

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 102 (2011)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Zuverlässigkeitsanalyse eines 440/110-kV-Umspannwerkes  
**Autor:** Vetterli, Jan A. / Probst, Patrick / Kröger, Wolfgang  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856854>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.03.2025

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

# Zuverlässigkeitsanalyse eines 440/110-kV-Umspannwerkes

## Steuerungssysteme als kritische Komponenten

Umspannwerke bilden kritische Knoten in Elektrizitätsversorgungssystemen. Ihr zuverlässiger Betrieb ist von grosser Bedeutung für eine stabile Stromversorgung. Welche Komponenten können aber in Umspannwerken als kritisch betrachtet werden? Antworten auf diese Frage liefert eine zweistufige Analyse, bei der die erste Stufe eine Fehlerbaumanalyse und die zweite Stufe eine Markoff-Analyse ist.

**Jan A. Vetterli, Patrick Probst, Wolfgang Kröger**

Als Basis für die Zuverlässigkeitsanalyse wird ein Referenz-Umspannwerk definiert. Dabei wird auch die Systemgrenze festgelegt, die den Rahmen der zu berücksichtigenden Ausfälle bestimmt. Danach werden mit einer Fehlerbaumanalyse (FTA) die Zuverlässigkeit aufgrund der Struktur des Referenzumspannwerkes ermittelt und die Komponenten identifiziert, die für die Zuverlässigkeit besonders kritisch sind. Schliesslich wird eine Markoff-Analyse (MA) durchgeführt, um

die identifizierten kritischen Anlageelemente weiter zu untersuchen und die zugrunde liegenden Fehlermechanismen zu analysieren.

