierung der Eingriffe wieder.

Tabelle 6.5 Ergebnis der Klassifizierung der in der Statistik berücksichtigten Instandsetzungen für den Schalter Concordia/Sprecher HGF111/112

| Funktionseinheit | Störung/Defekt | vorbeugend |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Antrieb | Klasse 1A: keine Vorgänge | Klasse 1B: 2 Vorgänge |
| Isolation | | |
| Schaltkontakte | | |
| Steuerung u. Überwachung | Klasse 2: keine Vorgänge | |
| Öldichtigkeit | entfällt | |
| - (nur Stickstoffnachfüllung) | entfällt | |
| - (nicht abnutzungsbedingt) | Klasse 5: 43 Vorgänge | |
| - (Inhalt nicht benannt) | Klasse 6: keine Vorgänge | |

Offensichtlich erfordert dieser Schaltertyp während der betrachteten Betriebsjahre nur sehr selten abnutzungsbedingte Eingriffe. Ob ein Zustandsmodell für einen solchen Schaltertyp sinnvoll ist oder ob sich hier die Revisionszyklen ohnehin durch andere, nicht-technische Gesichtspunkte ergeben, kann abschließend nur beantwortet werden, wenn ein sehr viel größeres Kollektiv zur statistischen Auswertung herangezogen wird. Hierfür ist unter Umständen die Auswertung vergleichbarer Schaltertypen bzw. vergleichbarer Funktionseinheiten in einer gemeinsamen Statistik erforderlich (siehe hierzu auch Abschnitt 7).

Da das hier vorgestellte Modell im wesentlichen auf die Auswertung des statistisch zu erwartenden Instandsetzungsbedarfs aufbaut, wurde auf eine Nachbildung dieses Schaltertyps im Modell verzichtet. Die prinzipiellen Ergebnisse, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden, sind aber qualitativ auch auf Schalter mit anderen Löschrinzipien (mit Modifikationen hinsichtlich der Funktionseinheiten des Schalters im Modell) übertragbar.

6.2 Ermittlung einer zustandsbeschreibenden Kennziffer

6.2.1 Betrachtung nur des Glaubensgrades für Instandsetzungsbedarf

An dieser Stelle sei zunächst noch einmal an das Ziel des beschriebenen Forschungsvorhabens erinnert: mit Hilfe des entwickelten Instandhaltungs- und Abnutzungsmodells soll nicht eine ideale Instandhaltungsstrategie ermittelt, sondern eine Zustandsbeschreibung geliefert werden, mit deren Hilfe und unter Einbeziehung weiterer (systembezogener) Größen wie Bedeutung des Schalters im Netz und vorhandenen Ressourcen zur Instandhaltung ein optimaler Instandhaltungsplan erstellt werden kann. Wünschenswert ist deshalb die Angabe einer zustandsbeschreibenden Ziffer für einen Zeitpunkt oder Zeitraum als Resultat der Modellrechnungen.

Bei dem in diesem Vorhaben entwickelten Modell ist es naheliegend den für jeden Zeitschritt ermittelten Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf als solche, den Zustand beschreibende Kennziffer zu wählen. So erscheint es sinnvoll, den technischen Bedarf für eine Revision aus der Annahme abzuleiten, dass ein Instandsetzungsbedarf zum betrachteten Zeitpunkt mit einer gewissen, für jeden Schalter (z.B. auf Grund seiner Bedeutung für den Netzbetrieb) individuell festzulegenden Wahrscheinlichkeit vorliegt. Genau dies ist die Aussage, die geliefert wird, wenn der Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf eine vorgegebene Grenze überschreitet.

Dabei kann man z.B. davon ausgehen, dass man zur Festlegung des Revisionstermins den maximalen Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf einer der Funktionseinheiten „Antrieb“, „Schaltkontakte“, „Isolation“ und „Steuerung und Überwachung“ wählt. Überschreitet der größte Glaubensgrad die vorgegebene Grenze, so wird eine Revision im betrachteten Zeitraum geplant, die sich sinnvollerweise nicht nur auf die zum maximalen Glaubensgrad zugehörige Funktionseinheit beschränkt, sondern auch alle Einheiten, für die der Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf innerhalb eines überschaubaren Zeitraums (z.B. 5 Jahre) ebenfalls die vorgegebene Grenze überschreiten wird. Somit wird sichergestellt, dass Revisionen stets rechtzeitig und selektiv vorgenommen werden und dennoch verhindert, dass ein vergrößerter Aufwand durch kurz aufeinander folgende, auf Teilbereiche beschränkte Revisionen erfolgt.

Auch wenn es nicht das Ziel dieses Vorhabens ist, eine ideale Instandhaltungsstrategie zu entwickeln, ist es doch notwendig die vorgeschlagene Nutzung des Modells an Hand sinnvoll gewählter Größen zu überprüfen. Um eine sinnvoll festgelegte Grenze für den maximalen Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf zu ermitteln, ist es ratsam, zunächst zu untersuchen, welchen Glaubensgrad die hier definierten Funktionseinheiten bei der in der Vergangenheit angewandten zyklischen Instandhaltung zum Zeitpunkt der Revisionen annahmen. Hierfür wurde von einem festen sechsjährigem Revisionszyklus ausgegangen, wobei jede dritte Revision als große Revision durchgeführt wurde. Ferner wurde vereinfachend angenommen, dass bei keiner der Revisionen eine Beanstandung oder außergewöhnliche Abnutzung festgestellt wurde und dass über den betrachteten Zeitraum der ersten 30 Betriebsjahre des Schalters keine Warn- oder Fehlermeldungen auftraten und keine Instandsetzung notwendig war.

Bild 6.5 zeigt als Ergebnis die Verläufe der Glaubensgrade für die vier für die Festlegung der Revisionszeiten als wesentlich bestimmten Funktionseinheiten „Antrieb“, „Schaltkontakte“, „Isolation“ und „Steuerung und Überwachung“. Es zeigt sich deutlich, dass bei zeitlich festen Revisionsintervallen das Modell keineswegs gleiche Glaubensgrade zu den Zeitpunkten der Revisionen aufweist. Auf Grund der oben festgestellten und im Bild 6.3 dokumentierten Zunahme der Wahrscheinlichkeit für Instandsetzungsbedarf mit dem Betriebsalter des Schalters ist es nicht verwunderlich, dass bei festen Revisionszyklen bei zunehmendem Alter des Schalters in der Tendenz zu den Zeitpunkten der Revisionen größer werdende Glaubensgrade für Instandsetzungsbedarf in Kauf genommen werden. Für die Funktionseinheit „Antrieb“ erreicht der Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf vor der letzten

betrachteten Revision schließlich mehr als 5 %. Hingegen wird in den ersten 15 Betriebsjahren bei keiner der Funktionseinheiten ein Glaubensgrad von 2 % überschritten.

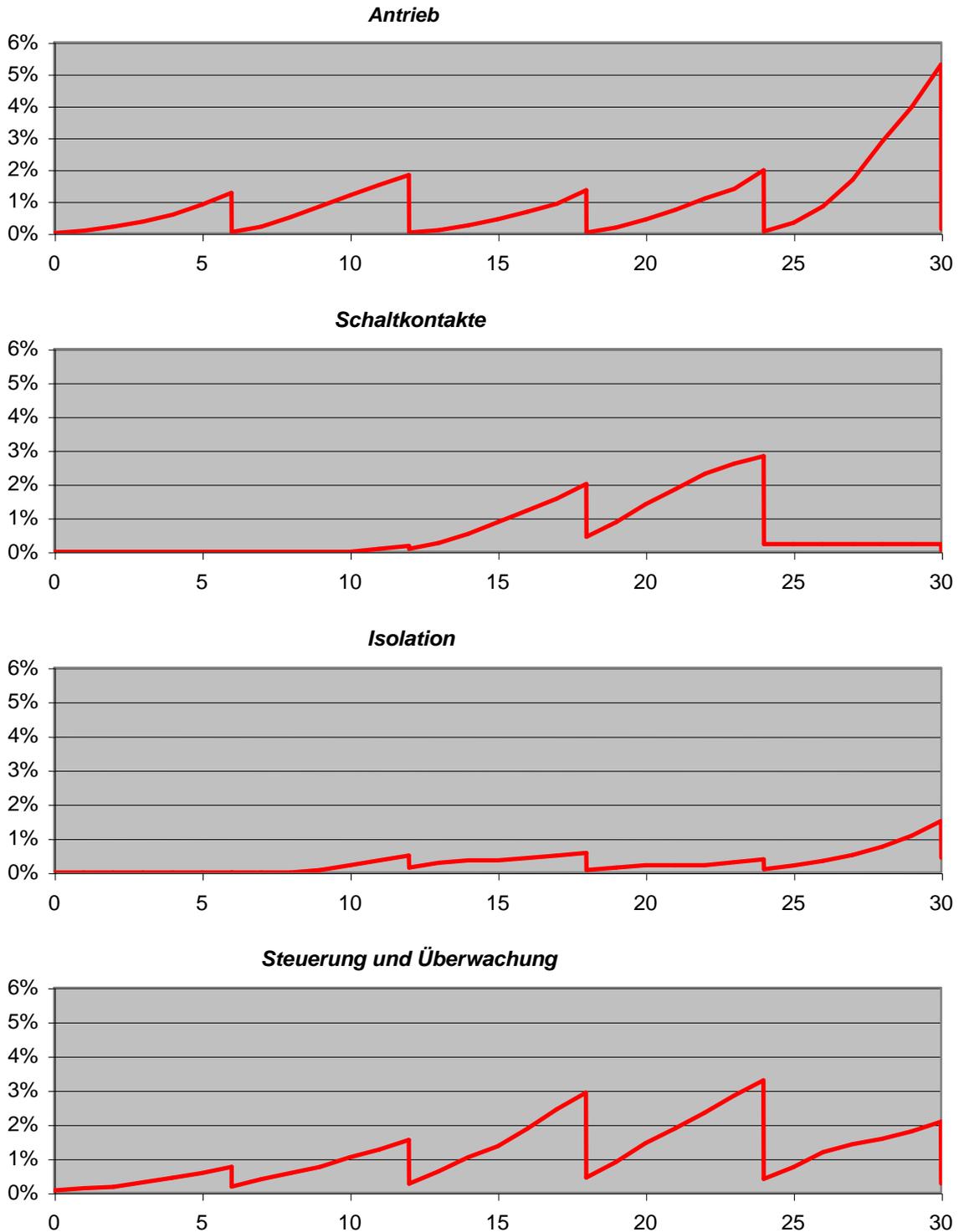


Bild 6.5 Verlauf der Glaubensgrade für Instandsetzungsbedarf für die Funktionseinheiten des Schalters Siemens H800/801(E) aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren bei festen Revisionszyklen von sechs Jahren

Es erscheint aus technischer Sicht sinnvoller, eine Vergleichmäßigung der auftretenden Glaubensgrade anzustreben. Wählt man die Zeitpunkte für die durchzuführenden Revisionen beispielsweise so, dass stets dann eine Revision durchgeführt wird, wenn eine (für den individuellen Schalter gemäß seiner Bedeutung) festgelegte Grenze für den Glaubensgrad überschritten wird, so kommt man diesem Ziel näher. Dabei ist es, wie oben erwähnt, durchaus anzustreben, die dann anberaumte Revision auf alle Funktionseinheiten auszudehnen, die in einem überschaubaren Zeitraum ebenfalls die festgelegte Grenze überschreiten. Auch ist eine Verknüpfung der Revisionen der Einheiten „Isolation“ und „Schaltkontakte“ sinnvoll, da für beide Einheiten während einer Revision die Schaltkammer zu öffnen ist.

Eine solche Festlegung der Revisionszeiten würde zu einer Vergleichmäßigung der betrachteten Glaubensgrade und deshalb bei der vorliegenden Wahl der Modellparameter gleichzeitig zu einer Vergleichmäßigung der Wahrscheinlichkeiten für den zu erwartenden Instandsetzungsbedarf während der einzelnen Revisionen führen. Nimmt man an, dass ein nicht befriedigter Instandsetzungsbedarf nach einem gewissen Zeitraum zu einer Störung führt (und nur solche Instandsetzungsmaßnahmen wurden für die Modellbildung berücksichtigt) und dass es ein wesentliches Ziel der Festlegung der Revisionszeiten sein soll, einen möglichst großen Teil des Instandsetzungsbedarfs während der Revisionen zu erkennen, so ist diese Vorgehensweise plausibel. Die Festlegung des Grenzwertes des Glaubensgrades $m_{\text{Grenz}}(\text{ISB})$ hängt davon ab, wie groß der Anteil der notwendigen Instandsetzungen werden darf, der außerhalb von Revisionen auftritt und z.B. durch Störungen oder Stör- oder Warnmeldungen erkannt wird. Hier spielt neben der Bedeutung des Schalters im Netz auch die Unternehmensphilosophie eine entscheidende Rolle.

