

# Prognose des Störungsaufkommens eines 123 kV Leistungsschalters bei längeren Wartungszyklen

## Estimation of Failure Frequency of a 123 kV Circuit Breaker in Case of Deferred Maintenance Intervals

Dipl.-Ing. Stefan Federlein, Dipl.-Ing. Christian Hille, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler,  
Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University, Deutschland.  
Dr.-Ing. Armin Gaul, RWE Energy AG, Dortmund, Deutschland.

### Kurzfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Optimierung von Instandhaltungsmaßnahmen von Hochspannungsbetriebsmitteln. Auf der Basis von heuristischem Wissen (Betriebserfahrung), bisherigem Störungsgeschehen und inspizierten Schäden wird ein Modell vorgestellt, das die Entwicklung eines Schadens zu einer Störung nachbildet. Am Beispiel eines Leistungsschalters wird zuerst das Alterungsverhalten bei der heute angewendeten Instandhaltungsstrategie aufgezeigt und anschließend mit dem veränderten Verhalten aufgrund eines vergrößerten Wartungszyklus verglichen.

### Abstract

This article deals with optimization of maintenance measures for high voltage equipment. A new model based on heuristic knowledge (operational experience), previous failure occurrences and inspected damages with the ability to simulate the progression of an inspected damage to an occurred failure is introduced. An example of a circuit breaker demonstrates the ageing behaviour in different scenarios in dependence of the current maintenance strategy and in case of longer maintenance cycles.

## 1 Motivation und Herausforderungen

Angesichts des wachsenden Kostendrucks müssen Betriebsmittel heute noch besser ausgenutzt werden. Spezielle Statistiken sowie zugeschnittene Softwarelösungen sind Werkzeuge des Asset Managements und bieten Netzbetreibern eine Unterstützung für ihre Entscheidungen im Spannungsfeld zwischen Kostenreduktion auf der einen und einer angemessenen Versorgungsqualität auf der anderen Seite.

Ein Ziel des Asset Managements ist die Optimierung der Instandhaltung (IH). Der Einfluss einer IH-Maßnahme auf das Betriebsmittelverhalten und somit auf dessen Zustand ist jedoch noch nicht hinreichend bekannt, um die Effizienz der Instandhaltung steigern zu können.

Anhand von Daten eines Netzbetreibers wird in diesem Beitrag der Einfluss eines vergrößerten Wartungszyklus auf das Alterungsverhalten am Beispiel

eines 123-kV-Leistungsschalters vorgestellt. Unter Zuhilfenahme heuristischen Wissens wird mit Werkzeugen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Entwicklung eines Schadens zu einer Störung nachgebildet. Die Kenntnis über den Einfluss von geänderten IH-Strategien erlaubt Netzbetreibern im Idealfall die Reduzierung der Unsicherheiten bei zukünftigen Investitions- und Betriebskosten.

## 2 Grundlagen der Auswertung

Die Auswertungen in diesem Beitrag basieren auf Betriebsmittel-, Ereignis und Instandhaltungsdaten eines Netzbetreibers, die sich auf einen repräsentativen Teil des Gesamtnetzes beziehen. Hier beziehen sich die Auswertungen auf einen bestimmten Leistungsschaltertyp, dessen Datenbestand in Tabelle 1 aufgeführt ist.

Die Beschreibung des Alterungsverhaltens des Leistungsschalters erfolgt anhand des Störungsaufkommens in Abhängigkeit der Betriebszeit. Jedoch müssen bei der Bewertung des momentanen Betriebsmittelverhaltens die bereits durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Die aktuell angewendete Instandhaltung besteht im Wesentlichen aus zwei zeitbasierten Maßnahmen. Die *Inspektion* (2-Jahres-Zyklus, Aufwand: 3 Mannstunden) kann dabei als intensive Sichtkontrolle bezeichnet werden, die auch kleinste Wartungsarbeiten, wie beispielsweise Reinigung oder Korrektur des SF<sub>6</sub>-Drucks, beinhaltet. Dieser Maßnahme steht die weit

aufwändigere *Wartung* (8-Jahres-Zyklus, Aufwand: 16 Mannstunden) gegenüber. Dabei werden u. a. einige Teile wie Verschraubungen, Dichtungen etc. zustandsabhängig oder präventiv ausgetauscht [1].