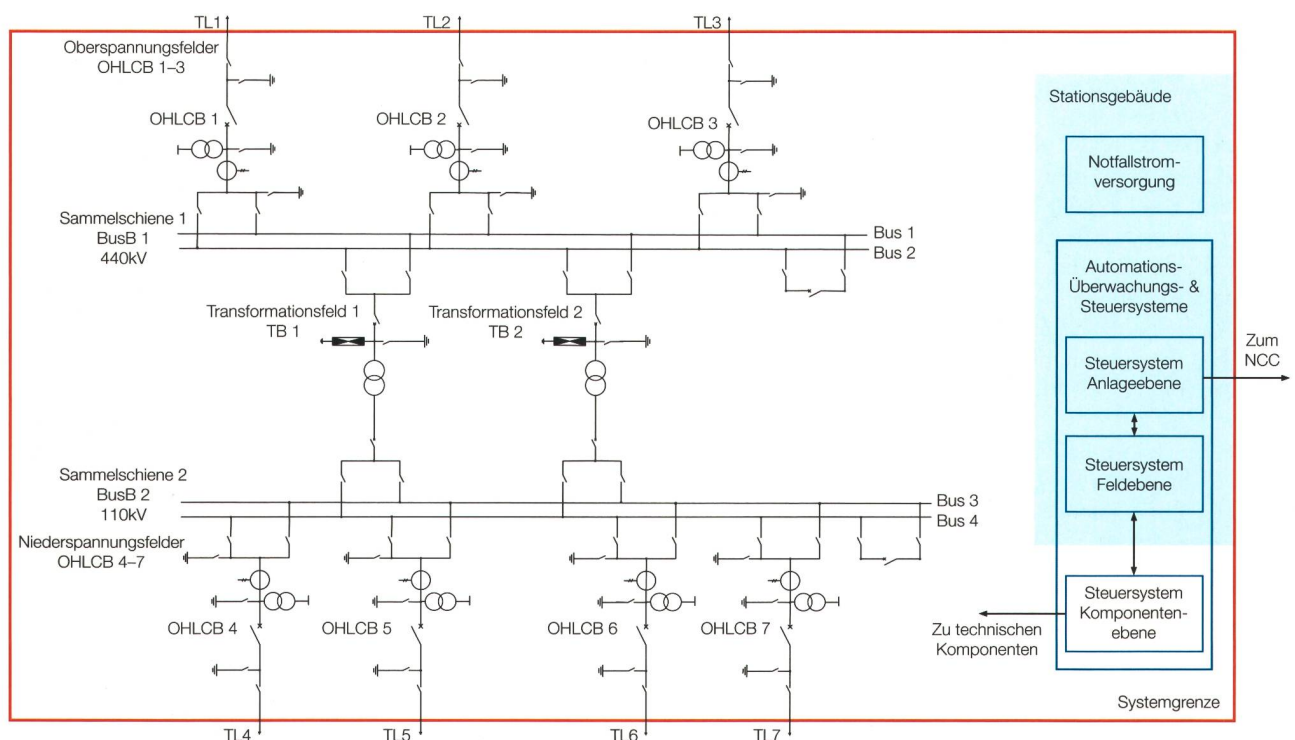
### Referenz-Umspannwerk

Das Referenzumspannwerk ist ein 440/110-kV-Stromübertragungs-Umspannwerk, das über ein Netzwerkkontrollzentrum (NCC) ferngesteuert wird. Anlagenaufbau und Unterhalt entsprechen den in Mitteleuropa üblichen Qua-

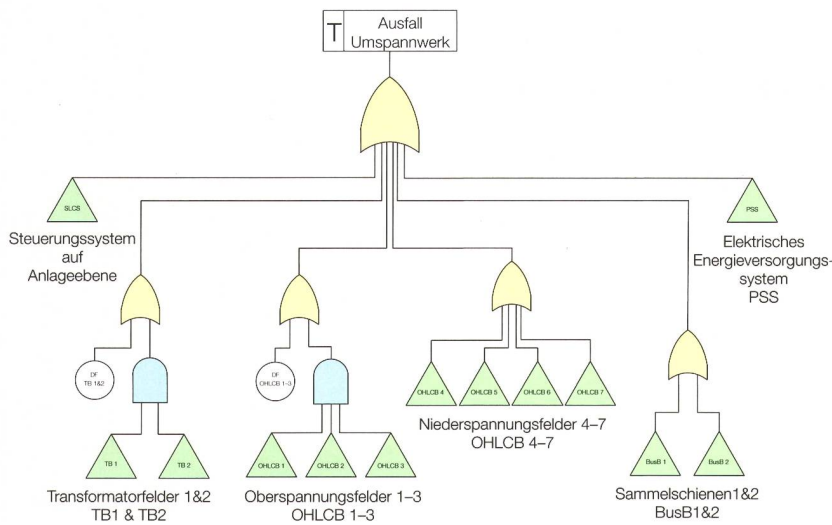
litätsstandards. Die Elemente, die innerhalb der Systemgrenze des Umspannwerkes liegen und somit bei der Analyse berücksichtigt werden, umfassen die Feldkomponenten, das Stationsgebäude, Steuerung und Automation sowie die Stromversorgung. Die Übertragungsleitungen und das NCC mit Kommunikationsleitungen liegen ausserhalb des Systems.

Die in der Analyse berücksichtigten Gefährdungen und Ausfallmöglichkeiten umfassen Ausfälle technischer Komponenten, Ausfälle des Steuerungssystems, unterhaltsbedingte Ausfälle, abhängige Ausfälle und den Ausfall der Stromversorgung. Nicht berücksichtigt werden Naturgefahren, absichtliche Beschädigung, menschliches Versagen im NCC, Komponentenalterung sowie finanzielle und organisatorische Risiken.

Der Fokus der durchgeführten FTA und MA liegt auf technischen Fehlern, da diese einen beträchtlichen Teil der Systemausfälle von Umspannwerken verursachen. Da die hier nicht berücksich-



**Bild 1** Referenzumspannwerk.



**Bild 2** Fehlerbaum.

tigten Fehlerquellen einen signifikanten Einfluss auf die Ausfallswahrscheinlichkeit haben können, sollte ihnen in einer erweiterten Analyse spezielle Beachtung geschenkt werden.