Für eine beispielhafte Simulation der Auswirkungen eines solchen Instandhaltungskonzepts soll hier angenommen werden, dass eine Grenze von $m_{\text{Grenz}}(\text{ISB}) = 3\%$ festgelegt worden sei. Ferner gelte als Nebenbedingung, dass eine Revision aus Gründen der Betriebssicherheit und zur Erhaltung der Lebensdauer spätestens $\Delta t_{\text{Rev,max}} = 10$ Jahre nach der letzten Revision und aus ökonomischen Gründen frühestens $\Delta t_{\text{Rev,min}} = 5$ Jahre nach der letzten Revision durchgeführt werden soll. Eine Revision umfasst auch alle die Funktionseinheiten, die den Grenzwert innerhalb der fünf nachfolgenden Jahre überschreiten würden. Alle diese Festlegungen sind beliebig gewählt und können vom Betreiber nach eigenem Ermessen geändert werden, ohne dass die Anwendbarkeit des Verfahrens prinzipiell in Frage gestellt ist. Für die Simulation wurde angenommen, dass kein Instandsetzungsbedarf festgestellt wurde bzw. jeder während einer Revision festgestellter Instandsetzungsbedarf umgehend befriedigt wurde. Außergewöhnliche Abnutzungen wurden nicht festgestellt.

Bild 6.6 zeigt den Verlauf der Glaubensgrade für Instandsetzungsbedarf für die vier den Revisionszyklus bestimmenden Funktionseinheiten über das Betriebsalter aufgetragen, so wie er sich unter oben genannten Festlegungen und Annahmen ergeben würde. Tabelle 6.6 gibt einen Überblick über die durchgeführten Revisionen.

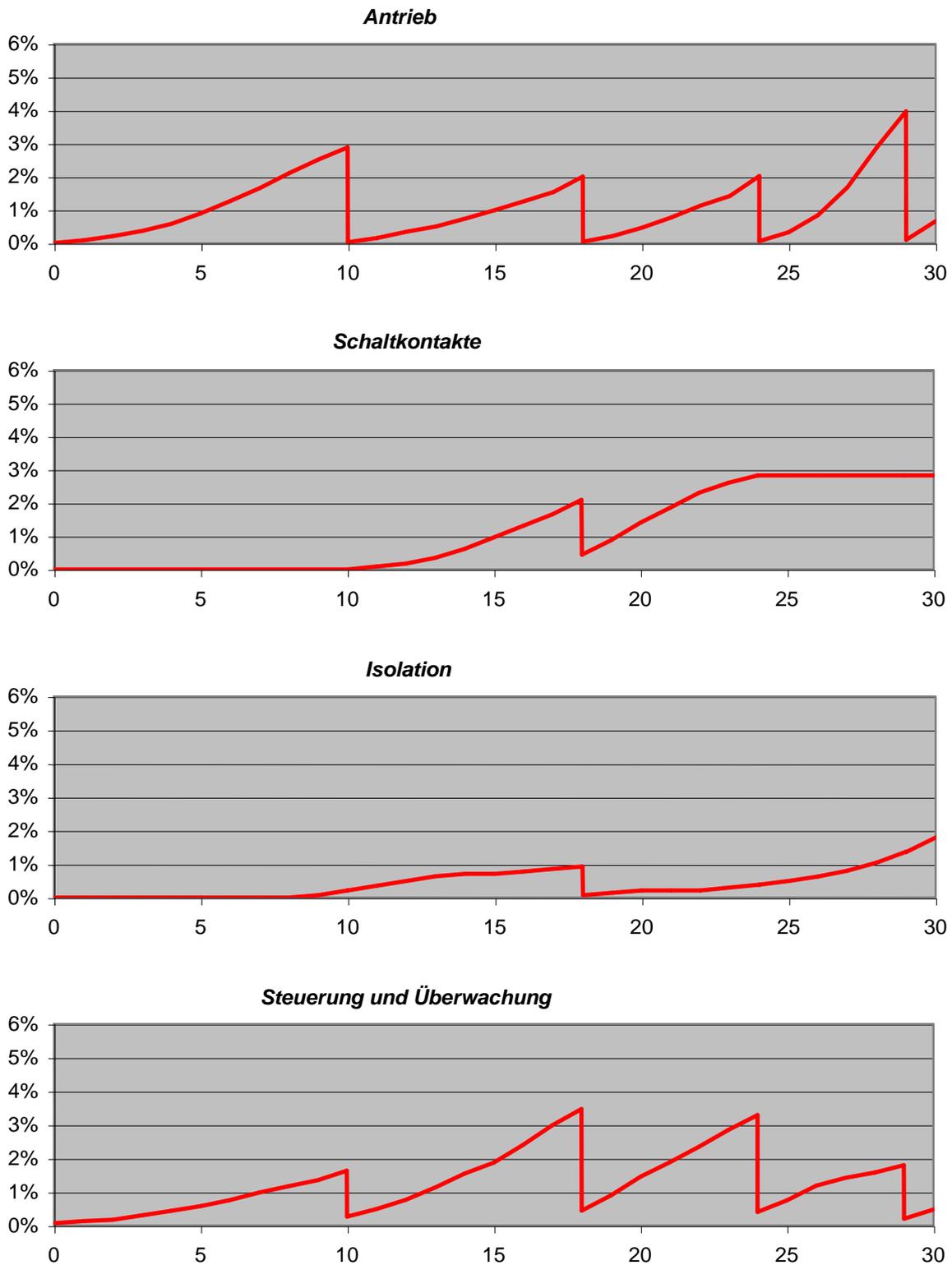


Bild 6.6 Verlauf der Glaubensgrade für Instandsetzungsbedarf für die Funktionseinheiten des Schalters Siemens H800/801(E) aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren bei Festsetzen einer Revision bei Überschreiten eines Grenzwertes von 3%

Tabelle 6.6 Durchgeführte Revisionen während eines simulierten Zeitraums von 30 Betriebsjahren bei Festsetzen einer Revision bei Überschreiten eines Grenzwertes $m_{\text{Grenz}}(\text{ISB}) = 3\%$

¹⁾ weil Grenzwert innerhalb von 5 Jahren überschritten worden wäre

²⁾ weil Schaltkammer ohnehin geöffnet wird

| Lfd. Nr. | Betriebsjahr | Auslöser | Revisionsart | Untersuchte Einheiten |
|----------|--------------|---|--------------|---|
| 1 | 10 | Überschreitung von $\Delta t_{\text{Rev,max}}$ | klein | Antrieb ¹⁾ Steuerung und Überwachung ¹⁾ |
| 2 | 18 | Überschreitung von $m_{\text{Grenz}}(\text{ISB})$ für Steuerung und Überwachung | groß | Antrieb ¹⁾ Schaltkontakte ¹⁾ Isolation ²⁾ Steuerung und Überwachung |
| 3 | 24 | Überschreitung von $m_{\text{Grenz}}(\text{ISB})$ für St. u. Überw. | klein | Antrieb ¹⁾ Steuerung und Überwachung |
| 4 | 29 | Überschreitung von $m_{\text{Grenz}}(\text{ISB})$ für Antrieb | klein | Antrieb Steuerung und Überwachung ¹⁾ |

Die Wahl der Festlegungen führte dazu, dass sich die Anzahl der Revisionen während des betrachteten Zeitraums (erste 30 Betriebsjahre) von fünf auf vier verringerte. Dennoch konnte der maximale, über den simulierten Zeitraum auftretende Glaubensgrad von zuvor mehr als 5 % auf rund 4 % reduziert werden (jeweils in der Einheit „Antrieb“). Es lässt sich zudem erkennen, dass die Zeitspanne zwischen zwei Revisionen mit zunehmendem Alter stets geringer wurde. Dies erklärt sich mit der oben getroffenen Feststellung, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Instandsetzungsbedarfs mit dem Alter kontinuierlich steigt. Nimmt man an, dass diese Wahrscheinlichkeit mit weiteren Betriebsjahren weiter steigt, so ist bei diesem Konzept für die Festlegung der Revisionszeiten davon auszugehen, dass für den betrachteten Schalter für den (hier nicht betrachteten) Zeitraum über das dreißigste Betriebsjahr hinaus sich ein fester Fünfjahres-Revisionszyklus ergeben würde (vorgegeben durch $\Delta t_{\text{Rev,min}}$), wobei allerdings zunehmend höhere Glaubensgrade für einen Instandsetzungsbedarf in Kauf genommen werden müssten.

Beachtenswert ist ferner, dass die Einheiten Schaltkontakte und Isolation nur einmal im betrachteten Zeitraum in Revision waren. Dies hängt damit zusammen, dass die Maximaldauer zwischen zwei Revisionen $\Delta t_{\text{Rev,max}}$ in dieser Simulation nur auf den Schalter als Ganzes nicht aber auf jede Funktionseinheit angewandt wurde. Da für die Funktionseinheit „Schaltkontakte“ im untersuchten Schalterkollektiv zwischen dem 25. und 30. Betriebsjahr kein Instandsetzungsbedarf registriert wurde, bleibt der Glaubensgrad für einen solchen über diesen Zeitraum in der Simulation konstant. Zufällig zeigt sich dabei eine Schwäche des Konzeptes, da der konstante Wert nur knapp unter dem Grenzwert zur Auslösung einer Revision liegt und somit über Jahre hinweg mit einem vergleichsweise großen „Risiko“ eines nicht aufgedeckten Instandsetzungsbedarf gelebt wird. Das Wiederansteigen der Kurve oder die oben erwähnte Einführung einer zeitlichen Grenze auch für die einzelnen Funktionseinheiten kann dies beenden. Stattdessen soll hier ein Blick auf den Verlauf der anderen vom Modell als Resultat gelieferten Größe geworfen werden, dem in Bild 6.7 dargestellten Verlauf des Plausibilitätsgrades für Instandsetzungsbedarf.

