

Zustandsabhängige Bewertung

Neuer Ansatz zum Lebensdauermanagement für elektrische Betriebsmittel

Nicolaie L. Fantana, Lars Pettersson

Die zustandsabhängige Bewertung unterstützt Energieversorgungsunternehmen bei der Entscheidung, ob und wann sie ihre elektrischen Betriebsmittel, wie z. B. Leistungstransformatoren, instandsetzen, erneuern, nachrüsten oder austauschen müssen, um Betrieb und Rentabilität zu optimieren. Zur Bestimmung der einzelnen Risiken und Einsatzmöglichkeiten bei verschiedenen Netzszenarios greift die zustandsabhängige Bewertung auf objektive Informationen zurück, die von exakten Zahlenwerten bis hin zu eher unscharfen Angaben in «natürlicher Sprache» reichen. Diese Methode bietet Energieversorgern die Möglichkeit, die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit ihrer Betriebsmittel zu erhöhen, die Lebensdauerkosten zu senken und die Planung der Instandhaltung und der Erneuerung effizienter zu gestalten.



1 Betriebsmittel wie dieser Leistungstransformator stellen für Energieversorger hohe Vermögenswerte dar. Wann sie einen alten Transformator instandsetzen, austauschen oder modernisieren sollen, ist daher eine wichtige Entscheidung.

Die Liberalisierung des Energiemarktes verändert grundlegend die Art und Weise, wie Betriebsmittel der Energietechnik eingesetzt, instandgehalten und erneuert werden müssen. Die Funktionstüchtigkeit der Betriebsmittel ist Voraussetzung für einen kostengünstigen Stromhandel und für eine erfolgreiche Umsetzung der Bemühungen der Energieversorger, die Forderungen der Endverbraucher nach hoher «Power-Quality» zu erfüllen **1**.

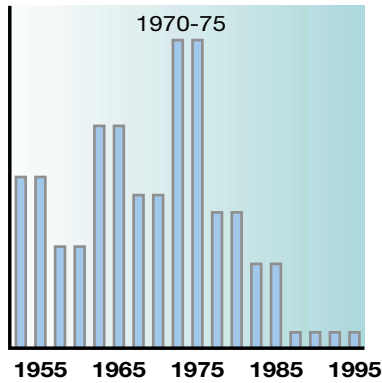
Drei Entwicklungstendenzen bestimmen heute das Lebensdauermanagement von elektrischen Betriebsmitteln:

- Verlängerung ihrer Lebensdauer
- Betrieb näher an den Bemessungsgrenzen der Anlagen unter Ausnutzung vorhandener Toleranzen
- Kostengünstige und bedarfsgerechte Erneuerungs- und Instandhaltungsstrategien

Diese Tendenzen sind zumindest teilweise widersprüchlich. So kann weniger Instandhaltungspersonal und -aufwand, die Reduzierung von Instandsetzungsmaßnahmen und der Aufschub der Erneuerung zu Störungen in den Betriebsmitteln sowie zu unerwarteten und kostspieligen Netzausfällen führen. In Ländern, in denen sich die Lebenserwartung eines Großteils der Betriebsmittel bereits dem Ende nähert **2**, könnte diese Vorgehensweise ernsthafte Folgen haben.

Solch ein relativ alter Anlagenpark könnte sehr bald die Erneuerung oder eine andere

2 Die Grafik zeigt ein typisches Profil von in den letzten Jahrzehnten installierten Einheiten und stellt somit eine Population aus alternden Transformatoren dar.



Form der Modernisierung vieler älterer Anlagenkomponenten erfordern. Allerdings dürfte die Erneuerung aller Einheiten innerhalb kurzer Zeit nicht nur die Betreiber, sondern auch die Hersteller vor besonders schwierige Probleme stellen.

Deshalb erfordern die Erneuerung und Modernisierung von Betriebsmitteln eine neue Strategie. Es gilt, mit ihr die anfälligsten und somit kritischsten Komponenten zu ermitteln, um diese als erste zu betrachten. Um einen solchen Lösungsansatz erfolgreich umzusetzen, dient als Grundlage die zustandsabhängige Bewertung der Betriebsmittel.

Der Weg zu objektiverem Lebensdauermanagement

Das Lebensdauermanagement von elektrischen Betriebsmitteln basiert auf einer Kette von Entscheidungen während der Betriebsdauer der einzelnen Komponenten. Oberstes Ziel ist die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit des Netzbetriebs.

Das Lebensdauermanagement erfüllt drei Hauptaufgaben: Die erste ist die *Erkennung bevorstehender Ausfälle* und die Vermeidung von unerwarteten Ausfällen der Betriebsmittel. Bei der zweiten geht es um das *Feststellen von*

Störungen oder fehlerhaften Zuständen. Bei der dritten Aufgabe schließlich handelt es sich um *strategische Planungen* zur Wartung und Erneuerung von Komponenten. Die strategische Planung muss im Interesse der Gewährleistung hoher Verfügbarkeit sämtliche Aktivitäten zur Erneuerung, Instandsetzung und Instandhaltung berücksichtigen.

Um diese Aufgaben zu erfüllen, wurden drei grundlegende Verfahren entwickelt (Tabelle 1):

- Überwachung der Betriebsmittel
- Diagnose der Betriebsmittel
- Zustandsabhängige Bewertung und «life assessment».

Bisher beruhten Entscheidungen zur Erneuerung von Betriebsmitteln lediglich auf deren Alter oder auf anderen subjektiven Kriterien. Da diese offensichtlich nicht ausreichten, wurde im Laufe der Jahre nach verschiedenen Alternativen gesucht.

Die Entwicklung von Bewertungsverfahren

In der Vergangenheit haben sich im Wesentlichen zwei Gruppen von Bewertungsverfahren für Betriebsmittel herauskristallisiert: *statistische Methoden* und *individuell orientierte Ansätze*,

die auf das Individuum, d.h. das Einzelgerät, ausgerichtet sind.

Die *statistischen Methoden* erfordern statistisch verwertbare, zuverlässige Daten in ausreichender Menge. Darüber hinaus sollten die betrachteten Betriebsmittel möglichst ähnlich konzipiert, ihr Ausfallmechanismus einfach und gut bekannt sein. Komplexe Betriebsmittel, wie Leistungstransformatoren, erfüllen diese Forderung eher selten. Meist ist jede Einheit ein Einzelstück. Statistische Betrachtungen hingegen setzen größere «Populationen» mit zumindest ähnlichen Einheiten voraus. Demnach eignen sich solche Verfahren für Leistungstransformatoren nicht. Sie können normalerweise «schwache» Einheiten nicht herausfinden.

Um die strategischen und betrieblichen Ziele zu erreichen, muss der Betriebsingenieur die anfälligsten Anlagenkomponenten erkennen können und das optimale Verfahren für die Erneuerung, die Instandhaltung und den Betrieb jeder Einheit wählen. Dafür benötigt er einen individuellen Ansatz.

Zu den individuellen Ansätzen gehören z. B. die *Bewertungsverfahren auf der Grundlage von Wichtungsfaktoren* und die so genannten «*modernen Bewertungsmethoden*».

Wichtungsmethoden lassen sich in der ersten Phase der Bewertung von Betriebsmitteln

Tabelle 1: Die «life assessment» und Zustandsbewertung lassen sich zur Unterstützung der komplexesten strategischen Planungsentscheidungen anwenden

Aufgabe \ Technologie	Überwachung	Diagnose	Lebensdauerbeurteilung
Bevorstehender Ausfall	X	x	
Ausfall	x	X	
Strategie	x Eingabedaten für LB	x Eingabedaten für LB	X

einsetzen. Sie sind zwar einfach und schnell, doch auch subjektiv im Hinblick auf die Beurteilung, die Eingabedaten und die verwendeten Wichtungsfaktoren. Die Ergebnisse liefern daher nur einen beschränkten physischen oder funktionellen Einblick in eine Teilkomponente des betrachteten Betriebsmittels und können zu einer Vermischung von unterschiedlichen Beanspruchungen und Risiken führen.

Die modernen Bewertungsmethoden können mehr objektive Informationen zur Unterstützung von Entscheidungen über die betrachtete Einheit liefern, doch setzen sie die Kenntnis der Historie voraus. Diese Daten und das notwendige Know-how müssen zu einer allgemeinen Bewertungsstrategie kombiniert werden.

ABB hat eine moderne zustandsabhängige Bewertungsmethode entwickelt, um den aktuellen Lebensdauerstatus von elektrischen Betriebsmitteln, wie den Leistungstransformatoren, zu beurteilen.

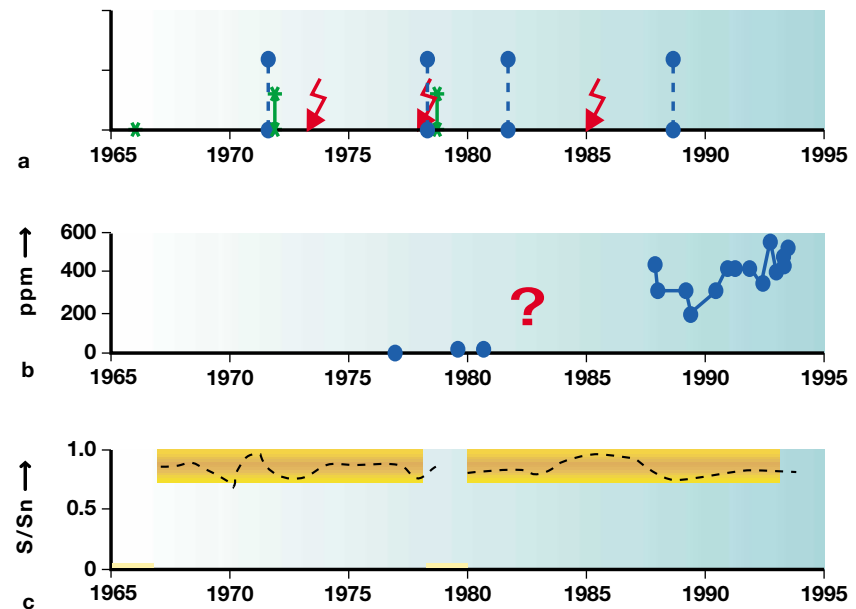
Daten der Betriebsmittel

Wie erwähnt, benötigen moderne Methoden für die Einschätzung des Zustandes Kenntnisse zur Historie des Betriebsmittels.

Über die gesamte Lebensdauer eines Leistungstransformators – oder jedes anderen Betriebsmittels der Energietechnik – tragen zahlreiche Faktoren in unterschiedlichem Maße zu Veränderungen seiner Funktionalität bei. Für die Lebensdauerdaten solcher Einheiten gibt es zwei Hauptquellen: die Energieversorgungsunternehmen und den Hersteller des Betriebsmittels.

Einige der wichtigsten Daten stammen aus der Überwachung und Diagnose der Einheit.

Während die Lebensdauerdaten ein wichtiges Element für jede zustandsabhängige Bewertung darstellen, hängen die Menge und Qualität der eingegebenen Daten – und auch die Art der



3 Beispiel für die Lebensdauerdaten eines alten Leistungstransformators

- a Betriebsereignisse (rote Pfeile) ● Kurzschlüsse
- b Wasserstoff in Öl (ppm) * Instandsetzungen
- c Last (S/Sn) ? Fehlende Daten

Verarbeitung – vorwiegend von den Erwartungen des jeweiligen Betreibers ab. Eine umfassende und detaillierte zustandsabhängige Bewertung setzt die Erfassung der Hauptquellen für Transformatorendaten und der Ereignisse während der gesamten Lebensdauer des Betriebsmittels voraus.

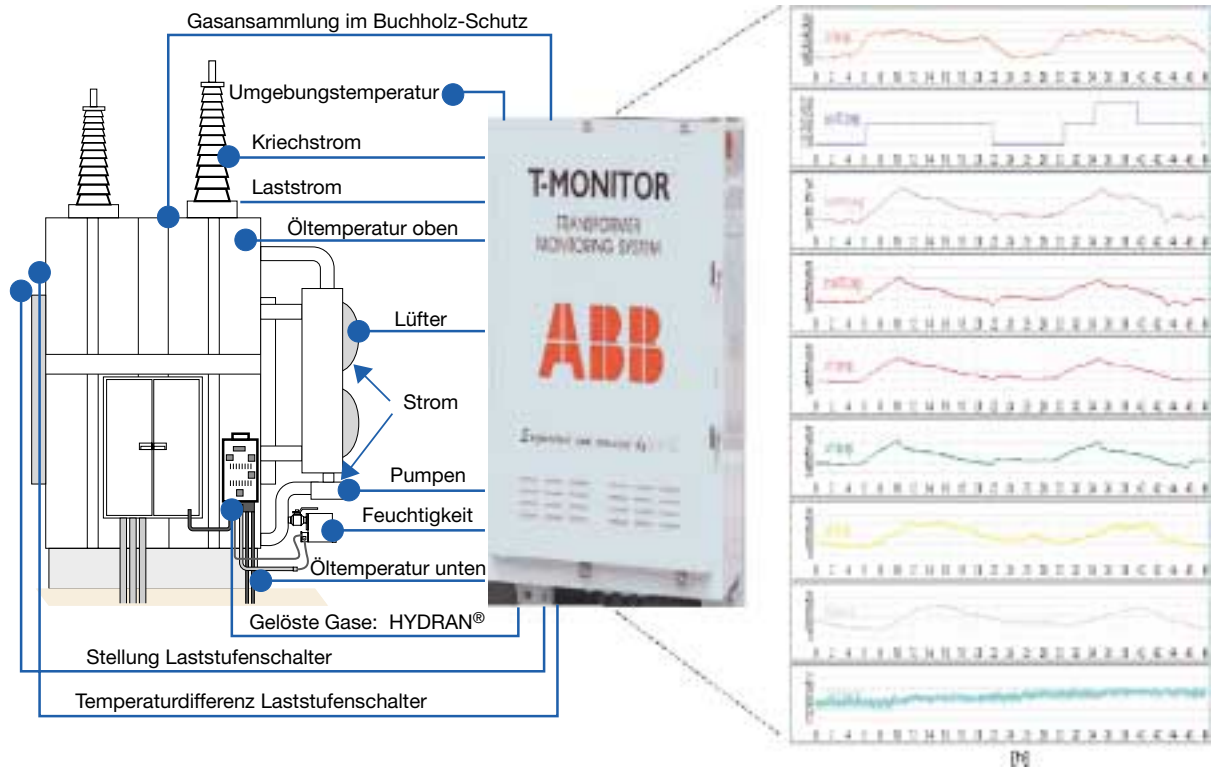
Im Falle von Leistungstransformatoren stammen diese Daten in erster Linie aus:

- der Konstruktion und Herstellung
- dem normalen Betrieb und den Umgebungsbedingungen
- außergewöhnlichen Ereignissen im Stromnetz, die sich auf die Lebensdauer auswirken
- der Instandhaltung, Instandsetzung, örtlicher Umsetzung, Transport usw. der Einheit
- der Überwachung und Diagnose

Lebensdauerdaten können heterogen, verteilt, unsicher, ungenau oder unvollständig und darüber hinaus an verschiedenen Stellen gespeichert sein. In der Praxis sind die verfügbaren Daten selten ideal. Oft stammen sie von unterschiedlichen Besitzern. Und je älter die Einheit ist, desto schwerer fällt es meist, zuverlässige und präzise Informationen zu erhalten 3.

Neben numerischen Datensätzen und Dokumenten können auch sprachlich festgehaltene Lebensdauerdaten nützliche Informationen liefern. So ist zum Beispiel die Aussage «fast Vollast» durchaus wertvoll, wenn sie von einem Experten stammt. Selbst Schätzungen wie «niedrig», «hoch» oder «mittel» lassen sich verwenden. Die Einbindung solcher unscharfer Daten war eines der Ziele bei der Entwicklung des Systems zur Unterstützung der zustandsabhängigen Bewertung.

4 Überwachungssysteme für Transformatoren liefern wertvolle Daten über installierte Betriebsmittel.



Überwachungssysteme sollen in erster Linie kurz bevorstehende Ausfälle aufdecken. Steht ein solches System zur Verfügung, so eignet es sich hervorragend als Datenquelle für die zustandsabhängige Bewertung und für «life assessment» bzw. das Lebensdauermanagement.

Überwachungssysteme wie der T-Monitor von ABB **4** werden immer leistungsstärker. Da ihre Verbreitung zunimmt, steigt auch die Qualität der verfügbaren Lebensdauerdaten.

Ansatz zur Bewertung der Betriebsmittel

Vor der Nutzung eines Bewertungssystems gilt es, drei wichtige Fragen zu beantworten:

- Was muss bewertet werden?
- Welches Verfahren eignet sich am besten?

- Welche Werkzeuge sind für die verschiedenen Arten von Variablen erforderlich?

Gebrauchstauglichkeit – «suitability-for-use»

Im Rahmen der Lebensdauerbewertung muss sich ein Betriebsingenieur so grundlegende Fragen stellen wie: Welche Maßnahme sollte getroffen werden und mit welcher Priorität? Ist es sicher, eine bestimmte Einheit weiter in Betrieb zu behalten? Sollte die Einheit modernisiert oder erneuert werden?

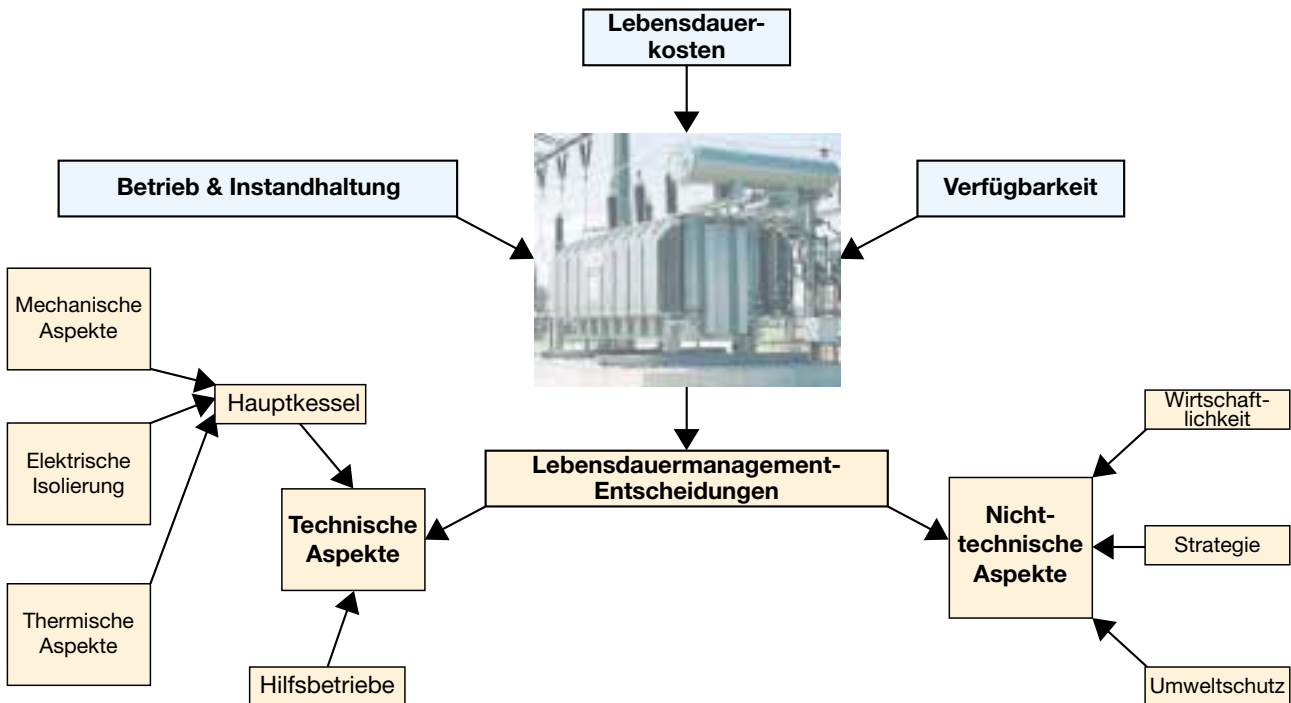
Für solche Fragen muss es klare Definitionen geben. Dabei soll die Bewertungsmethode nicht nur objektiv, sondern auch kostengünstig sein. Der herkömmliche Ansatz, der nur ein Kriterium, z. B. das Alter der Einheit oder den

Zustand der Papierisolation, berücksichtigt, genügt nicht mehr.

Der Schlüsselfaktor bei der von ABB entwickelten Methode ist die *Gebrauchstauglichkeit* der einzelnen Einheit, d.h. die Einsatzfähigkeit des betrachteten Betriebsmittels unter definierten Betriebsbedingungen an einer bestimmten Stelle des elektrischen Systems. Die Gebrauchstauglichkeit hängt somit von der Art ab, wie das Betriebsmittel beansprucht wird.

Das neue Bewertungskonzept von ABB ist ein ganzheitliches, auf eine Einheit bezogenes Verfahren, bei dem der Schwerpunkt auf der Funktionalität [1] des Betriebsmittels liegt. Die Methode berücksichtigt sowohl die technischen als auch die wirtschaftlichen Risiken für die betreffende Einheit.

5 Detaillierte Betrachtung des Zustandes und der Funktionalität einzelner Einheiten zur Unterstützung optimaler Entscheidungen für das Lebensdauermanagement



Eine zustands- und risikobezogene Betriebsmittelbewertung erfordert die Kenntnis Auslegung, Betrieb, Funktionsminderung und Ausfall der betrachteten Betriebseinheit. Zusammen mit ihr müssen auch ihre Teilsysteme, Materialeigenschaften, Betriebseinflüsse und Ausfallarten betrachtet werden.

So müssen für die Bewertung alle wichtigen Risiken und Beanspruchungen definiert werden, die die Funktionalität oder Tauglichkeit der Einheit gefährden könnten. Die wichtigsten Kriterien für die Bewertung sind zu ermitteln. Jedes der Kriterien wiederum erfordert die Entwicklung eigener Bewertungsverfahren. Weitere Informationen zu einer Reihe technischer und nichttechnischer Aspekte werden zur Beurteilung benötigt. Der in **5** gezeigte strukturierte Ansatz hat zum Ziel, optimale Entscheidungen

für das Lebensdauermanagement zu treffen, die gewünschte Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit zu erreichen, die Instandhaltung zu optimieren und die Lebensdauerkosten zu senken.

ABB hat die verschiedenen Aspekte in **5** weiter untersucht, um daraus einen Katalog detaillierter Bewertungskriterien abzuleiten. So ist beispielsweise als ein Bewertungsaspekt bei Leistungstransformatoren das Ausfallrisiko, verursacht durch elektromagnetische Kräfte aufgrund eines externen Kurzschlusses, zu berücksichtigen. Zu den weiteren Bewertungskriterien gehören z.B. der Zustand des Isolierpapiers, die Alterung der Gesamtisolierung sowie elektrische Aspekte und Überlastung.

Bei dem funktionalitätsorientierten Konzept von ABB findet die Beurteilung der definierten Kriterien aufgrund von mathematischen und

heuristischen Modellen statt. Für jede Einheit werden die verschiedenen Kriterien beurteilt, ihr aktueller Zustand ermittelt und die Leistungsfähigkeit betrachtet.

Zustandsabhängiges Bewertungsverfahren

Um die Regeln für die Bewertungskriterien bestimmen zu können, muss ein Experte zunächst die Modellabhängigkeiten und die Beziehungen zwischen den bekannten Informationen beschreiben. Eine tiefgehende Kenntnis der Technik und der Herstellungsverfahren ist notwendig, um die funktionellen Beziehungen und Bewertungsstrategien unter Berücksichtigung der Bauart ausreichend formalisieren zu können. Die Auslegung und die Betriebsbedingungen müssen berücksichtigt werden.

Die Bewertungsstrategie berücksichtigt auch unvollkommene Lebensdauerdaten der Betriebsmittel und heuristische Aspekte. Dies entspricht der Art, wie ein Experte die angebotenen Informationen miteinander kombinieren würde.

Die Schritte («Regeln» und Betrachtungstechniken), die der Experte zur Zustandsbewertung verwenden würde **6a**, müssen also ermittelt und formalisiert werden.

Am besten lässt sich ein derart komplexer menschlicher Kombinationsprozess als wissensbasiertes System nachbilden und implementieren – als eine Software, die in der Lage ist, die Kausalitäten und die heuristischen Betrachtungs- und Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

In dem in **6** gezeigten *Beispiel* betrachtet der Experte die Auswirkungen von Kurzschlusskräften auf eine Transformatorwicklung bekannter Bauart nach einer bestimmten Betriebsdauer.

Er berücksichtigt die verfügbaren Informationen über die Lebensdauer und zieht dabei seine Kenntnisse sowie praktischen Erfahrungen heran. Bei der Vorgehensweise im Beispiel lassen sich Aspekte im Zusammenhang mit möglichen plötzlichen Veränderungen in der Wicklungsgeometrie ebenso bewerten wie eine Langzeit-Relaxation. **6b** zeigt die Art, wie die menschliche Denkweise in ein wissensbasiertes System übertragen und formalisiert wird.

Um den betreffenden Fall noch detaillierter zu beschreiben, ließen sich weitere Einflussfaktoren hinzufügen und verschiedene Zwischeninformationen ableiten.

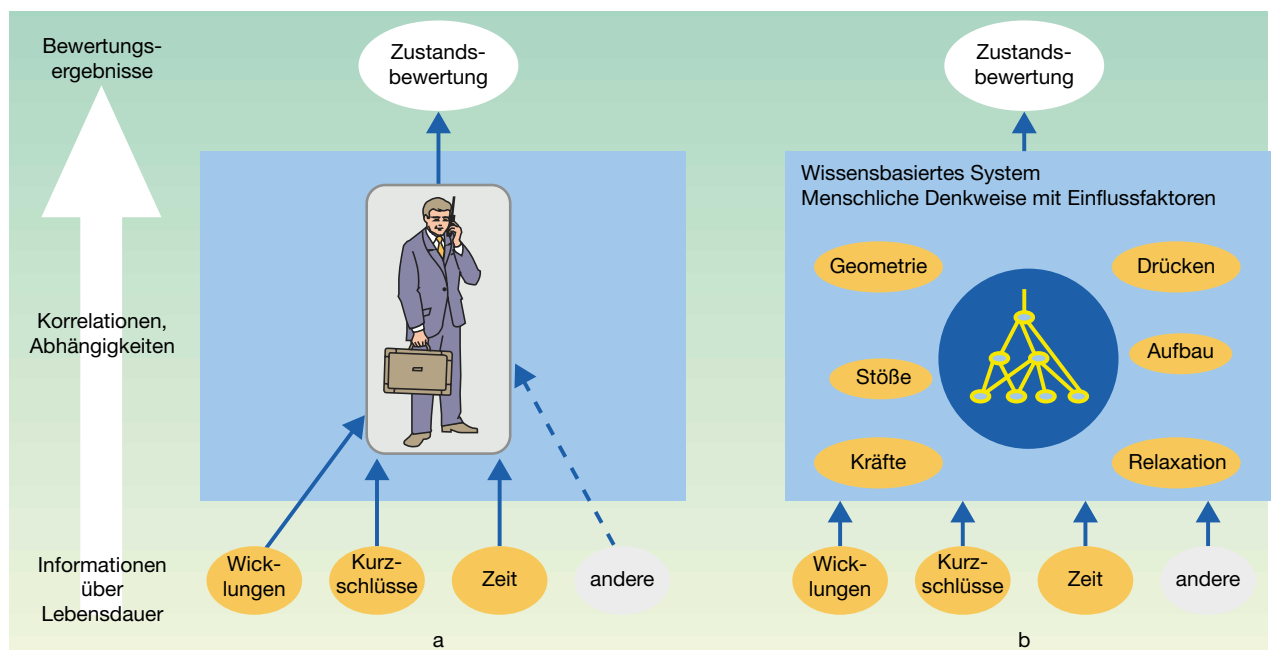
Die Bewertung ergibt für jeden Transformator ein *Bewertungsergebnis*. Es bezieht sich jeweils auf einen Zustand, eine Fähigkeit, ein Ausfallrisiko usw. und wird zum Vergleich und zur Klassifizierung innerhalb einer betrachteten

Population verwendet. Das Bewertungsverfahren liefert dem Betreiber zudem Empfehlungen für Sofortmaßnahmen oder Prognosen für den zukünftigen Betrieb. Die Prognosen zur Zukunft von Betriebsmitteln, d.h. Schätzungen der Restlebensdauer, hängen allerdings von den künftigen Betriebsbedingungen und Ereignissen ab und sind entsprechend unsicher.

Nutzung von genauen und unscharfen Informationen

Die zur Beschreibung der menschlichen Denk- und Kombinationsweise verwendeten funktionellen und logischen Abhängigkeiten, Regeln und Einschränkungen wurden bei der Entwicklung sehr allgemein gehalten. Dazu gehören «Wenn-Dann»-Regeln aus der konventionellen Logik, Formeln, andere genaue mathematische Modelle und mathematische Eingabe-

6 Zustandsbewertung durch einen Experten mit Hilfe von Lebensdauerinformationen (a) und mit einem wissensbasierten System, das in der Lage ist, die menschliche Denkweise mit Kausalitäten und Einflussfaktoren zu beschreiben (b).



Ausgabe- sowie Voraussetzung-Schlussfolgerungs-Konstrukte.

Die Praxis der «life assessment» bedeutet für den Bewerter meistens, dass er die Betriebsmittel unter unvollkommenen Bedingungen beurteilen muss. Oft erhält er weder vollständige, zuverlässige Daten, noch kann er genaue Modelle entwickeln, um das verfügbare Wissen zu beschreiben. Einen Vorteil bietet jedoch das ABB-Verfahren: es lassen sich neben exakten numerischen Daten auch unscharfe Angaben zu den Ereignissen in der Betriebszeit des Transformators verwenden, sodass eine größere Menge an wertvollen Informationen für die «life assessment» zur Verfügung steht. Auch Abhängigkeiten aufgrund von Erfahrungen lassen sich in natürlicher Sprache formulieren.

7 zeigt einige Beispiele, wie ein Benutzer des ABB-Verfahrens mit solchen Lebensdauer-

informationen und Abhängigkeiten umgehen kann. Sprachliche Aussagen wie «die Temperatur beträgt *ungefähr* 80 °C», «*fast* Volllast» oder «die Temperatur ist *normal*» lassen sich mit Fuzzy-Logik-Konzepten beschreiben 7a. (Präzise Angaben wie «die Temperatur beträgt *genau* 80 °C» sind zum Vergleich im selben mathematischen Rahmen dargestellt.) Die x-Achse in 7a stellt die Temperatur dar, und die y-Achse zeigt, ob ein bestimmter Temperaturwert *möglich* ist. Die x-Werte, bei denen der entsprechende y-Wert Null beträgt, gelten in der verbalen Beschreibung als *nicht möglich*. So ist es zum Beispiel in 7a unmöglich, dass die Temperatur $T = 0$ zu der sprachlichen Beschreibung « T ist ungefähr 80» oder zur Angabe « T ist normal» gehört.

Zur Verarbeitung exakter Informationen eignen sich herkömmliche mathematische Ansätze

und Modelle. Das Verfahren beherrscht auch unscharfe oder unsichere Daten und allgemeine Abhängigkeitsregeln, wie in 7b gezeigt. Dabei kommen zur Beschreibung der Abhängigkeit sprachlich formulierte Regeln zum Einsatz, z.B.:

Wenn der Strom «mittel» ist, dann ist die Temperatur «normal».

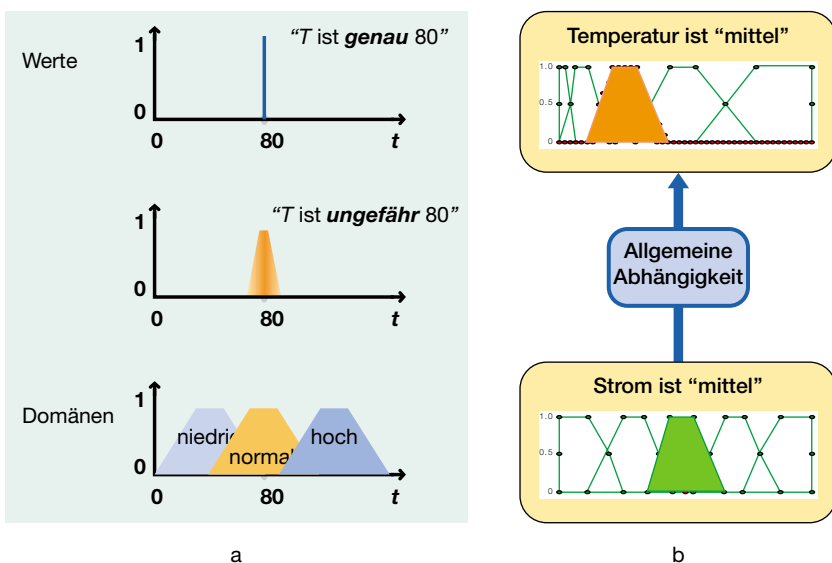
Die Werte für «niedrig», «normal» usw. werden wie in 7a gezeigt beschrieben. Abgeleitete Ausgabewerte wie «die Temperatur ist mittel», dargestellt durch das Trapez oben in 7b, lassen sich in exakte numerische Werte umwandeln bzw. als solche in der Bewertung verwenden.

Die Verarbeitung komplexerer Abhängigkeiten und Wechselwirkungen erfordert es, mehrere Regeln zu beschreiben und miteinander zu kombinieren.

Solche Regeln lassen sich mit Hilfe von Expertenwissen formulieren und prüfen. Die Methode für die zustandsabhängige Bewertung und «life assessment» von ABB [1] basiert zum Beispiel auf umfassenden Kenntnissen des Transformators und seiner Funktionalität.

7 Berechnung aufgrund von unscharfen Daten und allgemeinen Abhängigkeitsregeln

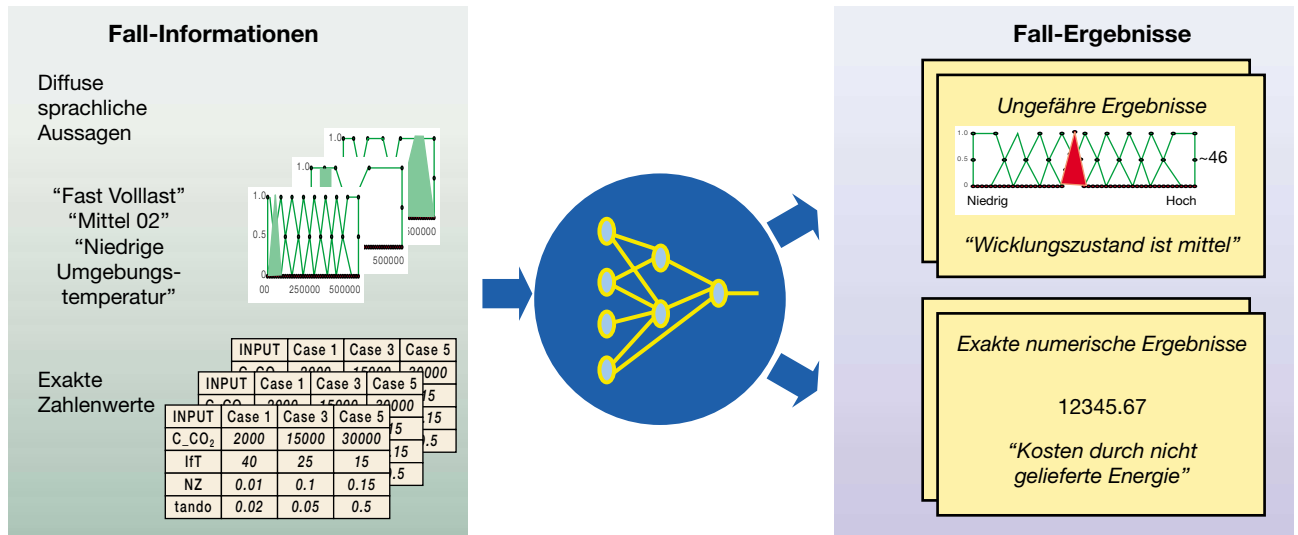
- a Beschreibung von unscharfen Eingabedaten und Domänen
- b Beispiel einer Verarbeitung mit einer allgemeinen Regel



Bewertungsergebnisse

Das Bewertungsverfahren verfolgt bei der Anwendung auf beispielsweise Leistungstransformatoren das Ziel, aus einer Gruppe solcher Einheiten die anfälligsten herauszufinden und diese nach ihrer Gebrauchstauglichkeit zu klassifizieren. Im ersten Schritt muss der Verfahrensanwender die Eingabeinformationen für die Bewertung zusammenstellen und vorbereiten. Daraufhin wird der Transformator von seiner Herstellung bis zum Bewertungstag unter Berücksichtigung seiner Betriebsbedingungen untersucht, um eine Gruppe von vorläufigen

8 Genauer und unsichere bzw. annähernde Ergebnisse einer Betriebsmittelbewertung



Lebensdauerinformationen zu erhalten. Diese Informationen sind häufig unstrukturiert, unverarbeitet, heterogen und unsicher. Durch eine Vorverarbeitung erhält man die fallspezifischen Informationen 8 (links), die neben exakten numerischen Daten häufig auch diffuse sprachliche Aussagen enthalten.

Im zweiten Schritt kommt ein wissensbasiertes System zu Hilfe, das fähig ist, zur Bewertung bestimmter Kriterien mit heterogenen und unsicheren Informationen umzugehen 8 (Mitte). Als Ergebnisse liefert das Expertensystem hauptsächlich scharfe numerische Werte, aber auch, wie in 8 rechts gezeigt, annähernde Werte. Auf einer Skala zwischen hoch und niedrig bzw. gut und schlecht geben diese annähernden Werte den Bereich an, in dem ein Zustand oder ein Ausfallrisiko am wahrscheinlichsten ist. Annähernde numerische Ergebnisse, wie z.B. ~46, kann das System ebenfalls ableiten.

Die Klassifizierung nach einem bestimmten Bewertungskriterium ist einfach, wenn entspre-

chende Ergebnisse für eine Transformatorengruppe zur Verfügung stehen. 9 zeigt ein Beispiel mit fünf Transformatoreinheiten. Die Grafik lässt die Ergebnisse für die Bewertungskriterien *Alterung der Gesamtsolierung* und *Bewertung des Transformatorkerns* erkennen.

Die Grundlage zur Bewertung der Alterung der Isolierung dieser Einheiten insgesamt 9a bilden Daten aus der Analyse des gelösten Gases sowie aus physikalischen und chemischen Ölprüfungen. Die Ergebnisse sind als dunkle Dreiecke auf einer Skala mit beliebigen Einheiten dargestellt. Der Wert 100 entspricht dem schlechtesten Ergebnis. Die Zahlen am rechten Rand zeigen die genauen numerischen Werte dieser Ergebnisse. Eine ‘Teilklassifizierung’, die lediglich das Kriterium ‘Alterung der Gesamtsolierung’ berücksichtigt, weist dem Transformator A den besten Zustand zu. 9b zeigt die Klassifizierung für die Bewertung der Erwärmung des Kerns und die damit verbundene Risikoerhöhung.

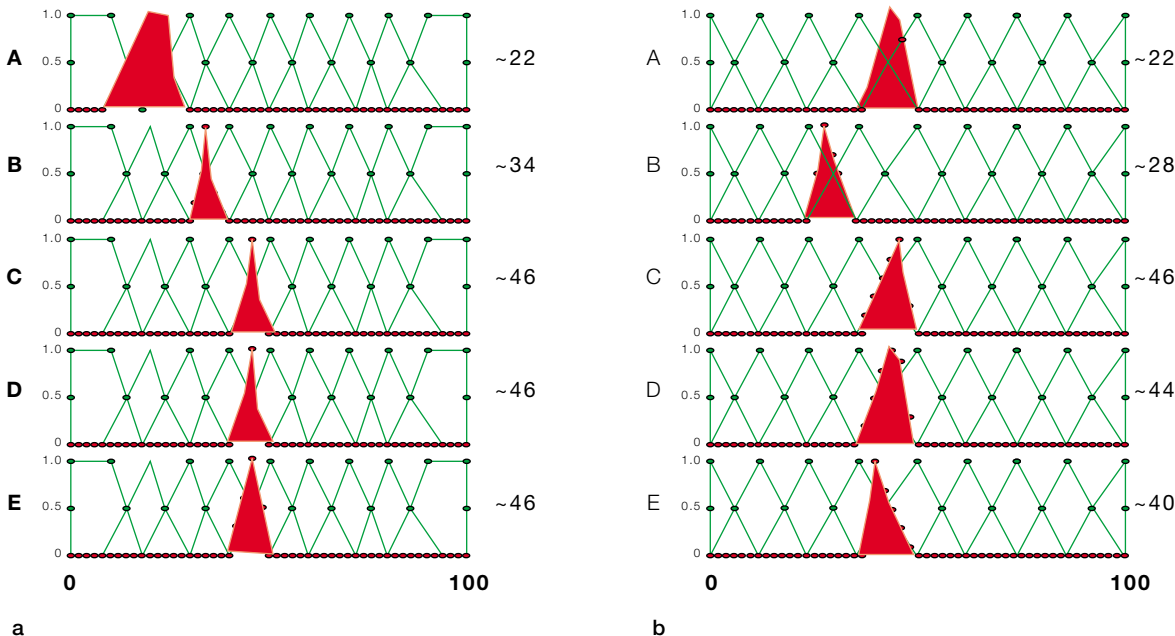
Bei Bewertungskriterien für äußere Beanspruchungen lassen sich die Transformatoren nach ihrer Fähigkeit klassifizieren, wie sie diese Belastungen aushalten.

Nachdem der Anwender eine Gruppe technischer Bewertungskriterien betrachtet hat, kann er die Ergebnisse zu einer Gesamtklassifizierung zusammenfassen, um z.B. das technische Gesamtausfallrisiko für die Einheiten darzustellen.

Tabella 2 zeigt eine Zusammenfassung der Teilklassifizierungen, die aus den in 9 dargestellten Ergebnissen resultieren. Dazu gehört auch die Ermittlung des technischen Gesamtrisikos unter der Annahme, dass die Gefahr eines Ausfalls aufgrund der Gesamtalterung genauso kritisch ist wie ein Ausfall durch die Erwärmung des Transformatorkerns.

Diese Klassifizierungen haben einen direkten Einfluss auf die Reihenfolge, in der der Betreiber Maßnahmen treffen muss. Die mit einer ‘1-’ klassifizierten Transformatoren sind am kritischsten. Die Klassifizierung, sei es nun eine Teilklassifizie-

9 Beispiele für die Bewertung eines Transformators. Alterung der Gesamtsolierung (a) und Bewertung des Kerns (b)



rung oder Gesamtklassifizierung, bildet also die Grundlage für die zustandsabhängige Entscheidung, ob der Betreiber sein Betriebsmittel austauschen, instandsetzen oder instandhalten sollte.

So eine zustandsabhängige Bewertung lässt sich natürlich noch erweitern. Zum Beispiel sind nicht alle Transformatoren gleich wichtig. Der Ausfall bei einigen Einheiten würde größere Schäden verursachen als bei anderen. So kann eine abschließende Betriebsmittelbeurteilung beispielsweise auch die strategische bzw. wirtschaftliche Bedeutung der Einheiten für den Betreiber berücksichtigen. **Tabelle 2** zeigt eine solche Beurteilung der betrachteten Einheiten anhand einer Skala von 1 bis 10. Der Wert 1 entspricht der niedrigsten, der Wert 10 der höchsten Bedeutung.

Zur Unterstützung von fundierten Entscheidungen lassen sich die Beurteilungen der technischen Aspekte einerseits und der Bedeutungen andererseits miteinander kombinieren. Wenn man das aus der technischen Bewertung

resultierende Gesamtrisiko auf eine Skala von 0 bis 100 überträgt und die Bedeutung in einen Wert zwischen 0 und 10 umsetzt, so entsteht ein Risiko-Bedeutungs-Diagramm gemäß **10**. Die Einheiten A bis E entsprechen hierbei denen in **Tabelle 2**. Das X stellt einen besonders kritischen Fall dar.

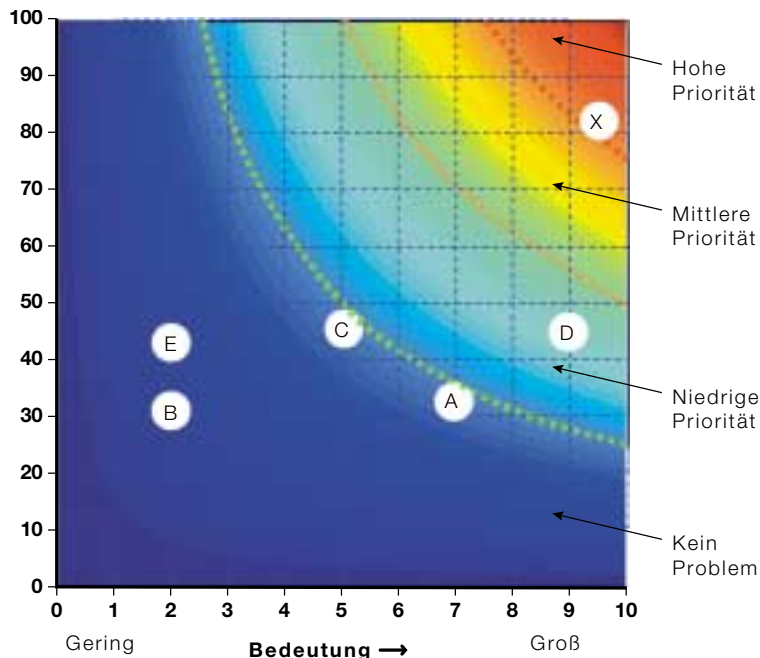
Das Risiko-Bedeutungs-Diagramm lässt sich aufgrund von Erfahrungen und Präferenzen der Betreiber in verschiedene Bereiche einteilen. **10** zeigt vier solche Bereiche: «Hohe Priorität», «Mittlere Priorität», «Niedrige Priorität» und «Kein Problem». Die Buchstaben A, B, C, D und E bezeichnen die betrachteten Transformatoren.

Tabelle 2

Transformator-Einheit	Alterung der Gesamtsolierung	Beurteilung des Kerns	Technischer Gesamtzustand bzw. Gesamtrisiko	Bedeutung der Transformator-einheit
	<i>Klassifizierung</i>	<i>Klassifizierung</i>	<i>Klassifizierung</i>	
A	3	1	3	7
B	2	3	4	2
C	1	1	1	5
D	1	1	1	9
E	1	2	2	2

Die Klassifizierung «1» entspricht dem schlechtesten Fall in der betrachteten Gruppe, d.h. sie bezeichnet die erste Einheit, bei der Maßnahmen notwendig wären.

10 Kombinierte Beurteilung unter Berücksichtigung des technischen Gesamtrisikos und der Bedeutung des Betriebsmittels. Die Buchstaben A bis E bezeichnen die einzelnen Transformatoreinheiten.



Einheiten, die im oberen rechten Bereich liegen, haben große Bedeutung und hohes Ausfallrisiko. Ihr Betreiber muss sie also zuerst berücksichtigen. Auf sie ist besonderes Augenmerk zu richten, und sie erfordern Maßnahmen mit hoher Priorität.

Am anderen Ende liegen die Einheiten, die «kein Problem» bedeuten. Von den betrachteten Transformatoren lässt nur die Einheit D ersten Handlungsbedarf erkennen, aber auch die Einheiten A und C liegen bereits dicht an den definierten Grenzen. Die Einheiten B und E sind zum Zeitpunkt der Bewertung in Ordnung, die Einheit X jedoch benötigt sofort Abhilfemaßnahmen.

Die entwickelte Methode eignet sich ebenso zur Bewertung verschiedener anderer kräftebe-

zogener, elektrischer und thermischer Kriterien wie wirtschaftlicher Gesichtspunkte und Umweltaspekte. Zusammen geben die abgeleiteten Kriterien, die Klassifizierungswerte und die Gesamtbeurteilung des Risikos und Zustandes einen detaillierten und objektiven Einblick in jede der betrachteten Einheiten. Diese Informationen unterstützen den Betreiber optimal und objektiv bei seiner Entscheidungsfindung.

Wertschöpfung durch Lebensdauermanagement

Die objektiven Informationen aus der zustandsabhängigen Bewertung von elektrischen Betriebsmitteln unterstützen wichtige Entscheidungen des Lebensdauermanagements und

tragen so zur Steigerung der Wertschöpfung bei den Energieversorgungsunternehmen bei.

Zu diesen Informationen gehören das Ausfallrisiko aufgrund von bestimmten Beanspruchungen, die aktuelle Funktionstüchtigkeit der Betriebsmittel sowie der relative Vergleich (Klassifizierung) der Betriebsmittel innerhalb einer Population. Empfehlungen zum Betrieb, zu Instandsetzungsmaßnahmen, zur Modernisierung oder zur Erneuerung von Betriebsmitteln stellen eine weitere Wertschöpfungsquelle für die Energieversorger dar.

Lebensdauerbewertungen, die für große Energieversorgungsunternehmen in Europa und Nordamerika durchgeführt wurden, haben überzeugend belegt, dass die entwickelten Werkzeuge eine objektive Plattform für das Lebensdauermanagement von Betriebsmitteln darstellen.

Adressen der Autoren

Dr. Nicolaie L. Fantana
 ABB Corporate Research
 Speyerer Str. 4
 DE-69115 Heidelberg
 Deutschland
 nicolaie.fantana@de.abb.com
 Fax: +49 6221 596 353

Dr. Lars Pettersson
 ABB Transformers AB
 Box 702
 SE-771 80 Ludvika
 Schweden
 lars.f.pettersson@se.abb.com
 Fax: +46 240 611 568

Literaturhinweise

[1] L. Pettersson, N.L. Fantana, U. Sundermann: Life assessment: ranking of power transformers using condition-based evaluation, a new approach. CIGRE Paris Conference Paper 12-204, 1998 Session.