**Bild 1** zeigt die Struktur des Referenzumspannwerkes, das zwar nicht exakt einer existierenden Anlage entspricht, aber die Hauptkomponenten aufweist, die in jedem Umspannwerk zu finden sind. Drei eingehende Übertragungsleitungen (TL 1-3) mit einer Spannung von 440 kV versorgen das Umspannwerk primärseitig und führen zu den drei Oberspannungsfeldern (OHLCB 1-3). Diese sind über die Oberspannungssammelschiene 1 (BusB1) mit den beiden Transformatorfeldern 1 + 2 (TB 1 + 2) verbunden. Sekundärseitig verbindet die Niederspannungssammelschiene 2 (BusB2) die Transformatorfelder TB1 und TB2 mit den vier ausgehenden Niederspannungsfeldern 4-7 (OHLCB 4-7) auf der Spannungsebene 110 kV. Jedes Niederspannungsfeld versorgt eine der vier ausgehenden Übertragungsleitungen (TL 4-7) mit Strom. Das Stationsgebäude beinhaltet das elektrische Energieversorgungssystem (PSS) und die Steuerungs-, Automations- und Überwachungssysteme des Umspannwerkes. Das PSS besteht aus der regulären Energieversorgung, die über das Elektrizitätsnetz sichergestellt ist, und der Notfallstromversorgung (Dieselgeneratoren).

Die Steuerungs-, Automations- und Überwachungssysteme können in drei Ebenen gegliedert werden: das Steuerungssystem auf Anlageebene (SLCS), die Steuerungssysteme auf Feldebene

(BLCS) und die Steuerungssysteme auf Komponentenebene (PLCS). Das SLCS bildet die höchste Steuerungsebene in der Steuerungsarchitektur. Die Steuerungssysteme BLCS auf Feldebene sind verantwortlich für die Steuerung, Automation und den Schutz der einzelnen Felder des Umspannwerkes. Die PLCS bilden die unterste Steuerungsebene. Sie sind für die Steuerung und den Schutz der technischen Anlagekomponenten in den Feldern zuständig. Siehe [1, 2 oder 3] für eine detaillierte Diskussion der Steuerungsarchitektur in Umspannwerken.

### Fehlerbaumanalyse

Die FTA [4, 5] ist eine statische Zuverlässigkeitsanalysemethode. Sie erlaubt die quantitative und qualitative Beurteilung

der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Systems, basierend auf einem definierten Ausfallskriterium (Top-Event).

### Definition des Top-Events

Der erste Schritt einer FTA besteht in der Definition des Top-Events. In der vorliegenden Zuverlässigkeitsanalyse wird das Umspannwerk als ausgefallen betrachtet, wenn es nicht in der Lage ist, alle ausgehenden Übertragungsleitungen auf der 110-kV-Spannungsebene mit Strom zu versorgen.

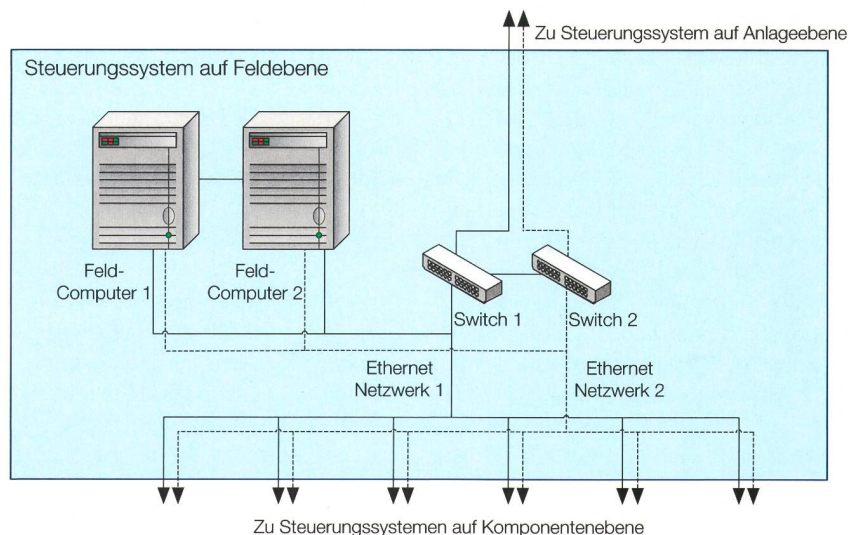
### Konstruktion und Evaluation des Fehlerbaumes