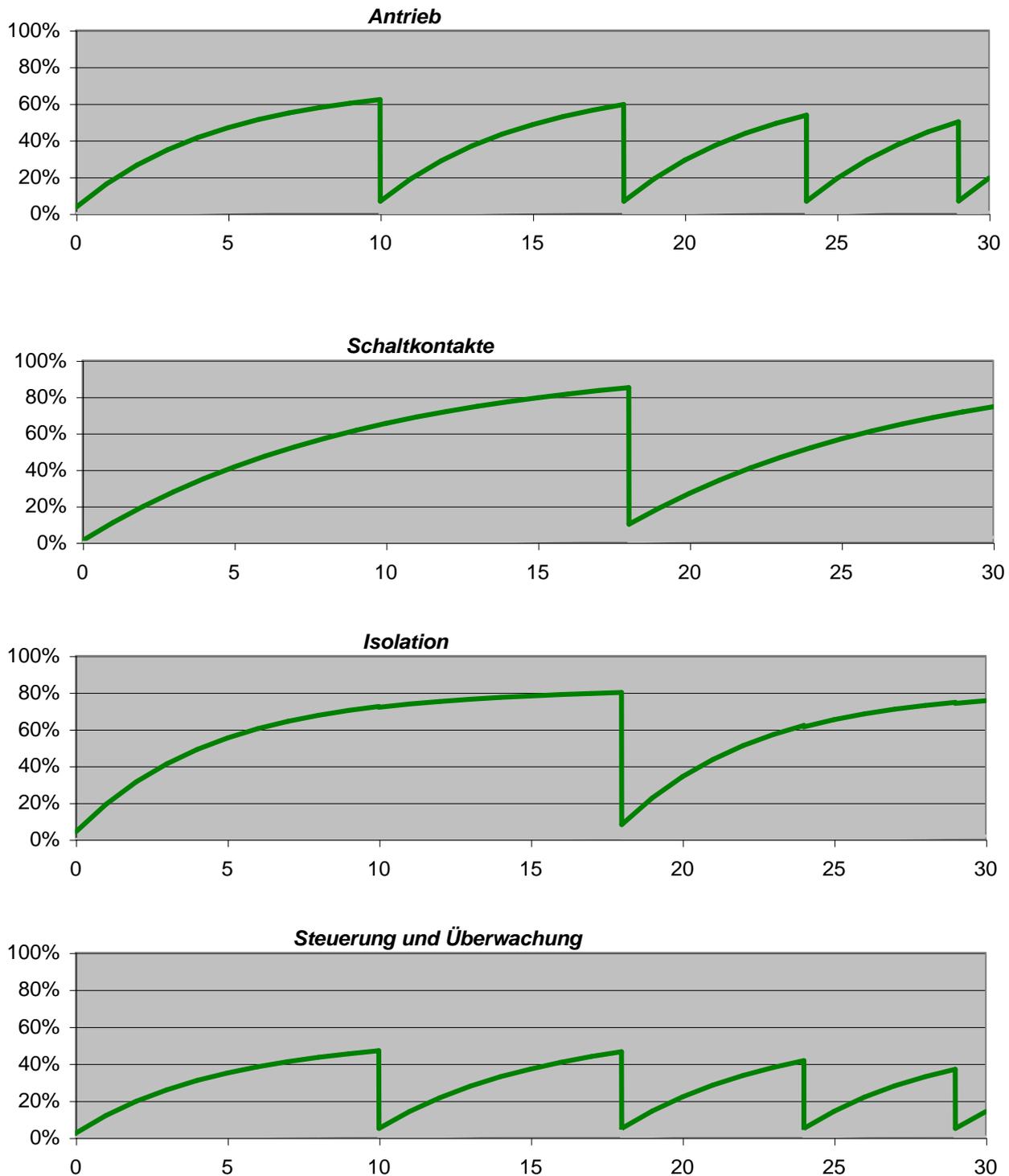


Bild 6.7 Verlauf der Plausibilitätsgrade für Instandsetzungsbedarf für die Funktionseinheiten des Schalters Siemens H800/801(E) aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren bei Festsetzen einer Revision bei Überschreiten eines Grenzwertes von 3% für den Glaubensgrad

Aus Bild 6.7 lässt sich erkennen, dass der Verlauf der Plausibilitätsgrade der bei jeder der vier Revisionen einbezogenen Funktionseinheiten „Antrieb“ und „Steuerung und Überwachung“ praktisch stets unter 60 % bleibt, während er für die beiden anderen Funktionseinheiten des Schalters für Zeiträume von mehreren Jahren diesen Wert überschreitet und dabei Werte bis 80% und darüber annimmt. Dies ließe sich prinzipiell auch durch Einführung eines maximalen Revisionsintervalls für jede Funktionseinheit entschärfen, allerdings bliebe dann immer noch der Effekt unberücksichtigt, dass die Plausibilität für Instandsetzungsbedarf an den beiden Einheiten „Schaltkontakte“ und „Isolation“ wegen der (weitgehend) fehlenden Überwachungseinrichtungen für diese Einheiten deutlich schneller ansteigt als zum Beispiel bei der Einheit „Steuerung und Überwachung“ und damit nach gleicher Betriebsdauer höhere Werte annimmt.

Während der Glaubensgrad die Wahrscheinlichkeit eines Instandsetzungsbedarfes an jeder Einheit wiedergibt, steht der Plausibilitätsgrad für die Möglichkeit eines solchen, d.h. er beinhaltet zusätzlich die Unwissenheit über den Zustand der Funktionseinheit. Da neben der Wahrscheinlichkeiten für einen Instandsetzungsbedarf als weitere Motivation für das Durchführen einer Revision der Mangel an Kenntnissen über den Zustand einer Einheit angenommen werden kann, ist die Betrachtung auch dieser zweiten Größe für die Bestimmung von sinnvollen Revisionszeiten ratsam.

6.2.2 Betrachtung des Glaubens- und Plausibilitätsgrades für Instandsetzungsbedarf

Um sowohl den Glaubens- als auch den Plausibilitätsgrad in das Verfahren zur Bestimmung der Revisionszeiten einfließen zu lassen, wäre es prinzipiell möglich, die im vorangegangenen Abschnitt genannte Grenze um eine weitere Grenze für einen maximal tolerierten Plausibilitätsgrad zu ergänzen. Unter Beachtung beider Grenzen könnte dann eine Simulation erfolgen. Dieses Vorgehen ist aber im Hinblick auf die Zielstellung dieses Vorhabens nicht geeignet. Ziel dieses Vorhabens ist es nicht, sinnvolle Grenzwerte zu definieren. Dies muss dem Betreiber überlassen werden. Stattdessen soll eine den Zustand quantifizierende Zahl ermittelt werden, die es dem Betreiber unter Berücksichtigung weiterer Informationen (wie der Bedeutung des Betriebsmittels) erlaubt, unter vergleichender Bewertung der einzelnen, unterschiedlichen Betriebsmittel einen idealen Instandhaltungsplan zu erstellen.

Daher soll hier nach einer Zustandszahl gesucht werden, die ein Maß für eine geeignete Kombination aus Glaubensgrad und Plausibilitätsgrad liefert, und nachweislich den Zustand im Sinne oben genannter Prioritäten beschreibt. Aufgrund von Untersuchungen an einer Reihe von Simulationsergebnissen wurde hierfür die folgende Gleichung für die Bestimmung der Zustandszahl Z iterativ bestimmt:

$$Z = \sqrt{(20 \cdot Bel(ISB))^2 + Pl^2(ISB)} \quad (6.4)$$

Jede Zustandszahl wird somit durch eine Ellipse beschrieben, wenn man den Glaubens- und den Plausibilitätsgrad als Abszisse bzw. Ordinate in einem Diagramm aufträgt.

Anschaulicher wird die Ermittlung der Zustandszahl, wenn man durch geeignete Skalierung der Ordinate und Abszisse (im Verhältnis 20:1) dafür sorgt, dass Kurven gleicher Zustandszahlen durch Kreisbögen beschrieben werden, wie im Bild 6.8 dargestellt. Die Zustandszahl eines jeden Punktes in diesem Diagramm ist dann direkt proportional zum Abstand zum Ursprung dieses Diagramms und kann am Schnittpunkt zwischen Ordinate und eines gedachten Kreisbogens abgelesen werden, der so um den Ursprung gezogen wird, dass der aktuelle Zustand auf diesem Kreisbogen liegt. Je höher die Zustandszahl, umso größer ist der prognostizierte Bedarf für eine Revision.

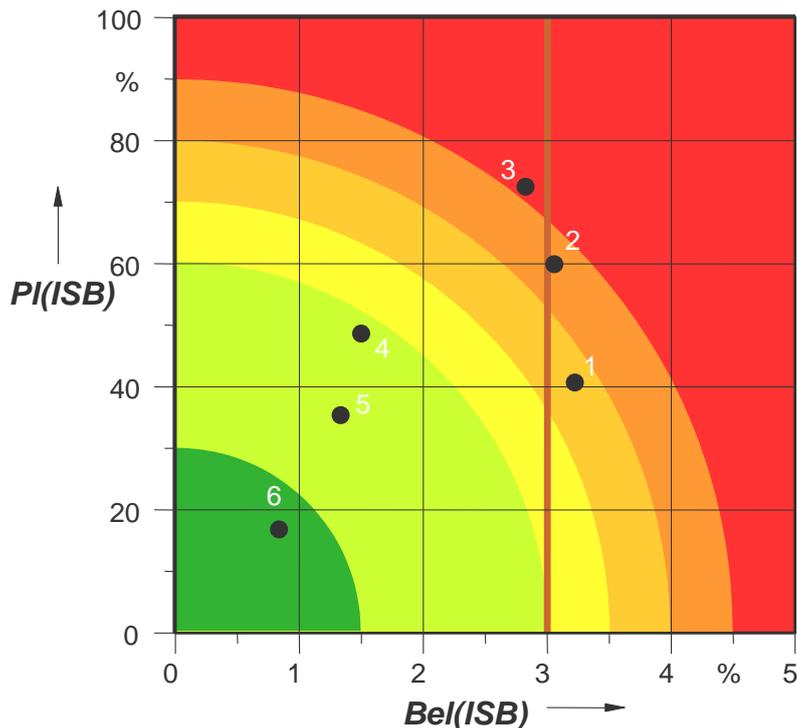


Bild 6.8 Ermittlung der Zustandszahlen mit Ergebnisgrößen des Modells Plausibilitäts- und Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf; Kennzeichnung des Revisionsbedarfs von gering (grün) bis hoch (rot); rote Linie: Grenzwert aus Abschn. 6.2.1

Im Diagramm des Bildes 6.8 sind beispielhaft mögliche Zustände 1 bis 6 eingetragen, die eine Funktionseinheit des Schalters zwischen zwei Revisionen einnehmen kann. Betrachtet man, wie im Abschnitt 6.2.1 diskutiert, nur den Glaubensgrad als Maß für die Dringlichkeit einer Revision, so wäre die Reihenfolge der ersten drei Einheiten 1-2-3, durch die Einführung der Zustandszahlen, d.h. durch die Berücksichtigung des Plausibilitätsgrades als weiteres Maß für die Notwendigkeit einer Revision, kehrt sich diese Reihenfolge in 3-2-1 um, wie aus Bild 6.8 zu ersehen ist.

Für eine Simulation wurde angenommen, dass eine Revision terminiert wurde, sobald eine Zustandszahl von 80 überschritten wird. Für die im Bild 6.8 dargestellten Zustände bedeutet dies, dass im Vergleich zum Verfahren nach Abschnitt 6.2.1 nicht der Zustand 1, sondern der Zustand 3 zum Auslöser einer Revision wird. Zustand 2 wäre nach beiden Kriterien ein Auslöser für eine Revision, die Zustände 4 bis 6 werden in beiden Fällen toleriert, sofern nicht binnen fünf Jahre der Grenzwert überschritten wird. Bild 6.9 zeigt als Ergebnis den sich

ergebenden Verlauf der Zustandszahlen für die Funktionseinheiten über den betrachteten Zeitraum, Tabelle 6.7 gibt einen Überblick über die durchgeführten Revisionen.

