

Information zum Referenten:

Professor Dr. Ing. habil., Dr. sc. techn.

Wilfried J. Elspass



Studium

RWTH Aachen, ETH Zürich

- Luft- und Raumfahrttechnik
- Produktentwicklung

Berufliche Karriere

Dornier System GmbH, ETH Zürich, MIT Cambridge, Stanford University

Derzeitiger Arbeitgeber / Institution

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Winterthur, CH

<http://ims.zhaw.ch>

wilfried.elspass@zhaw.ch

Ein neuer Weg zur Überwachung mechatronischer Systeme

Wilfried J. Elspass, ZHAW, Institut für Mechatronische Systeme

Zusammenfassung

Prozesse und Systeme bestehen aus einem teilweise nicht unmittelbar überschaubaren Zusammenspiel vielfältiger Abhängigkeiten. Ein mechatronisches System, wie beispielsweise das automatische Veloparksystem Bikeloft, ist ein Beispiel für ein „technisch“ komplexes System. Störungssituationen müssen durch eine vorausschauende Analyse des Systems antizipiert werden können.

Bei diesem System werden als Basis für die Beurteilung des Systems ca. 30 Systemvariablen (Messwerte) in Echtzeit ausgewertet. Aufgrund dieser gemessenen Betriebsdaten soll eine vorausschauende Aussage über den Systemzustand bzw. den Betriebsprozess gemacht werden.

Die Software OntoSpace der Firma Ontonix ist die erste Software ihrer Art, die es ermöglicht, die Art und Struktur der Komplexität eines Systems zu erfassen und auf dieser Basis seine Robustheit zu quantifizieren. Die dominanten Systemzustände („Modalwerte“) aus der Verteilungsfunktion im Zustandsraum werden ermittelt und grafisch dargestellt.

Der Einsatz dieser neuartigen Methode wird am Beispiel des Projektes Bikeloft vorgestellt. Erste Ergebnisse der noch laufenden Untersuchungen werden präsentiert.

1 Komplexe Systeme

Mechatronische Systeme sind technische Gebilde, die aus einer Gesamtheit geordneter Elemente (z.B. Sensoren, Aktoren, mechanische Komponenten, etc.) bestehen und aufgrund ihrer Eigenschaften miteinander durch Relationen verknüpft sind, entweder passiv durch mechanische Wirkzusammenhänge oder aktiv über beispielsweise einen Regelkreis.

Der Umgang mit komplexen Systemen beruht bisher auf zwei Prinzipien:

- das bekannte „kiss“ (keep it simple and stupid), was bedeutet, Komplexität vermeiden, und dem weniger bekannten „deconstruct“ (define, structure, react), also Systeme zu strukturieren und zu überwachen.
- nach dem Ansatz „deconstruct“ ist heute das übliche Vorgehen die Zerlegung eines Gesamtprozesses in einfachere Subprozesse und Komponenten und eine dafür passende Definition und Überwachung von Parametern beziehungsweise Stellgrößen.

Je komplizierter die Systeme und Prozesse jedoch werden, desto wirkungsloser ist ihre Regelung auf der Ebene der Komponenten oder Subprozesse. Denn je mehr Variable in einen Prozess eingreifen, desto weniger „kritische“ Variable gibt es, die als Führungsgrösse dienen könnten. Je weniger eine Variable dominiert, desto mehr basiert das Gesamtsystem auf dem Zusammenspiel vieler Variablen. Bei dieser Kopplung können bereits kleine, unwillkürliche Störungen das Gesamtsystem dramatisch

verändern – ein Effekt übrigens, der beispielsweise auch in der Wirtschaft häufig beobachtet werden kann.

Die Komplexität eines (mechatronischen) Systems ist abhängig von:

- der Art und Verschiedenartigkeit der Elemente und Relationen,
- der Anzahl der Elemente und Relationen,
- der Ungleichmässigkeit der Aufteilung der Elemente und Relationen,
- der (Eigen-) Dynamik des Systems (Art und Anzahl der möglichen Zustände).