Die Hauptäste des Fehlerbaumes sind in **Bild 2** abgebildet. Unterhalb des Top-Events sind die 6 Äste zu sehen, die zum Ausfall des Umspannwerkes führen: Ausfall des Steuerungssystems SLCS auf Anlageebene, Ausfall der beiden Transformatorfelder (TB1 + TB2), Ausfall aller Oberspannungsfelder 1-3 (OHLCB 1-3), Ausfall eines der Niederspannungsfelder 4-7 (OHLCB 4-7), Ausfall einer der zwei Sammelschienen (BusB1 + 2) oder Ausfall des elektrischen Energieversorgungssystems (PSS).

Die zur Quantifizierung des Fehlerbaums benötigten Ausfallwahrscheinlichkeiten basieren auf statistischen Erhebungen und Schätzungen. Sie wurden in einer Literaturstudie als numerische Grössen bestimmt und stammen aus verschiedenen Datenquellen, z. B. [6, 7, 8].

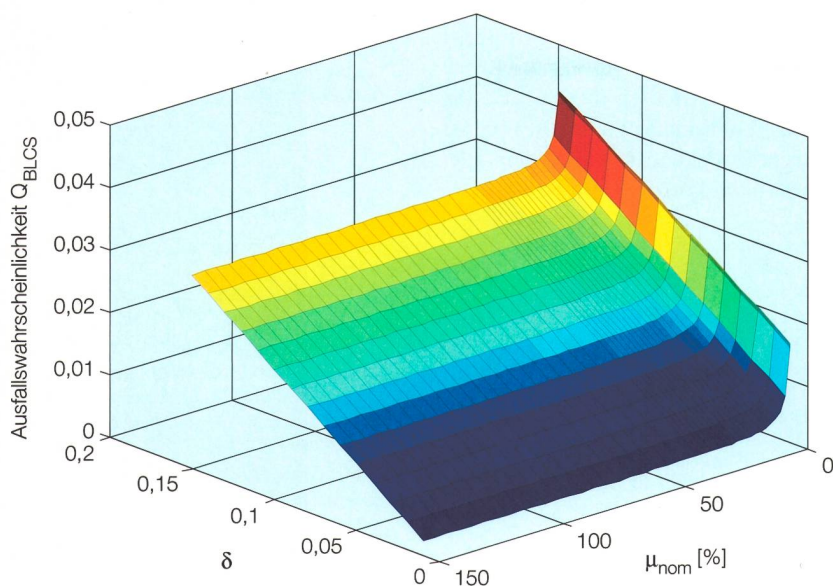
### Evaluation des Fehlerbaumes

Der Fehlerbaum wurde in Matlab/Simulink implementiert und mithilfe der Monte-Carlo-Technik ausgewertet. Die



**Bild 3** BLCS.





**Bild 5** Ausfallswahrscheinlichkeit  $Q_{BLCS}$  in Funktion von  $\delta$  und  $\mu$ .

### Modellierung BLCS

Die Standard-MA würde aufgrund der 6 Systemkomponenten die Einführung von  $2^6 = 64$  Systemzuständen und  $64 \cdot 63 = 4032$  Zustandsübergängen erfordern. Siehe [4, 10] für eine Einführung in die Systemmodellierung von Markoff-Modellen.