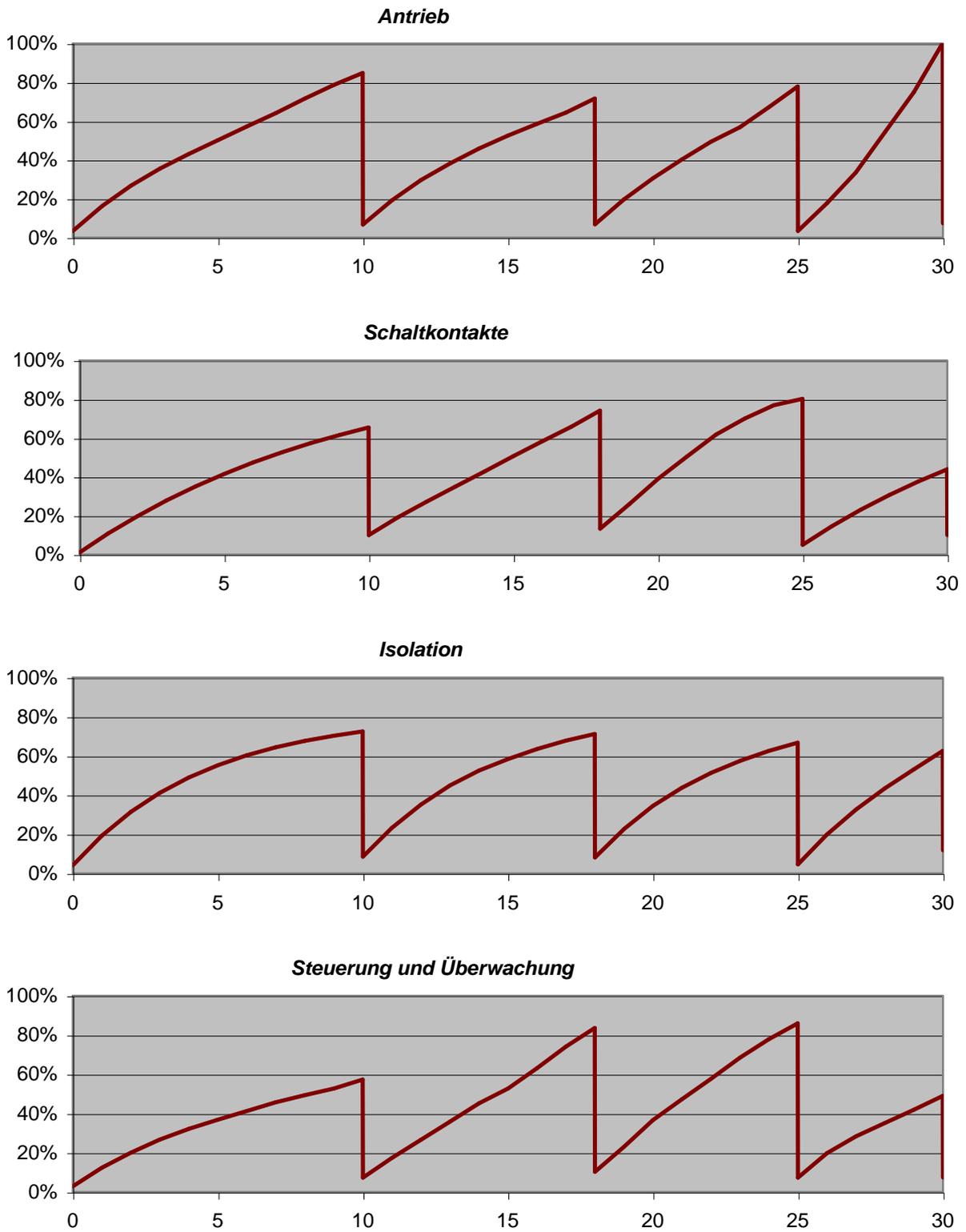


Bild 6.9 Verlauf der Zustandszahlen für die Funktionseinheiten des Schalters Siemens H800/801(E) aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren bei Festsetzen einer Revision bei Überschreiten eines Grenzwertes von 80%

Tabelle 6.7 Durchgeführte Revisionen während eines simulierten Zeitraums von 30 Betriebsjahren bei Festsetzen einer Revision bei Überschreiten eines Grenzwertes der Zustandszahl von 80

¹⁾ weil Grenzwert innerhalb von 5 Jahren überschritten worden wäre

²⁾ weil Schaltkammer ohnehin geöffnet wird

| Lfd. Nr. | Betriebsjahr | Auslöser | Revisionsart | Untersuchte Einheiten |
|----------|--------------|--|--------------|---|
| 1 | 10 | Überschreitung der Zustandszahlgrenze für Antrieb | klein | Antrieb Schaltkontakte ¹⁾ Isolation ¹⁾ Steuerung und Überwachung ¹⁾ |
| 2 | 18 | Überschreitung der Zustandszahlgrenze für Steuerung und Überwachung | klein | Antrieb ¹⁾ Schaltkontakte ¹⁾ Isolation ¹⁾ Steuerung und Überwachung |
| 3 | 25 | Überschreitung der Zustandszahlgrenze für Steuerung und Überwachung. | groß | Antrieb ¹⁾ Schaltkontakte ¹⁾ Isolation ¹⁾ Steuerung und Überwachung |
| 4 | 30 | Überschreitung der Zustandszahlgrenze für Antrieb | klein | Antrieb Schaltkontakte ²⁾ Isolation ¹⁾ Steuerung und Überwachung ¹⁾ |

Die Wahl einer Zustandszahl von 80 als Grenzwert für die Festsetzung für Revisionen bringt einen nahezu identischen Revisionszyklus wie eine Grenzwert von 3 % für den Glaubensgrad (Tabelle 6.6). Es bleibt bei vier Revisionen im betrachteten Zeitraum, es verschieben sich lediglich die beiden letzten Revisionen um je ein Jahr. Zudem wird die erste Revision nicht (nur) wegen Erreichen des maximalen Revisionsintervalls anberaumt, sondern auch, weil die Zustandszahl einer Funktionseinheit den festgelegten Grenzwert überschritten hat.

Verändert hat sich aber der Umfang der durchgeführten Revisionen: auch die Funktionseinheiten „Schaltkontakte“ und „Isolation“ werden hier in jede Revision einbezogen. Die Festlegung einer großen Revision erfolgte deshalb nach dem in der Vergangenheit von den Netzbetreibern benutztem Kriterium (dritte Revision als große Revision). Auffallend ist, dass die Entwicklung der Zustandszahlen über der Zeit (Bild 6.9) von Funktionseinheit zu Funktionseinheit weit weniger differiert als die Entwicklung der Glaubensgrade (Bild 6.6). Dies hängt damit zusammen, dass gerade die Funktionseinheiten, die einen vergleichsweise geringen Glaubensgrad für Instandsetzungsbedarf entwickelten, nämlich „Schaltkontakte“ und „Isolation“, gleichzeitig einen vergleichsweise schnell ansteigenden Plausibilitätsgrad aufweisen (Bild 6.7). Dieses Verhalten ist nicht etwa durch die Regeln der Evidenztheorie vorgegeben, sondern durch die Aufteilung und Aussagekraft der Überwachungseinrichtungen verursacht, die neben der Statistik zusätzliche, differierende Zustandsaussagen liefern.

Da auch für diese Simulation alle Festlegungen hinsichtlich der Betriebshistorie frei und ohne Rücksicht auf reale Vorgänge gewählt wurden, können hieraus auch keine Ableitungen zur Aussagekraft der Zustandszahl hinsichtlich des realen Zustands getroffen werden.

6.2.3 Verifikation der Aussagekraft der Zustandszahl

Um zu belegen, dass die Zustandszahl mit dem tatsächlichen Zustand, d.h. für das hier entwickelte Modell mit dem Instandsetzungsbedarf einer Funktionseinheit einhergeht, ist allein der Vergleich von Simulationsergebnissen mit realen Betriebshistorien aussagekräftig. Da das Modell den Schwerpunkt der Informationen zunächst aus den Statistiken über den Instandsetzungsbedarf zieht und darüber hinausgehende Hinweise auf eine hiervon abweichende Zustandsentwicklung eines Individuums nur spärlich vorhanden bzw. dokumentiert sind, ist es wiederum notwendig, Simulationen für das ganze Kollektiv der betrachteten Schalter zu rechnen und Vergleiche mit den Historien der Gesamtheit der Schalter anzustellen um daraus eine Korrelation zwischen Zustandsentwicklung laut Modell und in Realität nachzuweisen.

In einem ersten Schritt wurden hierzu alle Zustandszahlen errechnet, die zum Zeitpunkt der in den Statistiken berücksichtigten 74 Instandsetzungen an den für die Ermittlung der Revisionszeiten betrachteten vier Funktionseinheiten gemäß dem vorgestellten Modell aufgetreten sind. Hierfür wurden alle Betriebshistorien der betroffenen Schalter, d.h. insbesondere die Revisionen und vorherige Instandsetzungen, im Modell simuliert und die Zustandszahlen der betroffenen Funktionseinheit für das Jahr der Instandsetzung ermittelt. Die sich ergebenden Zahlen wurden in 9 Klassen (<10, <20, <30,..., <80 und >80) eingeteilt. Bild 6.10 zeigt die Zuordnung des aufgetretenen Instandsetzungsbedarfs zu den erwähnten Klassen der Zustandszahlen zum Zeitpunkt des Eingriffs für die einzelnen Funktionseinheiten und in der Summe aller Einheiten.

Zunächst fällt hier auf, dass es offensichtlich bei allen Funktionseinheiten eine Häufung von Instandsetzungsvorgängen bei mittelgroßen Zustandszahlen gibt. Mehr als 60% der Instandsetzungen fanden bei Zustandszahlen zwischen 30 und 60 statt, jeweils rund 20% der Arbeiten bei Zustandszahlen unter 30 oder über 60. Dies darf allerdings nicht als Beleg gewertet werden, dass es keine Korrelation zwischen zunehmender Zustandszahl und zunehmendem, statistischen Instandsetzungsbedarf gibt. Da in der Vergangenheit ganz überwiegend kürzere Revisionszyklen als die im Abschnitt 6.2.2 errechneten gewählt wurden, ist vielmehr anzunehmen, dass Zustandszahlen im unteren und mittleren Bereich besonders häufig auftraten.

Um dies zu überprüfen, wurden Simulationsrechnungen für alle Betriebsjahre (bis zum Alter des jeweiligen Schalters, maximal bis zum 30. Jahr nach der Inbetriebnahme) für alle 227 betrachteten Leistungsschalter des Typs Siemens H800/H801(E) durchgeführt. So weit das Revisions- und Instandsetzungsgeschehen dokumentiert war, wurde dies entsprechend berücksichtigt. Für die Schalter, für die die Revisionszyklen nicht explizit bekannt waren, wurde ein fester Revisionszyklus von sechs Jahren angenommen und keine ausserordentliche Alterung oder über die Dokumentation hinausgehende Instandsetzung vorausgesetzt. Bild 6.11 zeigt die Verteilung der ermittelten Zustandszahlen in bezogenen Größen, wiederum entsprechend den 9 oben eingeführten Größenklassen.

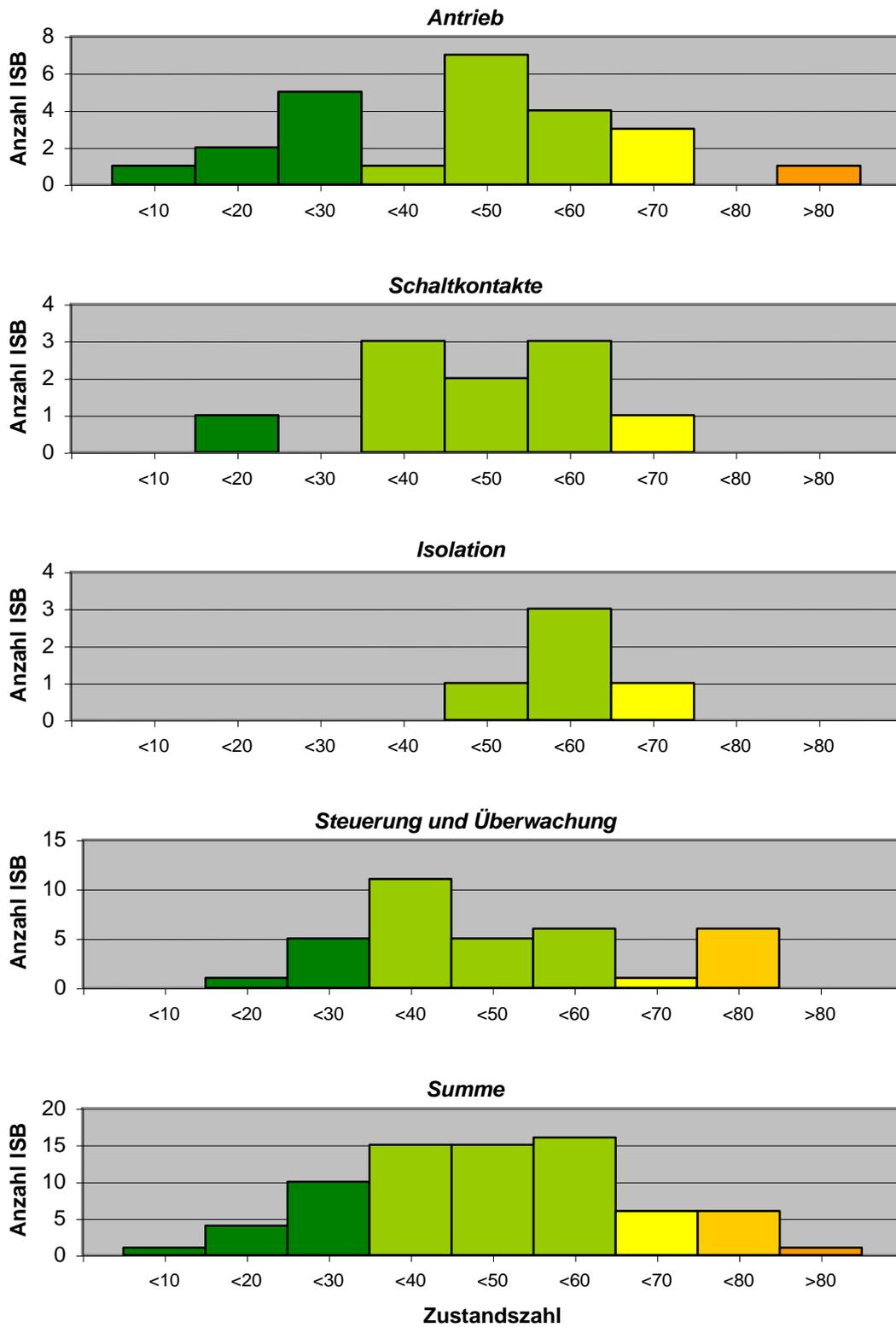


Bild 6.10 Zuordnung des aufgetretenen Instandsetzungsbedarfs der Klassen 1 bis 3 zu den Zustandszahlen zum Zeitpunkt des Eingriffs für die einzelnen Funktionseinheiten und in der Summe für alle Schalter des Typs Siemens H800/801(E) (ISB = Instandsetzungsbedarf)