In diesem Beitrag bezeichnet eine *Störung* ein Ereignis, das während des Betriebes eine ungewollte Änderung des Betriebszustandes hervorruft. Ein *Schaden* bezeichnet eine während einer Instandhaltungsmaßnahme festgestellte, bleibende nachteilige Veränderung des Betriebsmittels, die sogleich oder im Laufe der Zeit behoben werden muss (vgl. [1]).

**Tabelle 1:** Datenbestand des Leistungsschalters (LS)

<i>LS 123 kV</i>	<i>Lösch-/Antriebs-Technik</i>	<i>Baujahre</i>	<i>Anzahl LS (mittl. Alter)</i>	<i>Ereignisse</i>
1 Antrieb pro LS 1 Schaltstrecke pro Pol	Pufferprinzip Hydraulikantrieb	1989 bis 1995	225 (17 Jahre)	41 Störungen 312 Wartungsprotokolle

### 3 Alterungsverhalten bei Ist-Instandhaltung

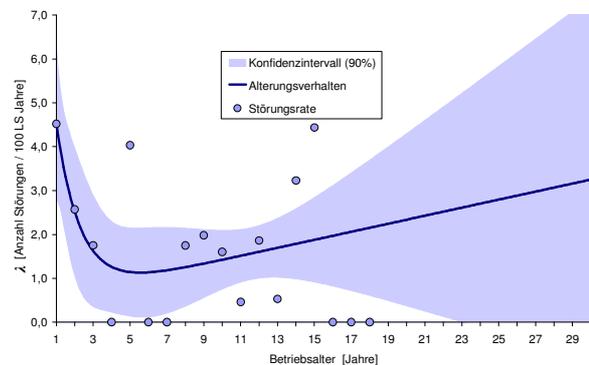
Die am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen entwickelten Softwaretools können das Störungsaufkommen in Abhängigkeit des Betriebsmittelalters berechnen. Hierfür sind das Inbetriebnahme- und ggf. das Außerbetriebnahme-Datum sowie die Zeitpunkte der Störungen essentiell. Die Regressionsanalyse zur Berechnung des voraussichtlichen Störungsaufkommens bzw. des Alterungsverhaltens erfolgt dabei in  $\frac{1}{10}$ -Jahres-Schritten.

Bild 1 zeigt das Alterungsverhalten des zuvor beschriebenen Leistungsschalters, das sich aus den abgebildeten Störungsdaten berechnen lässt. Dabei werden die einzelnen Störungspunkte in Abhängigkeit der Schalteranzahl unterschiedlich gewichtet. Somit haben beispielsweise die Störungsdaten der Betriebsjahre 16-18 nur einen geringen Einfluss auf die Ausgleichskurve, was sich zusätzlich durch die Größe des Vertrauensintervalls bemerkbar macht. Ab dem 19. Betriebsjahr sind keine belastbaren Daten mehr verfügbar, so dass das Alterungsverhalten ab diesem Zeitpunkt lediglich durch das vorherige Störungsaufkommen abgeleitet wird.

Das Verhalten des Leistungsschalters wird durch eine typische Badewannen-Charakteristik geprägt, welche sich durch die Kombination von elementaren und unabhängigen Fehlerbildern (z.B. Inbetriebnahme, Verschleiß etc.) ergibt [2].

Die sogenannten Frühausfälle, mit einer beginnenden Störungsrate von  $\lambda = 4,5$  Störungen pro 100 LS Jah-

ren,\* treten überwiegend in den ersten 4 Betriebsjahren auf. Defekte Bauteile der Steuerung und Hydrauliköl-Undichtigkeiten sind hauptsächlich für diese Störungen verantwortlich.



**Bild 1:** Alterungsverhalten bei Ist-Instandhaltung

Nach diesen Frühausfällen erreicht die Störungswahrscheinlichkeit einen Minimalwert von etwa  $\lambda = 1$ . Ab dem 5. Betriebsjahr beginnt die berechnete Alterungskurve kontinuierlich zu steigen, wobei durch die Ist-Instandhaltung ein eher moderater Anstieg zu verzeichnen ist und somit kein großer exponentieller Anstieg – hervorgerufen durch größere Verschleißausfälle – zu erkennen ist. Die Alterungseffekte werden dabei durch unterschiedliche Bauteile des Schalters – oftmals Teile des Antriebs – hervorgerufen.

\* 4,5 Störungen pro 100 LS Jahre bedeutet, dass bei einer Grundgesamtheit von 100 LS (im Mittel) bei 4,5 Schaltern pro Jahr eine Störung auftritt.

Der Mittelwert des Störungsaufkommens liegt bei der Betrachtung der verfügbaren Störungsraten bei  $\lambda = 1,6$  Störungen pro 100 LS Jahren. Unter Berücksichtigung des prognostizierten Alterungsverhaltens bezogen auf 30 Jahre, ergibt sich ein Mittelwert von  $\lambda = 2,1$  Störungen pro 100 LS Jahren. Ähnliche Werte konnten schon in vorangegangenen Auswertungen gezeigt werden [3, 4].

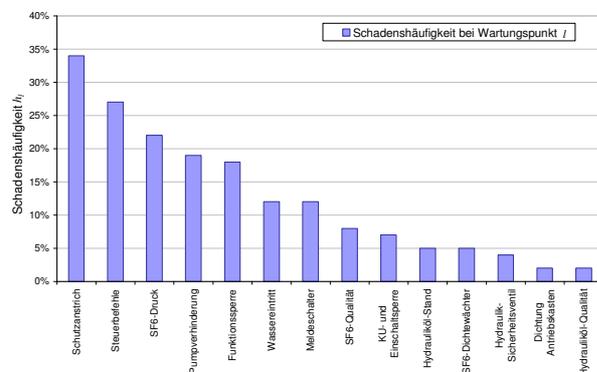
## 4 Schadensbefund bei Wartungsmaßnahmen

Ein Wartungsprotokoll diente ursprünglich nicht der Schadensdokumentation sondern war vielmehr ein Leitfaden bzw. eine Arbeitsvorbereitung für den Service-Mitarbeiter. Heute können diese Protokolle, oft bestehend aus über 250 Wartungspunkten, zu einem großen Teil zur Evaluierung von Schadensbildern herangezogen werden [1].

In Bild 2 sind die bei einer Wartungsmaßnahme gefundenen Schäden dargestellt. Hierbei wurden jedoch nur Schäden mit einer Häufigkeit  $> 1\%$  berücksichtigt. Als Schaden wurden dabei die Protokollpunkte gewertet, die eindeutig eine nachteilige Veränderung am Leistungsschalter zur Folge haben. Damit sind beispielsweise die Korrektur eines Wertes, der Austausch oder die Ausbesserung bzw. die Nicht-Erfüllung von einer vorgegebenen Funktion verbunden.

Die Ausbesserung des Schutzanstrichs ist bei ca. 35% der Wartungen die am Häufigsten durchgeführte Maßnahme. Darüber hinaus mussten oft defekte Steuerbefehle (27%) sowie der SF<sub>6</sub>-Druck (22%) korrigiert werden. Weiterhin sind im Bereich der Steuerung die Befehle für die Pumpverhinderung (19%) des Hydraulikantriebs und die Funktionssperre (18%) des Schalters zum Teil unwirksam.

Alle weiteren Schäden, die durch eine Wartung inspiert wurden, liegen im Häufigkeitsbereich bei etwa 10% und darunter.



**Bild 2:** Schadensbefund bei Wartungen

Trotz des hohen Störungsaufkommens an Leistungsschaltern mit Hydraulik-Antrieb aufgrund von Un-

dichtigkeiten am Hydrauliksystem [4], konnte bei Wartungen nur selten ein Schaden am Hydraulik-Antrieb ( $\leq 5\%$ ) festgestellt werden. Dieses legt nahe, dass die IH-Maßnahme die für die später auftretenden Störungen ursächlichen Schäden nicht erkennt bzw. beseitigt oder dass die Störungen im Allgemeinen ohne vorher erkennbare Schäden auftreten.

## 5 Entwicklung eines Schadens zu einer Störung

Durch eine Verschiebung der Wartung werden die üblicherweise entdeckten Schäden nicht behoben und können sich in der Folgezeit zu einer Störung entwickeln. Somit können die Schadenshäufigkeiten der Wartung als Ansatz für die zukünftige Störungsentwicklung verwendet werden und somit das Alterungsverhalten negativ beeinflussen.

Das prognostizierte Störungsaufkommen nach Überschreitung des üblichen Wartungsintervalls ergibt sich nun als Überlagerung des bisher errechneten Störungsgeschehens ( $\lambda_i$ ) mit den aufgrund von Schäden entstehenden zusätzlichen Störungen. Damit ergibt sich für das veränderte Verhalten das folgende Störungsaufkommen

$$\hat{\lambda}_i = \lambda_i + \Delta\hat{\lambda}_i \quad (1)$$

mit den abgeschätzten zusätzlichen Störungen

$$\Delta\hat{\lambda}_i = \sum_{l=1}^n \bar{h}_l \cdot p_{l,i} \quad (2)$$

Die durchschnittliche Schadenshäufigkeit  $\bar{h}_l$  bezieht sich dabei auf die Wartungspunkte  $l = 1 \dots n$  (siehe Bild 2).  $p_{l,i}$  bezeichnet die für Wartungspunkt  $l$  anzusetzende Wahrscheinlichkeit für einen Störungseintritt zum Zeitpunkt  $i$ , die im Folgenden bestimmt wird.

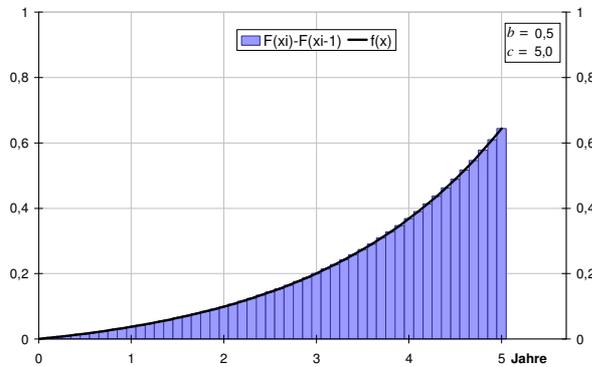
Langjährige Betriebserfahrungen im Umgang mit diagnostizierten Schäden bei Wartungen und Inspektionen legen die Vermutung nahe, dass einige Schadensarten exponentiell in ihrem Ausmaß wachsen. Daraus lässt sich schließen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein solcher Schaden zu einer Störung entwickelt, ebenfalls exponentiell ansteigt.

Für andere Schadensarten kann angenommen werden, dass sie beispielsweise bereits seit der Produktion bzw. seit Inbetriebnahme des Betriebsmittels vorhanden waren und keine weitere Veränderung eintritt. Die Wahrscheinlichkeit einer Störung aufgrund eines solchen Schadens ist dann über die gesamte Betriebszeit gleichverteilt.

Zur Beschreibung der Entwicklung eines Schadens zu einer Störung wird folgende Dichtefunktion gewählt, die in Bild 3 dargestellt wird:

$$f(x) = \begin{cases} a(e^{bx} - 1) & 0 \leq x \leq c \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

mit  $b, c \in \mathbb{R}, c > 0$



**Bild 3:** Dichtefunktion einer Schadensentwicklung

Eine Dichtefunktion muss folgender Bedingung genügen:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (4)$$

Mit dem gewählten Ansatz in (3) ergibt sich die nachstehende Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \int_0^c a(e^{bx} - 1) dx = a \left[ \frac{1}{b} e^{bx} - x \right]_{x=0}^c \quad (5)$$

$$= a \left( \frac{1}{b} e^{bc} - c - \frac{1}{b} \right) = 1$$

Daraus folgt für  $a$  die Bedingung:

$$a = \frac{b}{e^{bc} - bc - 1} \quad (6)$$

Der Parameter  $b$  beschreibt dabei den Verlauf der Schadensentwicklung. Durch die Wahl eines hinreichend großen negativen Wertes kann sogar ab einem bestimmten Zeitpunkt eine approximiertere Gleichverteilung simuliert werden. Der Parameter  $c$  stellt die maximale Zeit bis zum möglichen Störungseintritt dar. Somit können mit Hilfe einer Funktion alle möglichen Schadensverläufe nachgebildet werden.

Die diskreten Einzelwahrscheinlichkeiten  $p_{l,i}$  ergeben sich nun durch:

$$p_{l,i} = F_l(x_i) - F_l(x_{i-1}) \quad (7)$$

Für die Berechnung des veränderten Alterungsverhaltens durch die erneute Anwendung der Regressionsanalyse auf  $\hat{\lambda}_i$ , wird die Intervallgröße zu

$x_i - x_{i-1} = 0,1$  Jahren gewählt (vgl. Bild 3).

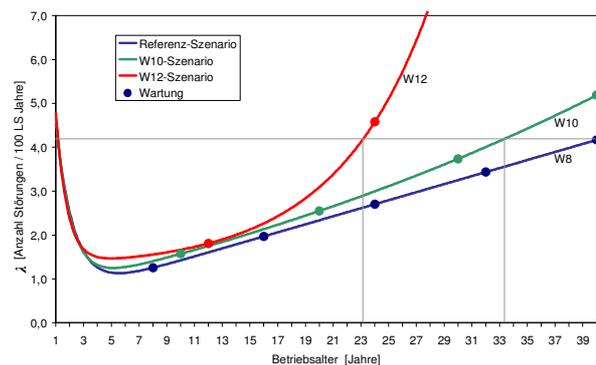
Jedem Wartungspunkt (siehe Bild 2) kann nun ein spezifisches Schadensmodell zugeordnet werden. Dabei wurde bei den Schadensverläufen mit einem exponentiellen Verhalten der Parameter  $b$  so gewählt, dass die Dichtefunktion die Form eines Dreiecks annimmt. Dadurch tritt die Störung zum frühest möglichen Zeitpunkt auf, wodurch ein Worst-Case simuliert wird.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass es sich generell bei diesem Ansatz um die Simulation des Worst-Case handelt, da nahezu alle bei einer Wartung entdeckten Schäden mit einer mittleren Häufigkeit  $\bar{h}_i \geq 1\%$  in eine Störung überführt werden.

Lediglich der Wartungspunkt „SF<sub>6</sub>-Druck“ wird in der Simulation nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass an Stelle der verschobenen Wartung zumindest eine Inspektion stattfindet, die den SF<sub>6</sub>-Druck bei Bedarf wieder korrigiert.

## 6 Alterungsverhalten bei größerem Wartungszyklus

In Bild 4 wird das abgeschätzte Alterungsverhalten in drei Szenarien in Abhängigkeit des Wartungszyklus (8-, 10-, und 12-Jahreszyklen) vergleichend dargestellt. Die Funktion W8 illustriert hierbei das Referenz-Szenario (Alterungsverhalten bei Ist-Instandhaltung, vgl. Bild 1) mit einem Wartungszyklus von 8 Jahren. Das Alterungsverhalten im W10-Szenario macht deutlich, dass sich trotz der zuvor angenommenen Worst-Case-Abschätzungen das Störungsaufkommen nur gering erhöht. Gegenüber dem Referenz-Szenario ist hier ab einem Betriebsalter von etwa 20 Jahren mit einem minimal höheren Anstieg der Störungswahrscheinlichkeit zu rechnen.



**Bild 4:** Prognose des Störungsaufkommens bei größerem Wartungszyklus

Wird der Wartungszyklus jedoch um 4 Jahre in die Zukunft verschoben (W12-Szenario), wird dieser Einfluss durch einen stark exponentiellen Anstieg der

Störungswahrscheinlichkeit ab einem Alter von 15 Jahren geprägt

Bei der heutigen Instandhaltung sind 123-kV-Schalter zum Teil bis zu einem Alter von über 40 Jahren in Betrieb [3]. Mit der Annahme, dass auch der hier betrachtete Leistungsschalter unter Anwendung der Ist-Instandhaltung (Referenz-Szenario) eine Betriebszeit von 40 Jahren erreicht, wird dieser Schalter bis zu einer Störungswahrscheinlichkeit von  $\lambda \geq 4.0$  Störungen pro 100 LS Jahren in Betrieb sein (siehe Bild 4).