Durch eine eingehende Inspektion des Modells und Fokussierung auf das Analyseziel ist es jedoch möglich, die Anzahl der Zustände auf 11 und die der Zustandsübergänge auf 50 zu senken. Dies erlaubt es, den Rechenaufwand erheblich zu reduzieren. **Bild 4** zeigt die 11 Systemzustände und die Zustandsübergänge, die dem Ausfall von Komponenten entsprechen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit enthält das Bild keine Zustandsübergänge, die der Reparatur oder abhängigen Ausfällen von Komponenten entsprechen. Die im Bild neben den Zustandsübergängen aufgeführten Parameter  $\lambda$  ( $\mu$ ) sind die sogenannten Ausfallsraten (Reparaturraten). Die numerischen Werte für die Quantifizierung der Ausfallsraten und Reparaturraten stammen aus [7] und [8].

### Resultate der Markoff-Analyse

Die MA ergibt eine Ausfallswahrscheinlichkeit des BLCS-Steuerungssystems ( $Q_{BLCS}$ ) von 1,11%. Dies stimmt gut mit den Werten der FTA überein, die für die Steuerungssysteme auf Feldebene eine individuelle Ausfallswahrscheinlichkeit von 1,10% identifiziert hat. Eine weitergehende Analyse der Resultate der

MA zeigt auf, dass die meisten Ausfälle der BLCS auf abhängige Ausfälle von redundanten Systemkomponenten zurückgeführt werden können.

In der hier durchgeführten MA werden abhängige Ausfälle mit einem in Analogie zur  $\beta$ -Faktor-Methode entwickelten Vorgehen berücksichtigt, welches als  $\delta$ -Faktor-Methode bezeichnet wird. Der  $\delta$ -Faktor setzt die Ausfallsrate von abhängigen Ausfällen ( $\lambda_{dep}$ ) in Relation zur Ausfallsrate von unabhängigen Ausfällen ( $\lambda_{indep}$ ):  $\delta = \lambda_{dep} / (\lambda_{dep} + \lambda_{indep})$

In Anlehnung an den  $\beta$ -Faktor der FTA wird  $\delta$  auf einen Wert von 0,05 gesetzt. Dies führt zur genannten Ausfallswahrscheinlichkeit  $Q_{BLCS}$  von 1,11%.

Mit der Anwendung der  $\delta$ -Faktor-Methode ist es durch Variation von  $\delta$  möglich, den Einfluss der abhängigen Ausfälle auf die Ausfallswahrscheinlichkeit des BLCS zu untersuchen. Ebenso ist es durch Variation der Reparaturraten  $\mu$  möglich, den Einfluss der Reparaturgeschwindigkeit auf die Ausfallswahr-

Bilder: ETHZ

scheinlichkeit zu analysieren. **Bild 5** zeigt den Einfluss der abhängigen Ausfälle und der Reparaturraten, berücksichtigt durch  $\delta$  und  $\mu_{nom}$ .

Die Variable  $\mu_{nom}$  drückt die Reparaturraten in % der nominalen Reparaturraten aus, die aus den Datenquellen [7] und [8] stammen. Für  $\mu_{nom} = 100\%$  und  $\delta = 0,05$  bestätigt die Grafik die nominale BLCS-Ausfallswahrscheinlichkeit von 1,11%.