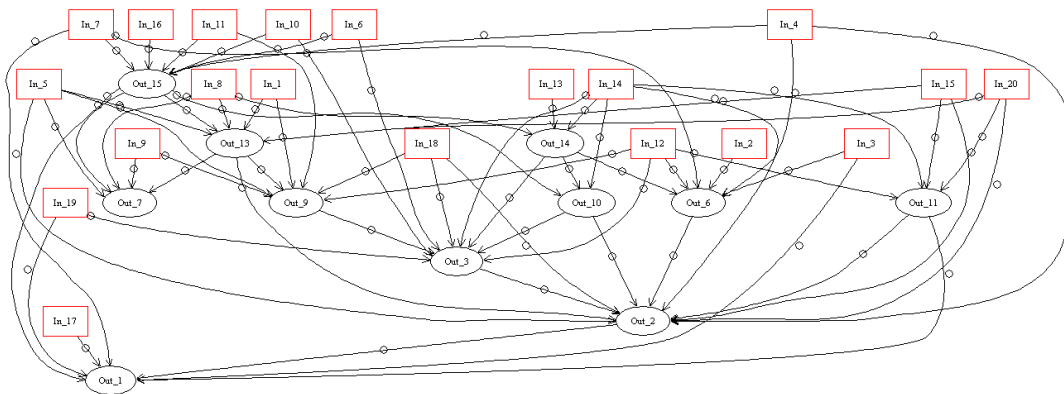


Abbildung 1: Konventionelle Darstellung von Systemparametern und Relationen in einem technischen System

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht stösst die konventionelle Darstellung von Relationen eines (technischen) Systems mit wachsender Anzahl von Systemparametern und Relationen schnell an Grenzen und wird unübersichtlich. Insbesondere ist es schwierig zu beurteilen, welche Parameter die meistens Relationen aufweisen. Sie werden häufig als „Hubs“ bezeichnet, womit ausgedrückt werden soll, dass sie für das Funktionieren des Systems von zentraler Bedeutung ist, weil sie viele Relationen miteinander verknüpfen. Fällt ein Hub in einen System aus, wird das System nur mit erheblich eingeschränkter Funktionalität arbeiten oder im Extremfall sogar versagen.

1.1 Quantifizierung der Systemkomplexität

Eine eindeutige, allgemeingültige Definition des Begriffs der Komplexität gibt es nicht. Häufig wird der Begriff Komplexität als „Grauzone“ zwischen Chaos und Ordnung beschreiben.

Die Komplexität eines Systems kann nicht beliebig zunehmen. Es existiert in jedem System eine obere Grenze, nach deren Überschreiten eine Verschlechterung der Leistung oder sogar ein Kollabieren des Systems mit Totalversagen eintritt. Nähert sich das System dieser kritischen Obergrenze der Komplexität, wird das System sehr empfindlich und anfällig auf Störungen und kann spontan in einen anderen, unzulässigen Systemzustand wechseln. Das System hat seine Eigenschaft, robust gegen Störungen zu sein, verloren. Aus diesem Grunde sind Systeme, die für den Betrieb in der Nähe eines optimalen Betriebspunktes ausgelegt sind, sehr häufig störanfällig und wenig robust.

Um die Komplexität eines Systems „messen“ zu können, sollten folgende Merkmale berücksichtigt werden:

1. die Entropie der Daten des Systems, d.h. die Informationsdichte,
2. die Struktur des Systems (d.h. u.a. wie Informationen im System transportiert werden),
3. Auflösung der Daten des Systems (Granularität). Häufig können nur unscharfe Aussagen über den Systemzustand gemacht werden, wie z.B. klein, mittel, gross, sehr gross, etc.