Unter der Voraussetzung, dass diese Störungswahrscheinlichkeit in den anderen Szenarien als Maximalwert betrachtet wird, würde im W12-Szenario die Betriebszeit auf etwa 23 Jahre herab gesetzt und damit um etwa 43% reduziert werden. Im W10-Szenario würde sich die Betriebszeit dementsprechend lediglich um 17% auf ca. 33 Jahre verkürzen, wobei zusätzlich eine Wartungsmaßnahme eingespart wird.

## 7 Zusammenfassung und Fazit

Aus einer Mischung aus heuristischem Wissen (Betriebserfahrung), bisherigem Störungsgeschehen und inspezierten Schäden bei Wartungen wurde ein Modell implementiert, das die Entwicklung eines Schadens zu einer Störung nachbildet. Mit diesem Modell kann beispielsweise das Störungsgeschehen infolge einer aufgeschobenen Wartungsmaßnahme simuliert werden. Hierfür werden den Schadenshäufigkeiten spezifische stochastische Verteilungsfunktionen zugewiesen, aus denen zukünftige Störungswahrscheinlichkeiten generiert werden. Die erste Anwendung der Methode auf einen 123-kV-Leistungsschalter (Pufferprinzip, Hydraulikantrieb) ergab bei einer Verlängerung des Wartungszyklus um 4 auf 12 Jahre einen steilen exponentiellen Anstieg der Störungswahrscheinlichkeit ab einer Betriebszeit von etwa 15 Jahren.

Eine Verlängerung des Wartungszyklus von 8 auf 10 Jahre würde die Störungswahrscheinlichkeit nicht so stark beeinflussen. Jedoch könnte die durchschnittliche Nutzungszeit des Schalters aufgrund des etwas steileren Anstiegs des Störungsaufkommens möglicherweise um 17% reduziert werden.

Das „Schaden-zu-Störungs-Modell“ zeigt sich als hilfreiches Werkzeug, wobei gut protokollierte Resul-

tate von Instandhaltungsmaßnahmen vorausgesetzt werden müssen. Zusätzlich können die neu gewonnenen Alterungsmodelle für eine Asset Simulation zur Abschätzung der Langzeit-Investitionen (vgl. [5]) nützlich sein. In zukünftigen Berechnungen wird dieses Modell im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf weitere Anwendungen untersucht.

Mit einem besseren Wissen über die Parametrierung des Modells könnten weitere Szenarien im Zusammenhang mit einer veränderten IH-Strategie simuliert werden, um dessen Einfluss auf das Betriebsmittelverhalten besser abbilden zu können. Dann ist es außerdem möglich, nicht nur zeitliche, sondern auch inhaltliche Veränderungen von Instandhaltungsmaßnahmen zu bewerten und damit die Effizienz einer Maßnahme zu steigern

## 8 Literatur

- [1] S. Federlein, C. Hille, C. Neumann, J. Schneider, A. Schnettler. „Einflussfaktoren auf das Schadens- und Störungsverhalten von 123-kV-Leistungsschaltern“ (ew Jg. 107 (2008) Heft 4, Frankfurt 2008)
- [2] G. Balzer; D. Drescher, F. Heil, P. Kirchesch, R. Meister, C. Neumann. „Evaluation Of Failure Data Of HV Circuit-Breakers For Condition Based Maintenance“ (Cigre Session, A3-305, Paris 2004)
- [3] S. Federlein, C. Hille. „Life Management von 123 kV Leistungsschaltern“ (Jahresbericht 2007, Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen University, Aachen 2008)
- [4] C. Neumann, G. Balzer, S. Federlein, B. Rusek, J. Schneider, A. Schnettler, C. Schorn, U. Zickler. „Strategy for End of Life Assessment for High Voltage Circuit Breakers“ (Cigre Session, A3-101, Paris 2008)
- [5] A. Gaul, J. Hogräfer, C. Neumann, J. Schneider, A. Schnettler, M. Schwan, W. Wellßow. „Asset management techniques“ (ScienceDirect, Journal of Electrical Power & Energy Systems 28 (2006) 643-654)