**Bild 5** zeigt, dass abhängige Ausfälle einen grossen Einfluss auf die BLCS-Ausfallswahrscheinlichkeit haben. Wenn  $\delta$  zu 0 gesetzt wird, was dem Ausschluss aller abhängigen Ausfälle entspricht, so ist  $Q_{BLCS}$  fast 0. Die BLCS-Ausfallswahrscheinlichkeit wächst stark, wenn  $\delta$  erhöht wird. **Bild 5** zeigt ausserdem, dass  $Q_{BLCS}$  nicht stark von den Reparaturraten ausgefallener Komponenten abhängt. Eine Erhöhung von  $\mu_{nom}$  führt nicht zu einer Verminderung von  $Q_{BLCS}$ . Dies bedeutet, dass die BLCS-Ausfallswahrscheinlichkeit nicht gesenkt werden kann, wenn ausgefallene Komponenten rascher repariert werden. Die Grafik zeigt zudem auf, dass  $Q_{BLCS}$  nur dann ansteigt, wenn die Reparaturraten der verschiedenen Komponenten auf etwa 20% ihrer aktuellen Werte reduziert werden.

### Zusammenfassung, Ausblick

Die Fehlerbaumanalyse (FTA) hat sich als wertvolles Werkzeug erwiesen, um die Zuverlässigkeit von Umspannwerken anhand ihrer Struktur zu beurteilen. Gemäss ihr haben die Steuerungssysteme auf Feldebene (BLCS) der 4 ausgehenden Niederspannungsfelder einen entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Umspannwerkes. Die auf den Resultaten der FTA aufbauende Markoff-Analyse (MA) zeigt auf, dass die meisten Fehler der Steuerungssysteme auf abhängige Ausfälle zurückzuführen sind. Um die Zuverlässigkeit des Umspannwerkes zu erhöhen, sollte der Fokus auf die Verhinderung von abhängigen Ausfällen gelegt werden. Die Analyseresultate belegen zudem, dass hö-

### Résumé

#### Analyse de fiabilité d'une station de transformation 440/110 kV

#### Les systèmes de commande: composants critiques

Les stations de transformation constituent des nœuds critiques dans les systèmes d'approvisionnement en électricité. La fiabilité de leur fonctionnement est un élément central pour un approvisionnement énergétique stable. La présente étude utilise la méthodologie de l'analyse par la méthode de l'arbre de défaillance (FTA) et de l'analyse Markov (MA) afin de déterminer la probabilité de panne d'une station de transformation 440/110 kV. Ces analyses montrent que les systèmes de commande sur le terrain (BLCS) ont une importance capitale pour la fiabilité de la station de transformation.

No

here Reparaturraten die Ausfallwahrscheinlichkeit der Steuerungssysteme auf Feldebene nicht reduzieren.

Obwohl FTA und MA wertvolle quantitative und qualitative Analyseresultate geliefert haben, die zu einem vertieften Verständnis der Zuverlässigkeit von Umspannwerken beitragen, bleiben gewisse Fragestellungen unbeantwortet. In einer erweiterten Zuverlässigkeitsanalyse sollte deshalb den Alterungseffekten spezielle Aufmerksamkeit geschenkt werden, denn die meisten Elemente in Umspannwerken sind von Alterungseffekten betroffen. Wichtig für zukünftige Analysen ist zudem die verstärkte statistische Erfassung von Komponentenausfällen in Umspannwerken. Mit gesicherten Daten zu den Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Anlagekomponenten kann die Zuverlässigkeit der Analyseergebnisse bedeutend erhöht werden. Zudem sollten die  $\beta$ - und  $\delta$ -Faktor-Methoden, die zur Berücksichtigung von abhängigen Ausfällen verwendet wurden, durch spezifischere Methoden ersetzt werden. Dies vor allem des-

halb, weil abhängige Ausfälle als Hauptfaktor für Ausfälle von Umspannwerken identifiziert wurden. Ein vierter interessanter Ansatz für eine vertiefende Arbeit besteht in der Analyse der Zuverlässigkeit aus funktionaler Sicht. Dies würde ergänzende Erkenntnisse zu dem hier verfolgten strukturellen Ansatz liefern.