Ein neuartiger Ansatz zur Messung der Komplexität eines technischen Systems beruht alleine auf der Auswertung von Messdaten, die das reale Verhalten des Systems widerspiegeln. Es wird also bewusst kein Modell des technischen Systems erstellt, dass in aller Regel nur mit einer hinreichenden Genauigkeit den Systemzustand erfassen kann, je nach Grad der Abstraktion, Annahmen oder Vereinfachung. Reale Messdaten enthalten authentische Informationen des Systemverhaltens einschliesslich zufallsbedingter Einflüsse bzw. Ungenauigkeiten wie z.B. aufgrund von unvermeidlichen Toleranzen beim mechanischen Komponenten.

Stattdessen werden die Relationen des Systems und der Informationsgehalt der Messdaten auf folgende Weise ermittelt:

1. Für alle möglichen Kombinationen der Systemvariablen (Messdaten) werden Scatterplots (x-, y-Plots) erstellt und als 2D-Bild weiter behandelt und ausgewertet.
2. Diese Bilder der paarweisen Messdatenplots werden bzgl. Informationsgehalt und Struktur weiter ausgewertet.
3. Falls eine Struktur in dem jeweiligen Bild zu erkennen ist, wird dies durch einen Verknüpfung in der Systemmatrix dargestellt, was einer Relation zwischen zwei Systemvariablen entspricht.
4. Auf diese Weise kann eine Systemmatrix für alle Variablen mit allen Relationen untereinander, d.h. für das gesamte System erstellt werden.

Die Punkte („connectors“) illustrieren also Relationen zwischen den Variablen des Systems. Jede Relation korrespondiert mit einer Regel, die durch ihre Wichtung oder Stärke charakterisiert ist.

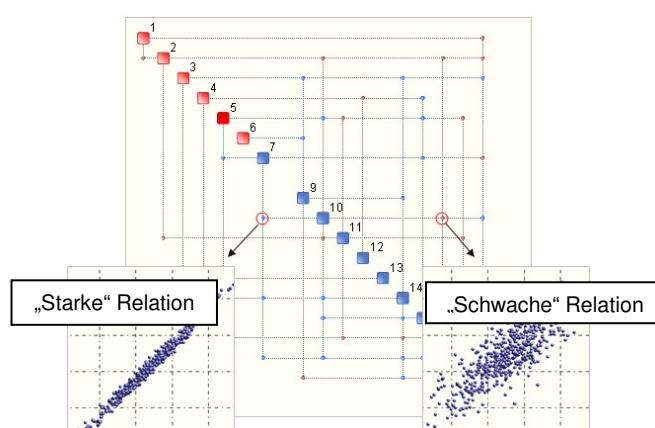


Abbildung 2: Beispiel einer Relationenmatrix des Systems

Es ist offensichtlich, dass der in Abb. 2 dargestellte Systemzustand mit den Systemparametern und Relationen erheblich an Übersichtlichkeit gegenüber der konventionellen Darstellung gewonnen hat. Eine schwache Relation bedeutet, dass z.B. bei Änderung der Variablen x keine eindeutige Aussage über die Änderung der dazugehörigen y-Variable gemacht werden kann. Besteht das System aus sehr vielen solcher Relationen, ist erwartungsgemäss die Komplexität des Systems hoch. Das Verhal-

ten kann nicht mehr mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden, d.h. es kann zu unerwarteten Systemzuständen kommen. Richtig angewandt, werden diese Methoden zu einem Kernelement im Verständnis von Komplexität und Robustheit eines Systems oder Prozesses.

Die Software OntoSpace von Ontonix ist die erste Software ihrer Art, die es ermöglicht, die Art und Struktur der Komplexität eines Systems zu erfassen und dadurch seine Robustheit zu quantifizieren. Ähnlich wie durch eine Fourier-Analyse aus einem Signal die dominanten Schwingungszustände eines Systems ermittelt werden können, kann OntoSpace die dominanten Systemzustände („Modalwerte“) aus der Verteilungsfunktion im Zustandsraum ermitteln und als Relationsmatrix darstellen. Sie bilden einen Satz von verwandten Regeln (Relationen), die das Verhalten des Systems in dem entsprechenden Zustand bestimmen.