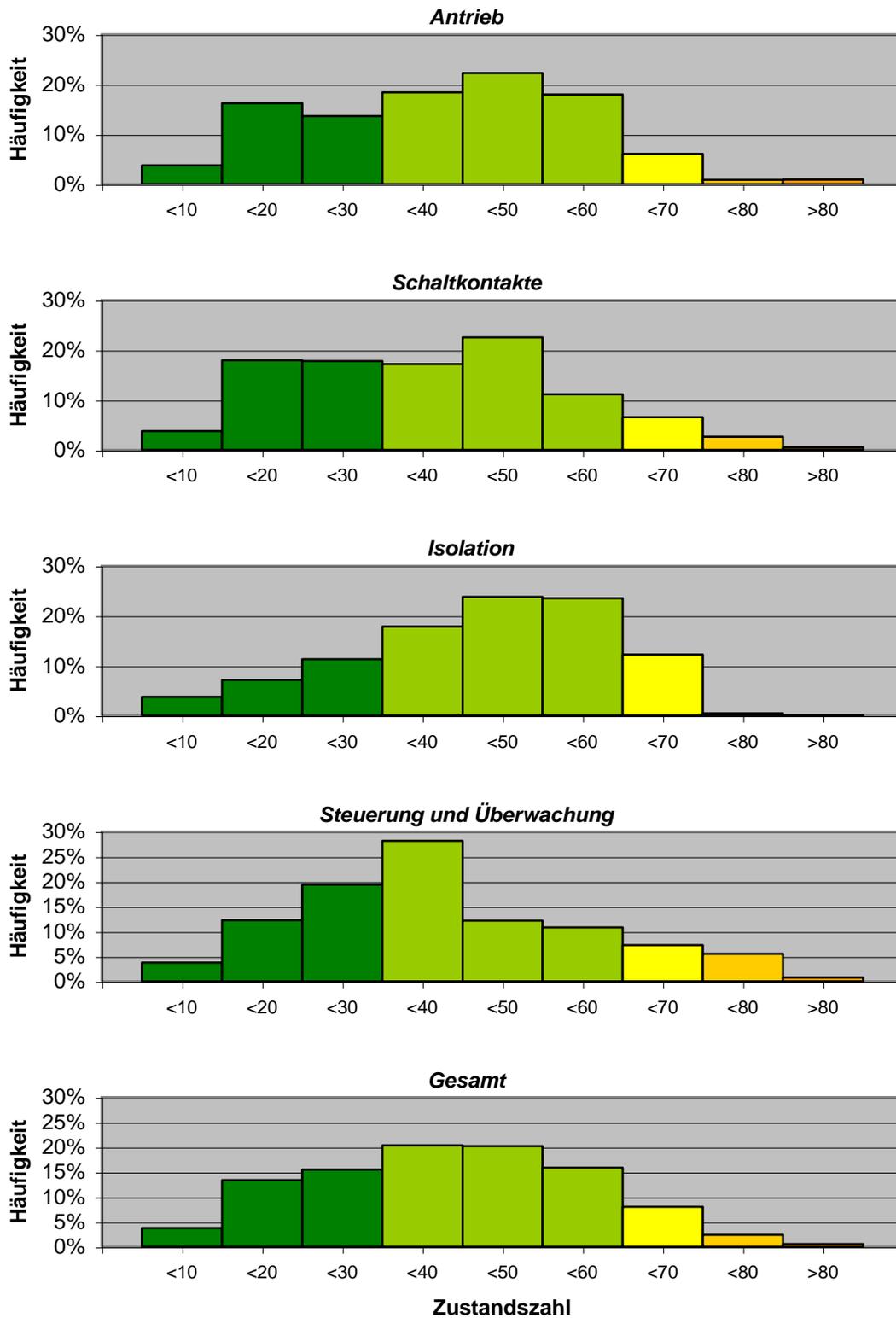
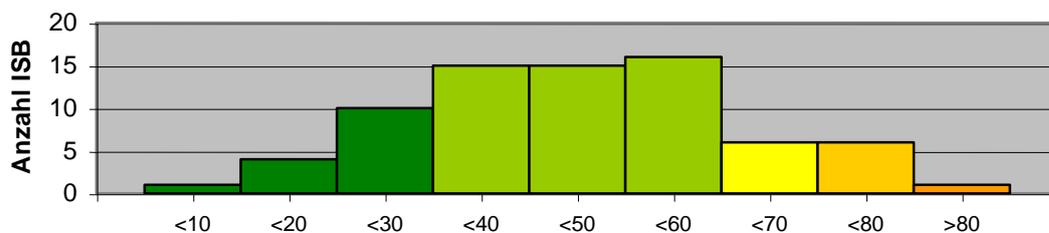


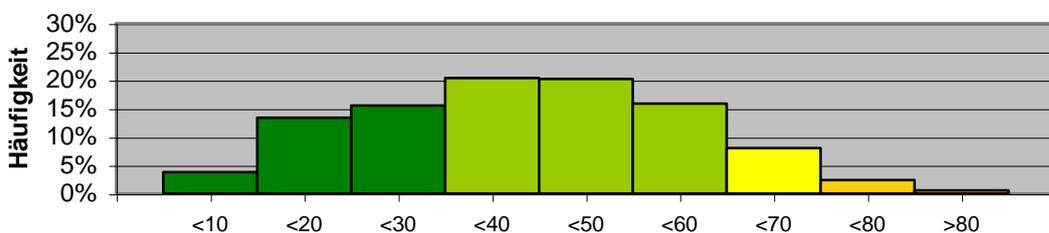
Bild 6.11 Relative Häufigkeit des Auftretens der Zustandszahlen für die einzelnen Funktionseinheiten und in der Summe für alle Schalter des Typs Siemens H800/801(E) unter Berücksichtigung der realen Instandhaltungshistorien

Das Ergebnis dieser Simulationen zeigt, dass in der Summe über alle Funktionseinheiten tatsächlich für nahezu 90 % der Betriebsjahre der betrachteten Schalter aufgrund der bekannten Betriebshistorien vom Modell Zustandszahlen kleiner 60 „vorhergesagt“ worden wären. Zu erkennen ist insbesondere eine Häufung von Zustandszahlen im Bereich zwischen 20 und 60, in denen mit 56 der 74 Vorgänge auch der weitaus größte Teil der Instandsetzungen vorgenommen wurde. Besonders groß ist die Häufung der Zustandszahlen im mittleren Bereich für die Funktionseinheit „Isolation“ mit einem Schwerpunkt zwischen 40 und 60, während bei der Funktionseinheit „Steuerung und Überwachung“ ein besonders hoher Anteil von Zustandszahlen zwischen 20 und 40 zu verzeichnen ist. Bezieht man die Häufigkeit von Instandsetzungen auf die Häufigkeit des Auftretens der gleichen Zustandszahlen, ist es wegen der geringen Anzahl der Instandsetzungsvorgänge und der zu erwartenden statistischen Streuung sinnvoll, dies zunächst nur für die Summe aller Funktionseinheiten und damit die Summe aller Vorgänge durchzuführen. Bild 6.12 c) gibt das Ergebnis hierfür wieder.

a)



b)



c)

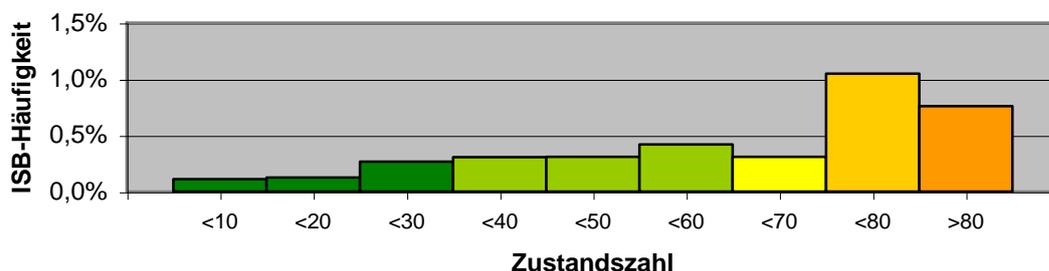


Bild 6.12 a) Zuordnung aller Instandsetzungen zu den Zustandszahlen
 b) Relative Häufigkeit des Auftretens der Zustandszahlen
 c) Häufigkeit der Instandsetzungsvorgänge bezogen auf die Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Zustandszahlen
 für die Summe aller Schalter des Typs Siemens H800/801(E) unter Berücksichtigung der realen Instandhaltungshistorien (ISB = Instandsetzungsbedarf)

Es lässt sich erkennen, dass im Bereich kleiner und mittlerer Zustandszahlen Instandsetzungsbedarf sehr viel seltener auftritt als bei großen Zustandszahlen über 70. Noch deutlicher als im Bild 6.12 c) wird die Zunahme des erfassten Instandsetzungsbedarfs mit der Zustandszahl im Bild 6.13 sichtbar, wo jeweils drei Klassen von Zustandszahlen zu einer Gruppe zusammengefasst sind. Man erkennt, dass zwischen der vom Modell prognostizierten Zustandszahl und der Häufigkeit zum Erhalt der Funktionsfähigkeit notwendiger Instandsetzungen ein direkter Zusammenhang besteht.

Im Bereich der Zustandszahlen über 60 beträgt die Häufigkeit von Instandsetzungen das 2,5fache im Vergleich zu Betriebsjahren, bei denen Zustandszahlen unter 30 prognostiziert werden. Fasst man nur Erfahrungen für die Betriebsjahre mit Zustandszahlen größer 70 zusammen, so steigt die Häufigkeit von Instandsetzungen für diese Gruppe sogar auf 1,0 %. Diese Zahl beschreibt den durchschnittlichen Erwartungswert für die Aufdeckung eines Instandsetzungsbedarfes für jede der vier betrachteten Funktionseinheiten. Für den Schalter als ganzes beträgt der Erwartungswert dann mithin fast 4 %. Mit diesen statistischen Betrachtungen soll die Verifizierung der Aussagekraft der vom Modell ermittelten Zustandszahl als Maß für die Notwendigkeit einer Revision als erfüllt betrachtet werden. Wegen der zum Teil auch stochastisch bedingten Verteilung der Instandsetzungsvorgänge (siehe Auftreten von Instandsetzungen auch bei kleinen Zustandszahlen, d.h. kurz nach vorausgegangenen Revisionen, Instandsetzungen oder sonstiger positiver Hinweise auf den Zustand) wird auf die Betrachtung einzelner Betriebshistorien verzichtet, da die Aussagekraft solcher Einzelergebnisse unter diesen Umständen sehr begrenzt ist.

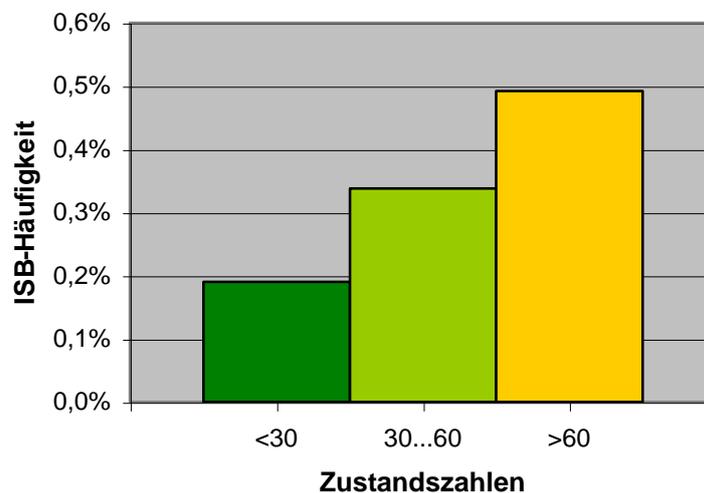


Bild 6.13 Häufigkeit der Instandsetzungsvorgänge bezogen auf die Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Zustandszahlen für die Summe aller Schalter des Typs Siemens H800/801(E) unter Berücksichtigung der realen Instandhaltungshistorien (ISB = Instandsetzungsbedarf)

Bild 6.14 zeigt stattdessen die Auswertung, die in Bild 6.13 für die Summe aller betrachteten Funktionseinheiten gezeigt wird, aufgeteilt für die vier Einheiten. Wegen der geringen Anzahl der dokumentierten Instandsetzungsvorgänge ist insbesondere für die Einheiten „Schaltkontakte“ und „Isolation“ eine verlässliche Ableitung über sinnvolle Grenzwerte nicht möglich. Es erscheint jedoch so, als ob bei der Einheit „Antrieb“ der Instandsetzungsbedarf erst mit Erreichen eines Grenzwertes der Zustandszahl von 60 oder 70 deutlich ansteigt, während bei der Einheit „Steuerung und Überwachung“ schon bei mittleren Zustandszahlen eine vergleichsweise hohe Häufigkeit von Instandsetzungen zu beobachten ist. Ob die Einführung differenzierter Grenzwerte für unterschiedliche Funktionseinheiten als Auslöser für Revisionen oder anderer Kontrollen Sinn macht, kann aber nur durch Betrachtung weitaus größerer Kollektive beantwortet werden (siehe auch Abschnitt 7).

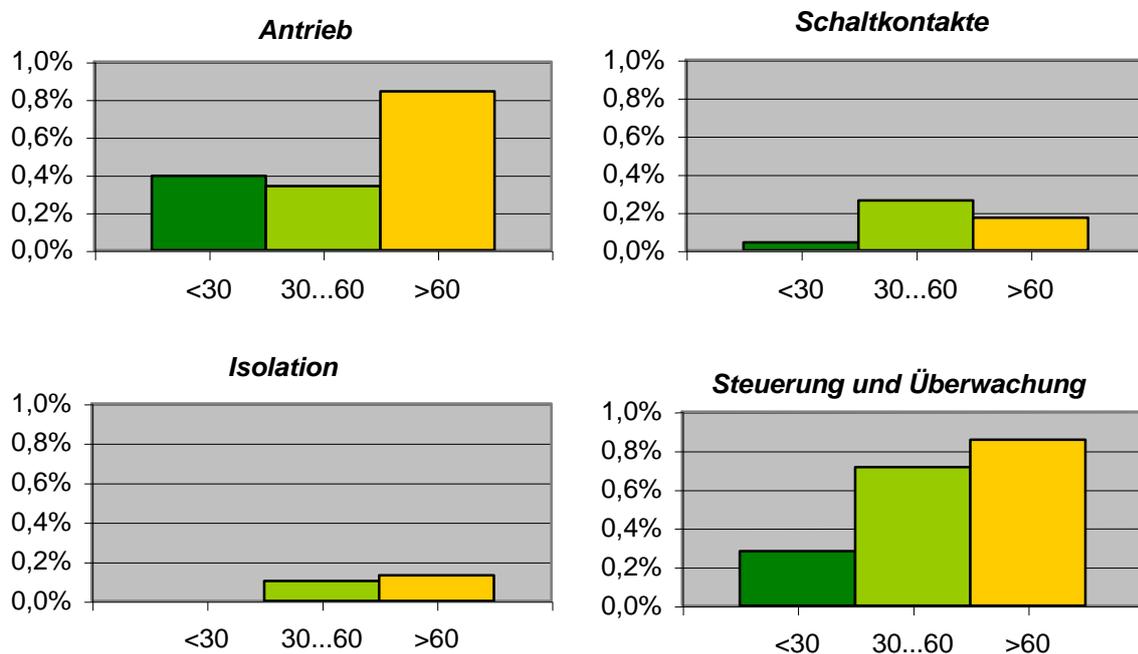


Bild 6.14 Häufigkeit der Instandsetzungsvorgänge bezogen auf die Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Zustandszahlen getrennt für einzelne Funktionseinheiten für die Summe aller Schalter des Typs Siemens H800/801(E) unter Berücksichtigung der realen Instandhaltungshistorien

6.3 Benutzung der Zustandszahl zur Erstellung des Instandhaltungsplans

6.3.1 Ermittlung von Revisionszeiten

Für die Ermittlung der Revisionszeiten wurden im Abschnitt 6.2 nur die Zustandsprognosen von vier der fünf im Modell definierten Funktionseinheiten berücksichtigt. Der Zustand der Funktionseinheit „Öldichtigkeit“ spielte hierfür keine Rolle. Die Gründe für den Ausschluss dieser Einheit des Modells bei der Ermittlung der Revisionszeiten liegen zum einen darin, dass zur Aufdeckung einer Ölundichtigkeit, dem einzigen auftretenden Mangel an dieser Einheit, keine Revision nötig ist, sondern eine Begehung ausreicht. Zum anderen handelt es sich hierbei um eine von der technischen Notwendigkeit, d.h. dem Funktionserhalt des Schalters, weitgehend unabhängige Instandsetzung, da erst ein großer Ölverlust hierfür kritisch wäre, der aber durch Druckwächter rechtzeitig gemeldet würde.

Ferner wurde für die Ermittlung der Revisionszeiten die maximale der vier zu den Funktionseinheiten gehörenden Zustandszahlen benutzt. Bei der in Bild 6.9 beschriebenen Simulation entwickelten sich die Zustandszahlen der unterschiedlichen Funktionseinheiten sehr ähnlich, so dass es so erscheint, als könne man ebensogut eine Zustandszahl einer beliebigen Funktionseinheit oder die Summe der Zustandszahlen als Maß für die Notwendigkeit einer Revision heranziehen. Das in Bild 6.9 dargestellte Ergebnis beruht aber auf die Annahme, dass keine außergewöhnlichen Belastungen bzw. Abnutzungen einzelner Funktionseinheiten aufgedeckt wurden. Wäre dies der Fall (z.B. während einer Revision oder auf Grund einer durchgeführten Diagnose), so würden die vom Modell prognostizierten Zustandszahlen für die unterschiedlichen Funktionseinheiten unter Umständen erheblich differieren. In einem solchen Fall muss die maximale Zustandszahl das Auslösekriterium für das Anberaumen einer Revision sein, da der drohende Funktionsverlust einer Funktionseinheit nicht durch den noch guten Zustand einer anderen Einheit kompensiert werden kann.

Aus den genannten Gründen kann die für die Ermittlung des Revisionszeitpunktes ausschlaggebende Zustandszahl als Maximum der vier Zustandszahlen der Funktionseinheiten „Antrieb“, „Schaltkontakte“, „Isolation“ und „Steuerung und Überwachung“ definiert werden. Im Gegensatz zu den im Abschnitt 6.2 durchgeführten Simulationen ist in der Praxis davon auszugehen, dass eine Revision nicht bei Erreichen bzw. Überschreiten eines festgelegten Grenzwertes durchgeführt wird. Diese Annahme war lediglich wegen fehlender Kenntnisse über die jeweiligen Randbedingungen (Material- und Personalressourcen, vertragliche Bindungen etc.) für die Simulation nötig. Im Netzbetrieb ist die Zahl der durchführbaren Revisionen pro Zeitraum begrenzt, so dass kein fester Grenzwert, sondern eine Prioritätenliste ausschlaggebend sein wird. Aus diesem Grund wurde bereits in Abschnitt 6.2.2 auf die gleichzeitige Einführung mehrerer Grenzwerte für Plausibilitätsgrad und Glaubensgrad verzichtet und stattdessen aus beiden Größen eine Zustandszahl ermittelt, die einen Vergleich verschiedener, zu einem festen Zeitpunkt vorliegender Zustände erlaubt.

Zur Ermittlung der Instandhaltungspriorität P müssen der Zustand Z_K der Komponente K und deren Bedeutung B_K kombiniert werden. Bild 6.15 zeigt einen Überblick über das in [8]

entwickelte Verfahren, dass an die in [9] vorgeschlagene, grafische Verknüpfung angelehnt ist.

Die Werte der Zustandszahl Z_K der Komponente K und deren Bedeutung B_K (aus Zuverlässigkeitsberechnungen ermittelt) werden hier in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen. Die Abszisse beschreibt die Bedeutung, auf der Ordinate wird die Zustandszahl aufgetragen.

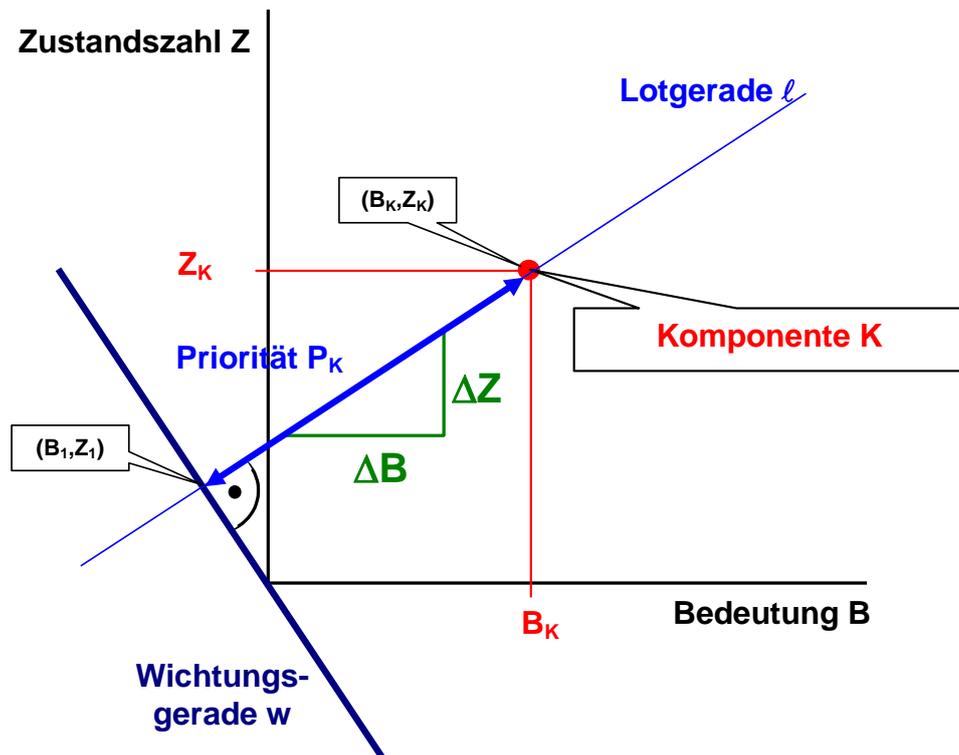


Bild 6.15 Verfahren zur Ermittlung der Instandhaltungspriorität P_K [8]

Durch eine Wichtungsgerade wird es ermöglicht, je nach Vorgabe die Bedeutung B oder den Zustand Z stärker zu bewerten. Die Instandhaltungspriorität P_K der Komponente K ist gleich dem lotrechten Abstand zwischen der Wichtungsgeraden w und dem Punkt (B_K, Z_K) .

Die Steigung der Wichtungsgeraden kann frei gewählt werden. Mit ihr wird der Einfluß des Zustandes Z_K und der Bedeutung B_K auf die Instandhaltungspriorität P_K beeinflusst. Ist ΔZ sehr groß gegenüber ΔB , wird der Zustand überbewertet. Bei $\Delta Z \rightarrow \infty$ wird die Steigung der Wichtungsgeraden null, in die Instandhaltungspriorität P_K geht nur der Zustand Z_K ein. Man erhält eine Instandhaltungspriorität, die unabhängig von der Bedeutung des Betriebsmittels im Netz ist.

Ist ΔB sehr groß gegenüber ΔZ , wird der Zustand überbewertet. Bei $\Delta B \rightarrow \infty$ wird die Steigung der Wichtungsgeraden unendlich, in die Instandhaltungspriorität P_K geht nur die Bedeutung B_K ein.

Die Instandhaltungspriorität P_K einer Komponente berechnet sich gemäß Bild 6.15 zu:

$$P_K = \sqrt{(B_K - B_1)^2 + (Z_K - Z_1)^2} \quad (6.5)$$

Für die Steigung der Lotgeraden ℓ bzw. für die Wichtungsgerade w gilt:

$$m_\ell = \frac{\Delta Z}{\Delta B}, \quad m_w = -\frac{1}{m_\ell} = -\frac{\Delta B}{\Delta Z} \quad (6.6)$$

Für die Wichtungsgerade w gilt:

$$Z = m_w \cdot B = -\frac{1}{m_\ell} \cdot B \quad (6.7)$$

und für den Punkt (B_1, Z_1) ergibt sich

$$Z_1 = -\frac{1}{m_\ell} \cdot B_1 \quad (6.8)$$

Für die Lotgerade ℓ gilt allgemein:

$$Z = m_\ell \cdot (B - B_K) + Z_K \quad (6.9)$$

und für den Punkt (B_1, Z_1) ergibt sich:

$$Z_1 = m_\ell \cdot (B_1 - B_K) + Z_K \quad (6.10)$$

Setzt man die Gln. (6.8) und (6.10) gleich und löst nach B_1 auf, so erhält man:

$$B_1 = \frac{m_\ell^2 \cdot B_K - m_\ell \cdot Z_K}{1 + m_\ell^2} \quad (6.11)$$

Setzt man Gl. (6.11) in Gl. (6.8) ein, erhält man:

$$Z_1 = \frac{Z_K - m_\ell \cdot B_K}{1 + m_\ell^2} \quad (6.12)$$

Setzt man die Gln. (6.11) und (6.12) wiederum in die Gl. (6.5) ein, erhält man:

$$P_K = \sqrt{\frac{(B_K + m_\ell \cdot Z_K)^2}{1 + m_\ell^2}} \quad (6.13)$$

Eine Grenzwertbetrachtung liefert die Grenzen der Wertebereiche und bestätigt die o.g. Aussagen:

$$m_\ell \rightarrow \infty: P_K = |Z_K| \quad (6.14)$$

$$m_\ell \rightarrow 0: P_K = |B_K| \quad (6.15)$$

$$m_\ell \rightarrow 1: P_K = \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(B_K + Z_K) \right| \quad (6.16)$$

Die Priorität nach Gl. (6.13) erlaubt auf Basis der Eingaben für die Zustandszahl Z und die Bedeutung B eine Verknüpfung beider Größen. Unter Beachtung der vorhandenen Ressourcen und zeitlicher Einschränkungen aus weiteren Randbedingungen kann damit der Instandhaltungsplan erstellt werden, indem stets die Revisionen mit der höchsten Priorität anberaumt werden. Gegebenenfalls muss dabei zusätzlich die Einhaltung minimaler und maximaler Revisionsintervalle berücksichtigt werden.

6.3.2 Ermittlung von Zeiten für Begehungen

Bei der Ermittlung der sinnvollen Zeiten für eine Begehung einer Hochspannungs-Schaltanlage muss beachtet werden, dass eine Begehung nicht nur zur Überprüfung eines Betriebsmittels, sondern in der Regel der visuellen Überprüfung aller Betriebsmittel der Anlage oder eines Teils der Anlage dient. Der Zeitpunkt für die Begehung wird sich deshalb nach der maximalen Priorität richten, die sich über alle Betriebsmittel der Schaltanlage ergibt, oder, mit anderen Worten, nach dem kürzesten als notwendig ermittelten Begehungsintervall. Dies setzt voraus, dass entsprechende Grenzen oder Prioritätenlisten für alle Betriebsmittel vorliegen.

Wie bei der Ermittlung der Revisionsintervalle gibt es auch bei der Ermittlung der Begehungsintervalle noch weitere, außerhalb der Notwendigkeit für eine Überprüfung des technischen Zustands und der Öldichtigkeit liegende Kriterien, die gegebenenfalls auch hier als zusätzlich einzuhaltende Bedingungen z.B. in Form maximaler Zeitintervalle zwischen zwei Begehungen eingebracht werden müssen. Beispiele hierfür können die Überprüfung des Bewuchses durch Bäume und Sträucher oder die Kontrolle des Zustandes der Absperungen und Zäune sein.

Das vorliegende Modell für einen Schaltertyp liefert daher nur einen Teilaspekt für die Festlegung eines Zeitpunktes für eine Begehung. Hinsichtlich der an einem Schalter des betrachteten Typs abnutzungsbedingt auftretender und einen Eingriff erfordernder Zustände, die bei Begehungen erkannt werden können, spielt im vorliegenden Modell die Funktionseinheit „Öldichtigkeit“ die entscheidende Rolle. Der Zustand dieser Einheit liefert die für die Prioritätenliste für Begehungen ausschlaggebende zustandsbeschreibende Größe für einen

Schalter dieses Typs, weil für den betrachteten Schaltertyp hier die weitaus meisten Eingriffe vorgenommen wurden, deren Notwendigkeit bei Begehungen erkannt werden kann.

Dass von einem Leistungsschalter des vorliegenden Typs die Notwendigkeit für zusätzliche Begehungen zwischen den Revisionen ausgeht, wenn man eine Ölleckage frühzeitig beseitigen will, lässt sich aus Bild 6.16 erkennen. Beispielhaft ist dort der Verlauf der Zustandszahl Z für die Funktionseinheit „Öldichtigkeit“ über das Betriebsalter in Jahren unter der Annahme aufgetragen, dass bei zyklischer Instandhaltung mit einem festen Revisionsintervall von sechs Jahren keine Begehungen stattfinden. Zumeist überschreitet die Zustandszahl drei bis vier Jahre nach der letzten Revision den Wert von 100 % und steigt zwischenzeitlich einmal so rasch an, dass ein Wert von mehr als 300 % erreicht wird. Bei einer Verlängerung der Revisionsintervalle, wie dies angestrebt ist, ergäben sich aufgrund der mathematischen Ausgestaltung des Modells noch höhere Werte, wenn keine zwischenzeitliche Begehung erfolgte. Letztendlich entscheiden die bei den Netzbetreibern zur Verfügung stehenden Ressourcen, wie oft Begehungen möglich sind. Ein integriertes Instandhaltungsmanagement gemäß Bild 3.1 kann lediglich Prioritätenlisten liefern.

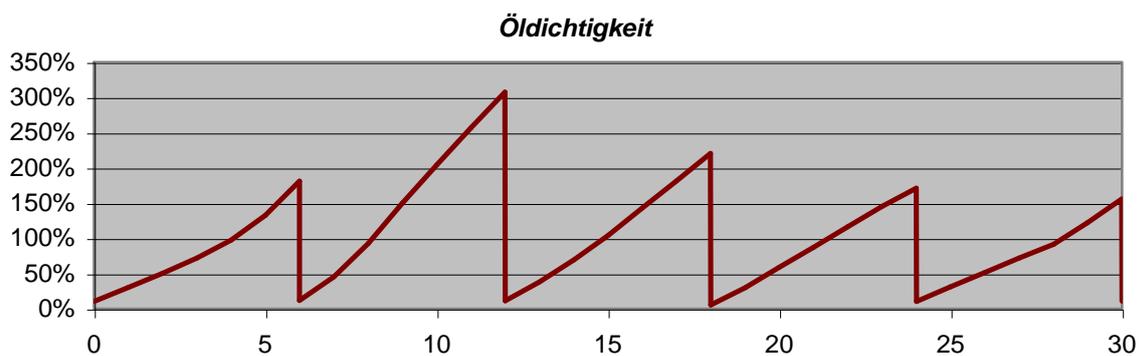


Bild 6.16 Verlauf der Zustandszahl für die Funktionseinheit „Öldichtigkeit“ des Schalters Siemens H800/801(E) aufgetragen über das Betriebsalter in Jahren bei Annahme eines festen Revisionsintervalls von sechs Jahren und ohne zwischenzeitliche Begehungen

7 Diskussion und Ausblick

Das im Rahmen des beschriebenen Vorhabens entwickelte Modell erlaubt es, alle aus der Vergangenheit vorliegenden Hinweise, die zur Abschätzung des Zustand einzelner Komponenten eines Schalters vom Typ Siemens H800/801(E) geeignet sind, zu einer resultierenden Aussage über den Zustand getrennt nach den wesentlichen Funktionseinheiten zusammenzufassen. Es ist ferner so gestaltet, dass Modifikationen und Anpassungen, sofern erforderlich mit vergleichsweise geringem Aufwand eingebracht werden können. Insbesondere können zukünftig gesammelte, über den derzeitigen Umfang hinausgehende Hinweise nach geeigneter Bewertung und Zuordnung zur betreffenden Funktionseinheit ebenfalls ohne Veränderung der prinzipiellen Wirkungsweise des Modells eingebracht werden. Das Modell erlaubt Erweiterungen um beliebig viele Informationsquellen.

Die Gültigkeit der aus den Ergebnissen des Modells abgeleiteten Zustandszahl konnte anhand eines Vergleichs umfangreicher Simulationsergebnisse mit dem realen, für 227 im Betrieb befindliche Schalter des nachgebildeten Typs dokumentierten Instandsetzungsgeschehen im Rahmen statistischer Betrachtungen nachgewiesen werden. Somit wurde das Ziel des Forschungsprojekts erreicht, auch wenn das ursprüngliche Vorhaben, möglichst viele, voneinander unabhängige Kriterien für betriebliche Abnutzung zu finden und zu quantifizieren, fallen gelassen werden musste. Die Gründe hierfür sind vielfältig, die wesentlichen seien nachfolgend kurz aufgelistet:

Erstens gibt es kein allgemein anerkanntes Maß für die Abnutzung einer jeden Funktionseinheit des Leistungsschalters. Die in Revisionsprotokollen nur spärlich zu findenden Bemerkungen zu Abnutzungserscheinungen sind zudem subjektiv und daher miteinander kaum in Vergleich zu bringen. Messungen der Durchschlagsspannung des Isolieröls oder des Abbrands der Schaltkontakte liefern zwar quantitative Größen, doch gibt es hierzu praktisch keine Zuordnung von daraus zu erwartenden erhöhten Störungswahrscheinlichkeiten, da in der Vergangenheit stets frühzeitig ein Austausch erfolgte, wenn die festgestellte Abnutzung in einen vermeintlich kritischen Bereich reichte. Zweitens treten extreme betriebliche Belastungen, die den Schalter oder Funktionseinheiten davon bis an die Grenzen belasten, äußerst selten auf [14]. Wenn sie dennoch auftraten, so wurden sie in der Vergangenheit in der Regel nicht oder zumindest auf eine Weise dokumentiert, die für eine Aussage über die Schwere der Belastung nicht ausreicht. Beide Gründe machten es unmöglich, wie ursprünglich geplant Korrelationen zwischen solchen Extrembeanspruchungen und einer festgestellter Abnutzung nachzuweisen.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Modellbildung besteht darin, dass notwendige Eingriffe zum Erhalt der Funktionsfähigkeit, die nicht durch äußere Einflüsse oder Montagefehler verursacht waren (Instandsetzungen der Klassen 1 bis 3), zu einem Großteil vermeintlich stochastisch auftreten, das heißt ohne erkennbaren Anlass einen bestimmten Schalter zu einem bestimmten Zeitpunkt betreffen.

Aus genannten Gründen war es naheliegend, die Liste der dokumentierten Instandsetzungen als Grundlage für das Instandhaltungs- und Abnutzungsmodell zu wählen. Hierfür wurden die gelisteten Instandsetzungen hinsichtlich ihrer Ursache, ihrer Bedeutung und Notwendigkeit, sowie ihrer Zugehörigkeit zu einer der im Modell definierten Funktionseinheiten klassifiziert. Die resultierenden Statistiken geben Aufschluss über den zu erwartenden Instandsetzungsbedarf abhängig vom Betriebsalter. Sie beinhalten sowohl die vermeintlich stochastischen Ereignisse als auch die durch die (durchschnittliche) Belastung der Schalter auftretende durchschnittliche Abnutzung. Es konnte nachgewiesen werden, dass der zu erwartende Instandsetzungsbedarf mit zunehmendem Alter zunimmt.

In die vom Modell ermittelte Zustandszahl fließen sowohl die zu erwartende Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf als auch die Plausibilität hierfür ein, wobei letztere insbesondere die Unkenntnis über den Zustand einer Funktionseinheit beschreibt. Beide Größen wurden als die für das Anberaumen einer Revision entscheidenden, den Zustand beschreibenden Größen angenommen und deshalb in der Zustandszahl miteinander vereint.

Da eine Revision für einige der Funktionseinheiten auch Eingriffe beinhaltet, die wahrscheinlich zustandsverbessernd im Sinne des zu erwartenden Instandsetzungsbedarfes nach der Revision sind, wie zum Beispiel das Reinigen und Schmieren beweglicher Teile oder der Austausch kleiner Verschleißteile, wurde für solche Einheiten eine sich aufsummierende zusätzliche Wahrscheinlichkeit für einen Instandsetzungsbedarf definiert. Diese wurde als Informationsquelle „Abnutzung“ derart im Modell nachgebildet, dass sie bei einem gleichen Revisionszyklus wie in der Vergangenheit ohne Einfluss auf die zum Zeitpunkt der Revision prognostizierte Wahrscheinlichkeit bleibt, bei verlängerten Revisionszyklen aber höhere Wahrscheinlichkeiten prognostiziert werden.

Da der Einfluss verlängerter Revisionszyklen mangels vorhandener Bewertung des gewonnenen Abnutzungsvorrats durch die während Revisionen routinemäßig durchgeführten Arbeiten bzw. aufgrund des Mangels an ausreichenden Erfahrungen hierzu (noch) nicht quantifizierbar ist, geschah dies im Modell zunächst heuristisch. Der Nachweis der Gültigkeit dieser Annahme bzw. eine Korrektur kann erst in Zukunft erfolgen, wenn Erfahrungen mit verlängerten Revisionszyklen vorliegen.

Das gleiche Problem tritt auch beim Einbringen weiterer Informationsquellen in das Modell auf. Jede weitere Informationsquelle, die eine differenzierte Beschreibung der individuell voneinander abweichenden Zustandsentwicklungen unterschiedlicher Schalter erlaubt, muss hinsichtlich der Wichtung für das Modell bewertet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine durchschnittliche Belastung oder Abnutzung, wie oben bereits erwähnt, durch die Statistik für den (durchschnittlich) zu erwartenden Instandsetzungsbedarf bereits in der Zustandsprognose enthalten ist. Lediglich vom Durchschnitt des Kollektivs abweichende Belastungen sind, in die eine oder andere Richtung als zusätzlicher Hinweis, einzubringen. Für das korrekte Maß der Wichtung fehlen jedoch wegen der Seltenheit des Nachweises solcher Abweichungen verlässliche Datenbasen zur Ermittlung von Erfahrungswerten.

Für die zukünftige Erfassung und Auswertung von Instandhaltungsdaten lassen sich deshalb folgende Forderungen ableiten, um eine verbesserte Zustandsbeurteilung durch das entwickelte Modell zu ermöglichen:

Betriebliche Abnutzung:

- Unter Einbeziehung der Hersteller sollten Listen abnutzungsrelevanter Kenngrößen für vergleichbare Funktionseinheiten aufgestellt werden. Sofern diese Größen im Netzbetrieb mit vertretbarem Aufwand erfasst werden können, sollten diese in Datenbanken ausgewertet werden.
- Es sind Durchschnittswerte dieser Kenngrößen zu ermitteln und darauf aufbauend Grenzen für maßgebliche Abweichungen nach oben oder unten zu definieren.

Zustandskontrollen:

- Kriterien für die Klassifizierung einer während Revisionen ermittelten Abnutzung als durchschnittliche, über- und unterdurchschnittliche Abnutzung abhängig vom Betriebsalter sind aufzustellen, so dass eine objektive Bewertung des vorgefundenen Zustands stattfindet. Somit wird ein Vergleich mit dem vom Modell prognostizierten Zustand möglich. Abweichungen können im Modell berücksichtigt werden, das Modell selbst kann gegebenenfalls verbessert werden.
- Ebenso sind Kriterien für die Bewertung der Ergebnisse eventuell durchgeführter Offline-Diagnosen notwendig. Hier gibt es bereits Erfahrungswerte für die dynamische Widerstandsmessung (DRM) sowie für Weg-Zeit-Messungen und Messungen durch Beschleunigungsaufnehmer.

Instandsetzungsstatistiken:

- Die durchgeführten Instandsetzungen sollten, wie in Abschnitt 5.3.4 geschehen, hinsichtlich ihrer Ursache, ihrer Bedeutung und Notwendigkeit, sowie ihrer Zugehörigkeit zu einer der im Modell definierten Funktionseinheiten klassifiziert und in entsprechend strukturierten Datenbanken hinterlegt werden, so dass statistische Aussagen direkt abgerufen werden können.
- Um eine aussagefähige Prognose der Zustandsentwicklung für einige Jahre im voraus zu ermöglichen (unter Umständen entscheidend für die Beurteilung, ob eine Funktionseinheit in eine Revision einbezogen werden soll), ist es notwendig, Statistiken für den Verlauf der Wahrscheinlichkeit eines Instandsetzungsbedarfes über das Betriebsalter zu führen.
- Die Statistiken für jede Funktionseinheit sollten zunächst für jeden Schaltertyp getrennt erstellt werden. Es wird aber zur Erlangung eines ausreichend großen Kollektivs und beim Einsatz neuer Schaltertypen, für die keine Betriebserfahrung und damit keine Statistik vorliegt, notwendig sein, die Statistiken von vergleichbaren Funktionseinheiten unterschiedlicher Schaltertypen zusammenzufassen. So kann der betrachtete Schaltertyp den prinzipiell gleichen Antrieb eines zweiten und die Schaltkontakte eines dritten im

Betrieb befindlichen Schaltertyps aufweisen. Somit werden die Statistiken aussagekräftiger und erlauben auch bei „neuen“ Schaltertypen Prognosen für die Zukunft.

- Um die Unschärfen bei der Datierung des notwendigen Zeitpunktes einer Instandsetzung zu berücksichtigen und um stochastische Schwankungen auszugleichen, sollte eine Glättung der Instandsetzungsbedarfsstatistik gemäß Gleichung (6.2) oder einem anderen geeigneten Verfahrens erfolgen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass, sobald die Instandhaltungsdatenbanken eine ausreichend abgesicherte Datenbasis bereitstellen, eine gewisse Automatisierung der Modellbildung und der Parametrierung des Modells möglich wird. Dies würde den erheblichen Arbeits- und Kostenaufwand reduzieren, der aufgrund der händischen Auswertung der Betriebserfahrungen zur Zeit bei der Erstellung und stetigen Überprüfung derartiger Modelle erforderlich ist.

Wie sich aus Erhebungen unter den Netzbetreibern zum Ende des vergangenen Jahrzehnts erkennen lässt, beschäftigen sich derzeit viele Energieversorger mit dem Aufbau von Instandhaltungsdatenbanken. Teilweise sind auch bereits entsprechende Datenbanken im produktiven Einsatz [1]. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit belastbare Daten zur Verfügung stehen.

Solange die Abnutzung anhand definierter Kriterien noch nicht im Modell implementiert ist, drückt sich eine zunehmende Alterung, d.h. Zustandsverschlechterung in der vom Modell ermittelten Zustandszahl nicht aus. Stattdessen wird, betrachtet man nur die Zustandszahl, nach jeder Revision praktisch wieder der Ausgangs-(=Neu-)zustand hergestellt. Eine Alterung ist dennoch über die Instandsetzungsbedarfsstatistik im Modell berücksichtigt, da die Statistik altersabhängig geführt wird und bei erhöhtem Instandsetzungsbedarf wegen Alterung die Zustandszahlen entsprechend schneller wachsen. Der Bedarf für eine Sanierung oder Austausch einzelner Einheiten oder des ganzen Schalters kann im derzeitigen Modell daher nicht aus der Zustandszahl, sondern lediglich aus der Geschwindigkeit ihrer Zunahme abgelesen werden. Dies drückt sich letztlich in sich verringernden Revisionszyklen oder, bei festen vorgegebenen Revisionszyklen, in steigenden Zustandszahlen und Prioritäten für Revisionen aus.

Trotz der Liste der wünschenswerten Verbesserungen für die Bereitstellung von Instandhaltungs- und Belastungsdaten konnte im Rahmen des durchgeführten Projekts gezeigt werden, dass ein Zustandsmodell auch jetzt bereits mit den bei den Netzbetreibern vorliegenden Daten realisiert werden kann. Die im Abschnitt 6.3 dargestellten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass ein solches Modell mit vertretbarem Aufwand auch für andere Schaltertypen erfolgreich eingeführt werden kann, wenn ein ausreichend großes Kollektiv gleicher oder ähnlicher Funktionseinheiten mit entsprechend dokumentierter Instandsetzungshistorie vorliegt.

8 Literatur

- [1] Linke, K.; Dickers, K.H.:
Instandhaltungs-Management im Hochspannungs-Transportnetz.
- Einsatz von SAP R/3 PM bei VEW ENERGIE -
Elektrie 51 (1997), S. 237-247.
- [2] Balzer, G.; Brandl, M.; Strnad, A.; Röhler, H.; Schnettler, A.:
Rechnergestützte Instandhaltungsplanung für elektrische Netze.
ABB Technik 4/1997, S. 21-25.
- [3] Breithauer, G.; Handschin, E.; Neumann, U.; Weber, Th.; Wellßow, W.H.:
New Approaches for Maintenance Management for Grid Facilities.
CIGRE 1998 (Veröffentlichung erfolgt 9/98).
- [4] Pitz, V.; Weber, Th.:
An Approach for Future Maintenance Management of High-Voltage Circuit-Breakers.
11th International Conference on Power System Automation and Control - PSAC '99
Bled, Slovenia, 6. - 8. October 1999.
- [5] Brauner, G.; Lavicka, G.; Reisinger, F.; Vogler, K.:
Anlagen-Zustandsbewertung und Erneuerungsstrategien.
e&i, 117. Jg. (2000), S. 624 – 628.
- [6] FGH Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.:
ZuBer – ein Programm zur Berechnung der Versorgungszuverlässigkeit in Netzen der elektrischen Energieversorgung.
Handbuch, Version 2.02, Februar 1998.
- [7] Neumann, U.:
Integrierte Instandhaltungsplanung für elektrische Energieversorgungsnetze.
VDI-Fortschrittsberichte 1998.
- [8] Forschungsinstitut der FGH e.V.:
Instandhaltungsplanung elektrischer Energieversorgungsnetze.
AiF-Vorhaben Nr. 11055N, Schlussbericht, 1999.
- [9] Balzer, G.; Brandl, M.; Strnad, A.; Schnettler, A.; Mathis, M.:
Rechnergestützte Instandhaltungsoptimierung im Netzbereich: Anwendung und praktische Erfahrung bei EVS.
Elektrizitätswirtschaft Jg. 97 (1998), Heft 12, S. 26 – 32.
- [10] Endrenyi, J.; Anders, G.J.; Leite da Silva, A.M.:
Probabilistic Evaluation of the Effect of Maintenance on Reliability - An Application.
IEEE Transactions on Power Systems, 1997.
- [11] Pitz, V.:
Condition Forecasting of High-Voltage Circuit-Breakers Using the Theory of Evidence.
in: Bitzer, B. (Hrsg): Proceedings of the 3rd European IFS Workshop Intelligent Forecasting Systems for Refineries and Power Systems. Schriftenreihe des Wrangell-Instituts für Umweltgerechte Produktautomatisierung, Band 2. Shaker Verlag, Aachen, 2000.

- [12] Shafer G.:
A Mathematical Theory of Evidence.
Princeton University Press, 1976.
- [13] Dempster, A. P.:
Upper and lower probability induced by a multivalued mapping.
Annals of Mathematical Statistics 38, S.325 – 339, 1967.
- [14] Becker, J.; Balzer, G.; Meister, R.; Neumann, C.:
Beanspruchungen von Hochspannungs-Leistungsschaltern am Beispiel zweier EVU.
Elektrizitätswirtschaft Jg. 99 (2000), Heft 11, S. 27 – 34.
- [15] *VDEW Störungs- und Schadensstatistik.*
Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke - VDEW e.V., Frankfurt.