#### Literatur

- [1] K.-P. Brand, V. Lohmann, W. Wimmer: Substation Automation Handbook. Utility Automation Consulting, Bremgarten, 2003.
- [2] L. Andersson, Ch. Brunner, F. Engler: Substation Automation based on IEC 81850 with new process-close Technologies. ABB Schweiz AG, Zürich, 2003.
- [3] J. Northcote-Green, R. Wilson: Control and Automation of Electrical Distribution Systems. H. Lee Willis, Kema T&D Consulting, Raleigh, North Carolina, 2006.
- [4] W.M. Goble: Evaluating Control Systems Reliability-Techniques and Applications. Instrument Society of America, North Carolina, 1992.
- [5] DIN 25 424, Fehlerbaumanalyse, Normenausschuss Kerntechnik (NKe), Beuth, Berlin, 1990.
- [6] Nordel: Grid Disturbance and Fault Statistics, 2008. [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/nordic/operations/entsoe\\_nordic\\_FaultStatistics2008.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/nordic/operations/entsoe_nordic_FaultStatistics2008.pdf)

- [7] G. W. Sheer: Answering Substation Automation Questions through Fault Tree Analysis. Schweizer Engineering Laboratories, Pullman, WA.
- [8] G. W. Sheer: Comparing the Reliability of Ethernet Network Topologies in Substation Control and Monitoring Networks, Schweizer Engineering Laboratories, Pullman, WA.
- [9] L.A. Watson, B.D. Johnston: Treatment of Dependent Failures in PSA. Safety and Reliability Directorate, Warrington, 1987.
- [10] DIN EN 61165, Anwendung des Markoff-Verfahrens (IEC 61165:2006), Beuth, Berlin, 2006.

#### Angaben zu den Autoren

**Jan A. Vetterli** erhielt 2010 den BSc in Maschinenbauingenieurwissenschaften der ETH Zürich. Er studierte an der ETH und der University of Toronto mit Schwerpunkt Sicherheitsanalytik und Regelungstechnik.

**ETH Zürich, Institut für Energietechnik, 8092 Zürich**  
[jan.vetterli@alumni.ethz.ch](mailto:jan.vetterli@alumni.ethz.ch)



Dipl.-Ing. **Patrick Probst** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik der ETH Zürich. Er befasst sich mit Methoden im Umgang mit technischen Risiken bei komplexen Systemen, insbesondere bei kritischen Infrastrukturen.

**ETH Zürich, Institut für Energietechnik, 8092 Zürich**  
[probst@mavt.ethz.ch](mailto:probst@mavt.ethz.ch)

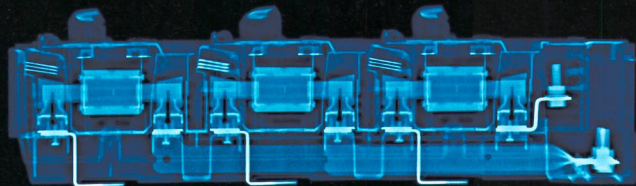
Prof. Dr. **Wolfgang Kröger** leitete das Labor für Sicherheitsanalytik der ETH im Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik. Seit Mitte 2011 ist er Managing Director des neuen ETH Risk Centers.  
**ETH Risk Center, 8092 Zürich, kroeger@mavt.ethz.ch**

Anzeige

## Durch und durch sicher.

Ausgereifte elektrische Produkte stehen für technische Errungenschaft, Erleichterung und Komfort. Das Sicherheitszeichen  des Eidgenössischen Starkstrominspektorats ESTI steht für elektrische Sicherheit. Das  dokumentiert die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften, welche durch Prüfung und Marktüberwachung sichergestellt werden.

Infos finden Sie unter [www.esti.admin.ch](http://www.esti.admin.ch)



ist das Label für nachgewiesene Sicherheit. Sichere Produkte sind gekennzeichnet.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
 Confédération suisse  
 Confederazione Svizzera  
 Confederaziun svizra

Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI