

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	93 (2002)
<b>Heft:</b>	21
<b>Artikel:</b>	Betriebs- und Lebensdaueroptimierung von Kraftwerken
<b>Autor:</b>	Antoine, Marc / Stothert, Alec
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-855471">https://doi.org/10.5169/seals-855471</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Betriebs- und Lebensdaueroptimierung von Kraftwerken

## Einbezug der Alterung in das Optimierungsverfahren

Bei der Modellierung der Alterung von Kraftwerksanlagen spielen Faktoren wie die auftretende Last und die Alterung der einzelnen Anlagenteile eine wesentliche Rolle. Bei den meisten herkömmlichen Modellierungsverfahren wird jedoch der «Memory»-Effekt nicht berücksichtigt. Eine derzeit bei ABB in Entwicklung stehende Software erlaubt die Beschreibung der Lebensdauer in Abhängigkeit von der Belastung und unterstützt damit die Betreiber von Kraftwerksanlagen bei der Wahl einer optimalen Betriebsstrategie, welche die Maximierung der unmittelbaren Gewinne unter Berücksichtigung der Reduktion der Lebensdauer ermöglicht.

Angesichts liberalisierter Energiemärkte und strengerer Umwelt- und Sicherheitsstandards stellt sich für die Ei-

*Marc Antoine, Alec Stothert*

gentümer von Kraftwerken die Frage, wie sie ihre Anlagen effizienter betreiben können. Die von der Firma ABB ent-

wickelte und zurzeit in der in Prototyp-Phase stehende Softwarelösung «Industrial<sup>IT</sup> for Power Generation – Lifecycle Optimizer» ist in der Lage, Kraftwerksbetreibern Betriebsstrategien aufzuzeigen, mit denen einerseits erzielte Einkünfte maximiert und andererseits alle Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, NO<sub>x</sub>-Emissionen, Anlagendegradation

usw. erfüllt werden können. Dabei berücksichtigt der *Lifecycle Optimizer* zusätzlich die Alterung der Anlage, indem der Einfluss, den eine bestimmte Betriebsart auf den Alterungsprozess der Anlage hat, in das allgemeine Problem der Betriebsoptimierung mit einbezogen wird.

Die Schätzung der reduzierten Lebensdauer einzelner Anlagenteile ist bereits ein umfassend erschlossenes Gebiet [1]. Ebenso stehen mathematische Werkzeuge zur Optimierung des Kraftwerksbetriebs im Hinblick auf Energie- und Brennstoffpreise, Strombedarf, Verbrauchscharakteristika und den schwankenden Energieverkaufspreis zur Verfügung [2, 3, 4, 5]. Doch nur geringe Anstrengungen wurden bisher unternommen, diese beiden Ideen – Reduktion der Lebensdauer und Betriebsoptimierung – miteinander zu verbinden.

## Simulations- und Analysewerkzeug

Das Ziel der Optimierung ist eine betriebliche Planung der Anlage über einen gegebenen Zeitraum. Ganz gleich, ob ein bestimmter Energiebedarf zu möglichst geringen Kosten zu decken oder die Grösse der Energieerzeugung zu wählen ist, die Anforderungen sind in jedem Fall dieselben: es muss eine Entscheidung getroffen werden, wann das Kraftwerk und wann einzelne Komponenten<sup>1)</sup> eingeschaltet und welche Sollwerte gewählt werden sollen. Wichtige Werte sind dabei die Kosten pro kWh erzeugte Energie. Diese Informationen bilden das Kernstück für das Erstellen von Angeboten in einem wettbewerbsintensiven Energiemarkt. Ein Betriebsoptimierungs werkzeug kann daher auch ein wichtiges Simulations- und Analysewerkzeug für Kraftwerksbetreiber darstellen.

Neben der Optimierung der Wirtschaftlichkeit der Anlage müssen bei der Betriebsoptimierung weitere Anforderungen wie die Mindest-, Betriebs- und Stillstandzeiten von Anlagenteilen, An- und Abfahrzeiten<sup>2)</sup> sowie weitere technische Randbedingungen wie die minimale bzw. maximale Leistungsabgabe und verschiedene Hochlaufbedingungen berücksich-

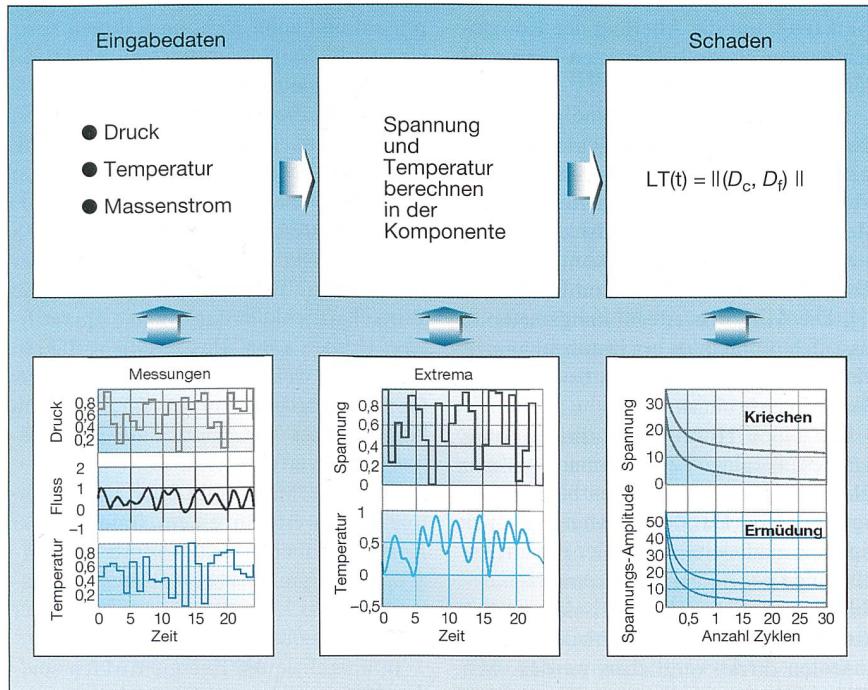


Bild 1 Schritte zur Berechnung der Lebensdauer

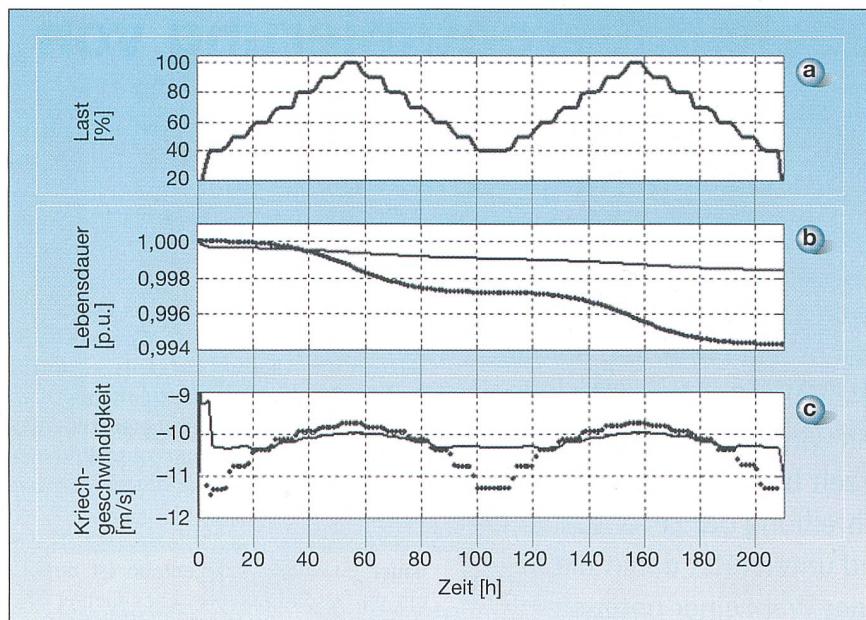


Bild 2 Ergebnis von Simulationen

Ergebnis für das Gehäuse (gestrichelt) und den Läufer (durchgezogen) einer Dampfturbine. In den drei Balken sind Lastprofil, Lebensdauer und Kriechgeschwindigkeiten dargestellt.

tigt werden. Das Kernstück des hier beschriebenen Verfahrens zur Betrieboptimierung ist eine Zielfunktion (Kasten), die mehreren Bedingungen unterliegt und die Kosten unter Zuhilfenahme der Anlagenregelungen minimiert. Dadurch resultiert ein optimaler Betrieb der Anlage.

### Alterungsmodell

Die Beurteilung der Lebensdauer von Anlagenteilen erfordert einen multidisziplinären Ansatz, der unter anderem spezielle Kenntnisse der Konstruktion und des Materialverhaltens sowie der zerstörungsfreien Prüfverfahren umfasst. Für die Lebensdauer- bzw. Alterungsmodellierung sind zwei Faktoren entscheidend: erstens müssen die Modelle eine direkte Beziehung zwischen der Kraftwerkslast und der Alterung der Anlage herstellen und zweitens müssen sie die Einsatzgeschichte der Komponente berücksichtigen.

Das Alter wird auf Grund des Risswachstums berechnet. Jede Komponente hat bereits bei der Herstellung Risse, die im Mikrobereich liegen und durch den Betrieb wachsen. Zur Berechnung der Lebensdauer geht man davon aus, dass an einer kritischen Stelle oder einer kritischen Komponente ein Mikroriss vorliegt und modelliert seine Ausbreitung, bis eine vorgegebene kritische Rissgrösse erreicht ist.

Risswachstumsmodelle werden bei Überholungen im Rahmen der Anlagenwartung verwendet, um die verbliebene Lebensdauer von Anlagenkomponenten

mit nachweisbaren Rissen zu bestimmen. Das Ergebnis solcher Berechnungen ist die geschätzte Anzahl der noch verbleibenden Betriebsstunden. Der Unterschied bei der vom *Lifecycle Optimizer* angewendeten Methode liegt darin, dass kein messbarer Riss vorliegen muss: die Risswachstumsgleichungen werden als abstraktes Modell verwendet, mit dem die Reduktion der Lebensdauer der Komponente bestimmt werden kann. Mit anderen Worten: Die Gleichungen der Mikroriss-Ausbreitung dienen lediglich als Werkzeug, um die Alterung der Komponente unter einem bestimmten Lastprofil darzustellen (Bild 1).

Die Wachstumsgeschwindigkeit der Risse hängt von Art und Stärke der Belastung ab. Ist die Belastung konstant, so ist Risswachstum durch Kriechen des Materials zu beobachten. Ist die Belastung hingegen zyklisch, kommt es zu Risswachstum auf Grund von Ermüdung [1]. Die Mikroriss-Ausbreitungsmethode lässt sich problemlos um lastunabhängige Merkmale wie Korrosion, Erosion und Oxidation erweitern.

Um einen Hinweis auf die Alterung der Gesamtanlage zu bekommen, müssen alle einzelnen Komponenten berücksichtigt werden. Da deren Alterung über einen normalisierten Wert der erwarteten Risslänge gegenüber einer komponenten-abhängigen kritischen Risslänge bestimmt wird, können verschiedene Komponenten direkt verglichen werden. Mit Hilfe dieses normalisierten Komponentenalters (Lifetime  $LT_i$ ) lassen sich ver-

schiedene Massangaben für das Gesamtalter der Anlage definieren.

### Berücksichtigung der Alterung

Der Alterungsprozess einer Anlage ist abhängig von der gewählten Betriebsart und der daraus resultierenden Betrieblast. Die Softwarelösung von ABB drückt die Alterung der Anlagenkomponenten mit Hilfe einer Analogie zu Risswachstumsmodellen und durch die Definition eines Vermögenswertes für die Komponenten aus. Werden die beiden Elemente kombiniert, so zeigt sich eine mathematische Beziehung, welche die Änderung der Lebensdauer in Abhängigkeit der Belastung beschreibt (Kasten). Daraus lässt sich ein wirtschaftliches Mass für die Alterung und die Gesamtlebensdauer der Anlage ableiten. Die Berücksichtigung der Reduktion der Lebensdauer ist nicht einfach, da sowohl diskrete wie auch kontinuierliche zeitliche Entwicklungen wie etwa Ermüden und Kriechen mit einbezogen werden müssen.

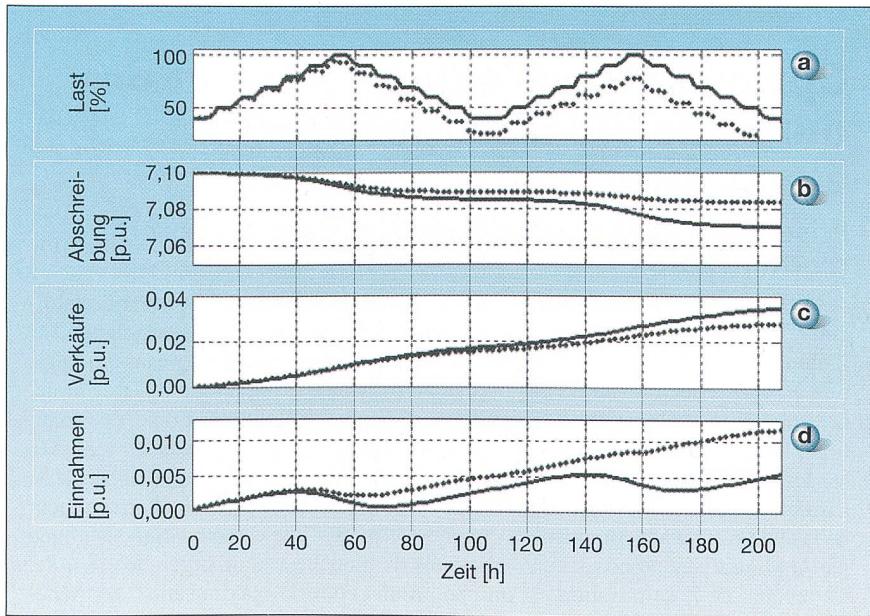
Erleichterung bringt hierbei die Tatsache, dass Ermüdung und Kriechen unabhängig voneinander behandelt werden können. Generell wird die Ermüdung nur dann wichtig, wenn schwere thermische Stöße auftreten. Da dies normalerweise aber nur beim An- und Abfahren der Fall ist, kann die während dieser Vorgänge erfolgte Reduktion der Lebensdauer folglich als ein zusätzlicher Kostenfaktor des An- und Abfahrvorgangs betrachtet werden. Demgegenüber ist die Alterung durch Kriechen in allen Betriebsarten präsent und kann nicht im Rahmen einer standardmässigen statischen Optimierung behandelt werden.

Zwei Methoden können herangezogen werden, um eine Lösung zu finden, wobei beide Methoden die Auswirkungen des Anlagebetriebs quantifizieren.

Die klassische Methode befasst sich mit der Frage, wie die Auswirkung einer bestimmten Betriebsstrategie auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage quantifiziert werden kann. Das zweite Verfahren ist neu und vielversprechend. Es stellt das Optimierungsproblem so dar, dass ein vorgegebener Verlauf für die Anlagenlebensdauer verfolgt wird.

Die Berechnung gibt über zwei wichtige Kennwerte in einem freien Markt Auskunft: über die Kosten pro kWh erzeugte Energie – wobei die Alterungskosten berücksichtigt werden – sowie über die erzeugte Leistung.

In liberalisierten Energiemarkten spielen Finanzwerkzeuge wie Aktienkurse, Risikoanalysen, Optionen, Derivate usw.

Bild 3 Kraftwerksleistung mit und ohne *Lifecycle Optimizer*

eine zentrale Rolle [6, 7]. Ein interessanter Gedanke ist, dass das Kraftwerk auf einem solchen Markt einfach als finanzieller Vermögenswert angesehen wird, dessen Wert sich als eine Funktion der

## Die Formel

Die optimale Betriebsstrategie  $J[u]$  ergibt sich aus den Produktionskosten und den Alterungs- bzw. Degradationskosten abzüglich der Ertragskosten.

$$J[u] = \int_t^{t+T} [e(\tau, u(\tau)) + c(\tau, u(\tau)) - q(\tau, u(\tau))] d\tau$$

wobei

$T$ : Optimierungs-Zeithorizont (eine Folge von einigen Tagen)

$u: [t, t+T] \rightarrow R^n$ : Anlagenregelung; im Fall eines hier betrachteten Kombikraftwerks die erzeugte Strom- und Wärmeleistung des Kraftwerks.

$e$ : Alterungskosten auf Grund der Alterung der Anlageteile

$c$ : Produktionskosten

$q$ : Einnahmen, die zeitabhängig sein können und auf Grund des Stromhandels auf dem freien Markt variieren.

Wie die Gleichung erkennen lässt, sind die Vektoren  $e$ ,  $c$  und  $q$  abhängig von  $u$ , dem Vektor der Anlagenregelungen. Damit kann mit dem *Lifecycle Optimizer* sowohl das Anlagenverhalten als auch die Alterung während des Intervalls  $[t, t+T]$  vorhergesagt werden.

Zeit darstellt. Der Eigentümer der Anlage interessiert sich somit nicht nur für unmittelbare Gewinne, sondern sorgt sich auch um den sinkenden Wert seiner Anlage. Dieser steht dabei in direkter Beziehung zur verbrauchten Lebensdauer. Somit bietet die Möglichkeit, gute Schätzungen über die Reduktion der Lebensdauer der Anlage anzustellen, auch neue Möglichkeiten für den Betrieb der Anlage. So kann der Eigentümer seine Anlage beispielsweise so betreiben, dass ihre Lebensdauer einem vorgegebenen Verlauf folgt. Eine andere denkbare Anwendung ist die Betriebsfahrt zur Erfüllung bestimmter Wartungspläne<sup>3</sup>.

## Gewinn minus Wertverminde- rung

Für den *Lifecycle Optimizer* wurden Lebensdauermodelle für ein komplettes Kombikraftwerk mit Gasturbine, Dampfturbine und Dampferzeuger zur Wärmerückgewinnung entwickelt. Damit können die Reduktion der Lebensdauer und die Kriechriss-Wachstumsgeschwindigkeiten prognostiziert werden (Bild 2).

Bild 3 veranschaulicht die im letzten Abschnitt angeführten Punkte anhand von Ergebnissen, die mit Hilfe der Optimierungsmethode erzielt wurden. Bild 3a zeigt dabei die berechnete optimale Last ohne (durchgezogene Linie) und mit (gestrichelte Linie) Berücksichtigung der Lebensdauermodellierung. Dabei fällt auf, dass der Betrieb der Anlage weniger aggressiv ausfällt, sobald der Lebensdauer-Kompromiss eingeschlossen wird. Diese Regelungen wurden mit Hilfe von Lebensdauermodellen für Rohrleitungen,

Gehäuse und Läufer der Dampfturbine erzielt.

In Bild 3 sind zudem die zeitliche Entwicklung des Anlagenwerts (Bild 3b) gemäss Zielfunktion und die akkumulierten Einnahmen aus den Verkäufen des erzeugten Stroms dargestellt (Bild 3c). Hier wird sichtbar, wie der Anlagenwert auf Kosten der weniger unmittelbaren Gewinne «eingespart» wird.

Aus Bild 3d sind schliesslich die «realen Einnahmen», d.h. die akkumulierten unmittelbaren Gewinne abzüglich der entsprechenden Wertminderung der Anlage ersichtlich. Hier zeigt sich, dass die anfänglich aggressive Strategie, also ohne Berücksichtigung der Lebensdauergrössen und der Risswachstumsmodelle, nicht optimal ist und in bestimmten Zeiträumen sogar zu Verlusten führt: dies kann durch den Einsatz des *Lifecycle Optimizers* verhindert werden. Der Einsatz von Risswachstumsmodellen ermöglicht nicht nur die Modellierung der Lastabhängigkeit, sondern berücksichtigt auch die Vorgeschichte der Anlagenbelastung («Memory»-Effekt) [8].

## Referenzen

- [1] R. Viswanathan: Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components. ASM International. 1989.
- [2] R. Baldick: The generalized unit commitment problem. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 10. No 1. February 1995.
- [3] F. Scheppe, M. Caramanis, R. Tabors, R. Bohn: Spot Pricing of Electricity. Chapter 7, Kluwer Academic 1988.
- [4] R. Green: Competition in Generation: The Economic Foundations. Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 2, pp 128-139, February 2000.
- [5] A. Wood, B. Wollenberg: Power Generation Operation and Control. 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 1996.
- [6] M. Pereira, M. McCoy, H. Merrill: Managing Risk in the New Power Business. IEEE Computer Applications in Power, Vol. 13., No. 2, pp 18-24, April 2000.
- [7] G. Anders, R. Entriñen, P. Nitu: Risk Assessment and Financial Management. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 1999 Tutorial.
- [8] E. Galleste, A. Stothert, M. Antoine, S. Morton: Model Predictive Control and Optimisation of Power Plant Load while Considering Lifetime Consumption. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 1, pp 186-191, February 2002.

## Weiterführende Literatur

- E. Camacho, C. Bordons: Model Predictive Control. March 2000 Springer Verlag.
- M. P. Miller, D. C. McDowell et.al.: A life prediction model for thermomechanical fatigue based on microcrack propagation. ASTM STP 1186, 1993, pp 35-49.
- C. Cangan et. al.: Recent developments in the thermomechanical fatigue lifetime prediction of superalloys. e-JOM, Vol. 51. No 4. April 1999.
- A. Bemporad, M. Morari: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. Technical Report AUT98-04, ETH, Automatica, Special issue on hybrid systems, Vol. 35, n. 3, p. 407-427, 1999.

- F. Allgöwer, A. Zheng, eds: Nonlinear Model Predictive Control. Part III, Applications of Nonlinear Predictive Control, Birkhäuser 2000.
- C. Wang, S. Shahidehpour: Optimal Generation Scheduling with Ramping Costs. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, no. 1, pp 60-67. February 1995.
- J. Delson: Thermal Stress Computation for Steam-Electric Generator Dispatch. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, no. 1, pp 120-127, February 1994.

### Adressen der Autoren

Marc Antoine, Plant Management Applications, Division Versorgungsunternehmen, ABB Schweiz, 5401 Baden, marc.antoine@ch.abb.com  
 Dr. Alec Stothert, Informations-Technologien, ABB-Forschungszentrum, 5405 Dättwil, alec.stothert@ch.abb.com

<sup>1</sup> Beispielsweise in einem Kombikraftwerk, bei dem der erzeugte Dampf entweder für die Stromerzeugung (mittels einer Dampfturbine) oder für die Fernwärme verwendet werden kann.

<sup>2</sup> Terminus für Anlauf- und Abbremszeiten

<sup>3</sup> Die vom *Lifecycle Optimizer* bestimmte Fahrweise bis zum nächsten Wartungstillstand kann um mehrere Prozent besser sein als die «manuell» bestimmte Fahrweise.

## Optimisation d'exploitation et de durée de vie utile des centrales électriques

### Prise en compte du vieillissement dans la procédure d'optimisation

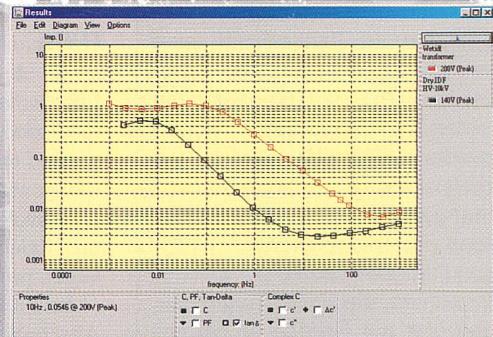
Le *Lifecycle Optimizer* est un système d'aide de décision montrant à l'exploitant d'une centrale électrique les répercussions de l'exploitation quotidienne sur la durée de vie utile de l'installation et recommandant des stratégies d'exploitation à court terme en vue d'optimiser la performance économique de la centrale. La stratégie d'exploitation recommandée est basée sur l'optimisation d'une fonction-cible comprenant des grandeurs correspondantes pour les recettes réalisées sur les ventes de courant électrique, les coûts de production et le vieillissement de l'installation. Ce dernier est déterminé à l'aide de modèles dépendant directement de la charge et tenant compte d'un «memory effect» – une caractéristique négligée par la plupart des procédés conventionnels de modélage de la durée de vie utile. Le résultat de l'optimisation est un compromis entre la maximisation des bénéfices immédiats et la minimisation de la consommation de la durée de vie utile.

**ISOLATIONS DIAGNOSE**

**revolutionäre Methodik bestimmt den Alterungsprozess von Isoliermaterialien in Trafo und Kabel**

**Tan  $\delta$**





**IDA 200**



**Programma**

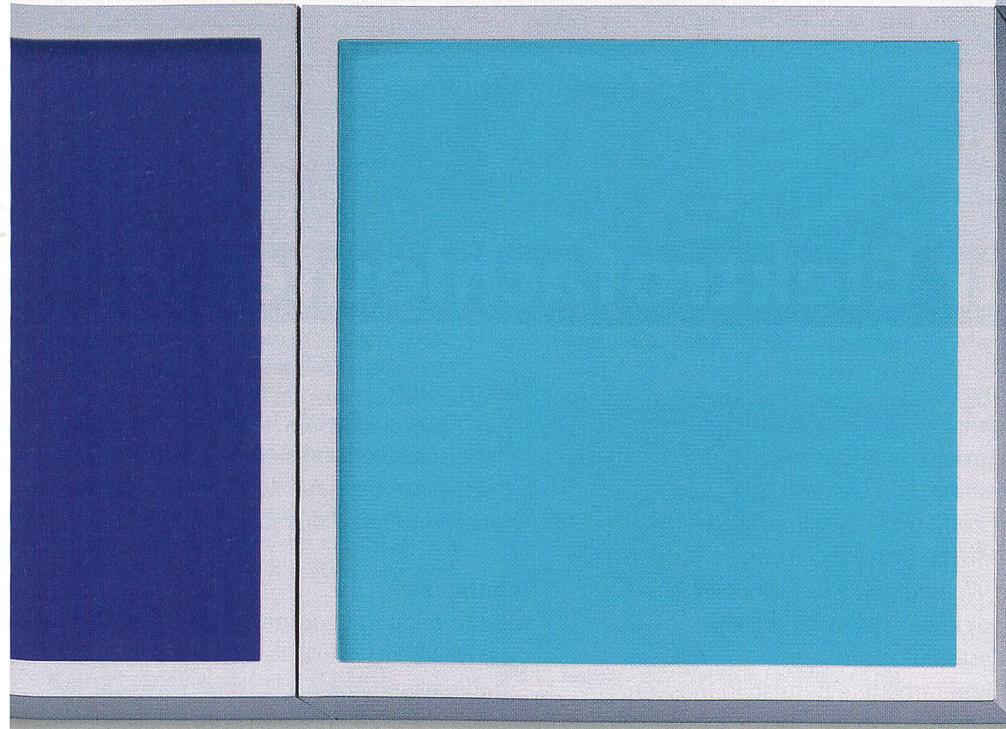
www.programma.se • programma@swissonline.ch  
 Programma Electric AG • CH-5727 Oberkulm  
 Tel 062 768 2030 • Fax 062 768 2033

# Darf es etwas mehr sein?

Zum Beispiel Licht in seinem ganzen Spektrum von 16,7 Mio. Farben. Für dynamische Inszenierungen, kreative Orientierungs- und Dekorationsbeleuchtung, natürliche Lichtstimmungen zum Wohlfühlen.

Dazu Kompaktheit, lange Lebensdauer, maximale Wartungsfreiheit, geringer Energieverbrauch, niedrige Oberflächentemperatur, variable Abstrahlwinkel, Vibrations- und Schockresistenz, anspruchsvolles Design.

Licht ist eben nicht gleich Licht. Dank innovativer LED-Technologie und modernster digitaler Steuerelektronik lässt sich mit den Multicolorleuchten LEDOS RGB und PHAOS Licht in seiner ganzen Vielgestaltigkeit in Szene setzen.



In Shops und Stores, in Hotels und Bars, in Theatern und Kinos, in Wellness- und REHA-Bereichen, in Verkehrszonen und Parkgaragen.

Wie wir mit  
Licht Erlebniswelten schaffen,  
erfahren Sie unter  
[www.zumtobelstaff.com/phaos](http://www.zumtobelstaff.com/phaos)



**ZUMTOBEL STAFF**  
DAS LICHT ®



- Zimmerli Energie Technik AG

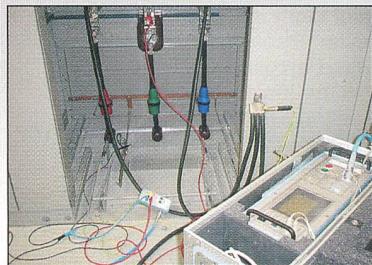
Unsere Dienstleistungen auf einen Blick:



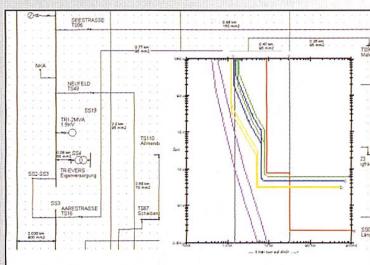
Schutzsystem-  
Prüfungen



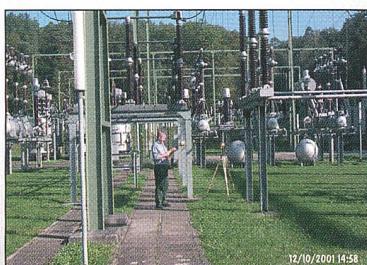
Leistungsschalter-  
Prüfungen



Kabelalterungs-  
Messungen



Netzanalysen und  
Schutzkonzepte



Magnetfeldmessungen,  
EMV-Sanierungskonzepte



Engineering  
von Schaltanlagen

Gerne unterstützen wir auch Sie in Ihrer Problemlösung:

Rütihubelweg 1  
4812 Mühlethal

Tel: 062 751 69 51  
Fax: 062 751 60 68

[www.zetag.ch](http://www.zetag.ch)  
mail: [postmaster@zetag.ch](mailto:postmaster@zetag.ch)



## Forum für Elektrofachleute

Donnerstag,  
21. November 2002,  
Kursaal Bern

Mittwoch,  
27. November 2002,  
Kongresshaus Zürich

### Themen

- Rechtlicher Status von Normen
- Elektronische Informationen und Hilfsmittel von Electrosuisse
- NIV 2002 und Bewilligungserteilung
- Praktische Installationsfragen aus der NIN
- Die Weiterentwicklung der NIN 2000
- Aspekte der Elektrobiologie in der Installation
- Das überarbeitete Berufsbildungskonzept

### Zielgruppen

- Elektroinstallationsfachleute wie Ingenieure, Planer, Elektroinstallateure, Kontrolleure, Chefmonteure, bauleitende Monteure, Servicemonteure und Elektromonteure

### Tagungsziel

- Weiterbildung in ausgewählten Themen der NIN 2000 bzw. NIN COMPACT und in allgemeinen Installationsfragen
- Kennen lernen der neuen NIV 2002
- Erfahrungsaustausch unter Fachleuten

Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an **Electrosuisse**  
Telefon direkt 01 956 11 75, E-Mail: [daniela.kneubuehler@electrosuisse.ch](mailto:daniela.kneubuehler@electrosuisse.ch)