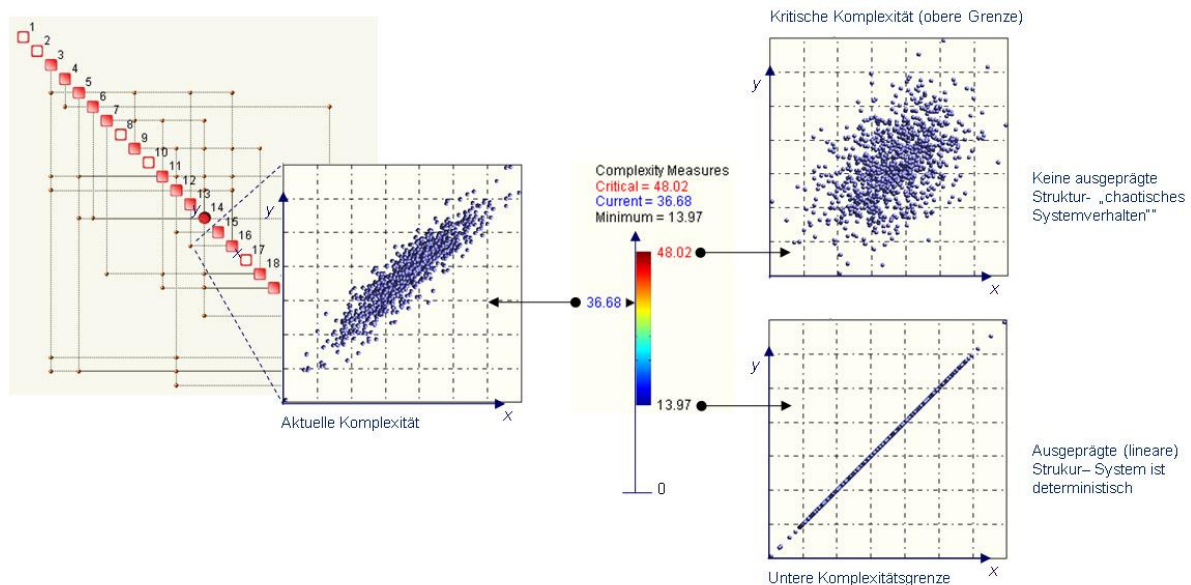


Abbildung 3: Aktuelles Komplexitätsmass sowie untere und obere Grenze

Aus dem Abstand der aktuellen Komplexität zu deren oberen Grenze („kritische Komplexität“) kann eine weitere wichtige Kenngrösse des Systems abgeleitet werden. Je grösser dieser Wert ist, umso grösser ist auch die Robustheit des Systems. Beim dargestellten Beispiel (Abb. 2) beträgt gemäss dieser Definition die Robustheit des Systems rund 75%.

In dynamischen Systemen ändert sich die Komplexität mit der Zeit. Gründe dafür können beispielsweise Verschleiss oder Abnutzung in mechanischen Komponenten sein, wodurch sich auch wiederum elektrische Parameter wie die Stromaufnahme in Antrieben ändern können. Gleichermassen passen sich die untere und obere Grenze der Komplexität infolge des sich verändernden Systemzustandes entsprechend an. Ebenso können sich die Stärke von Relationen und deren Anzahl mit der Zeit verändern.

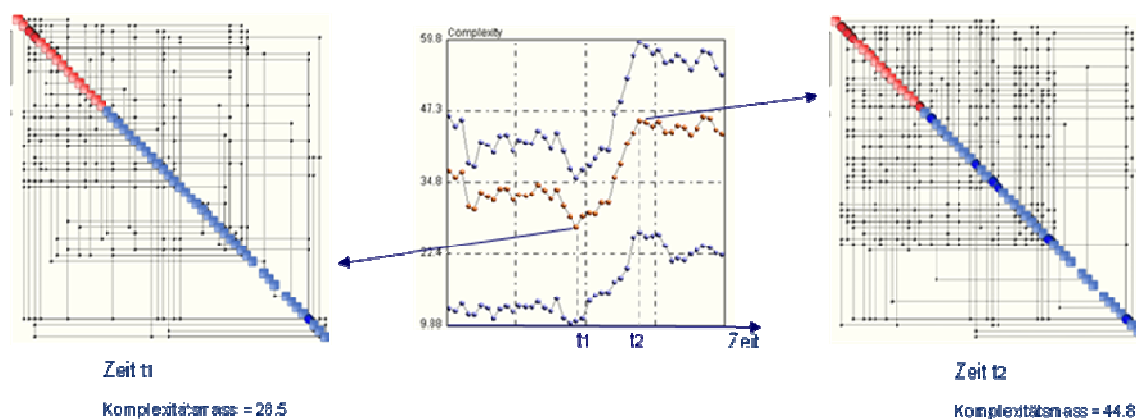


Abbildung 4: Zeitliche Veränderung der Systemkomplexität

Aus dem Zeitverlauf der Komplexität können verschiedene Rückschlüsse gezogen werden:

1. Die Komplexität eines störungsfreien Systems ändert sich nur in einer schmalen Bandbreite und bleibt somit nahezu konstant,
2. Grössere Schwankungen der Komplexität deuten auf spezielle Ereignisse beim Betrieb des Systems hin (temporäre Veränderungen),
3. Eine monoton steigende Zunahme der Komplexität weist darauf hin, dass die innere Energie des System steigt und zwar so lange, bis bei Erreichen der kritischen Komplexität ein anomales Systemverhalten eintritt, bis hin zum Totalversagen.

Aus Abb. 4 kann die Veränderung der Systemkomplexität aufgrund der stark unterschiedlich ausgeprägten Systemdarstellungen visualisiert werden. Der Systemzustand zum Zeitpunkt t1 weist deutliche weniger Relationen zwischen den Systemparametern verglichen mit dem Zeitpunkt t2 auf, ein deutlicher Indikator für die Grad der Systemkomplexität.

1.2 Komplexität als Beurteilungsgrundlage für den Systemzustand

System Health Monitoring (SHM), d.h. die Überwachung des Zustands von Systemen, ist eine Vorgehensweise, um kontinuierlich Anhaltspunkte über die Funktionsfähigkeit von technischen Systemen zu erhalten. Diese Technologie hat insbesondere im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik, aber auch im Bereich der Energietechnik (Kernkraftwerke) grosse Bedeutung erlangt. Auf diese Weise sollen Schädigungen, zum Beispiel Risse oder Verformungen an Strukturen, frühzeitig erkannt werden, um Gegenmassnahmen einzuleiten. Es werden also laufend Daten über den Zustand kritischer Komponenten über entsprechenden Sensoren gemessen, um frühzeitig ein ggf. anomales Verhalten oder Zustand zu entdecken. Auf Basis dieser Messdaten können dann kontinuierlich wie im den vorherigen Abschnitten erläutert die Prozess- bzw. Systemzustände bzgl. ihrer Komplexität beurteilt werden. Aufgrund des Verlaufs des Komplexitätsmasses kann mit dieser Methode für die definierten Zeitintervalle aus zahlreichen Messwerten (Inputs) das Systemverhalten mit einer einzigen Grösse im Sinne einer holistischen Beurteilung erfolgen. Dieser holistische Ansatz kann zu erheblich mehr Hinweisen auf „traumatische“ Ereignisse im System hinweisen als die Betrachtung einiger ausgewählter Messwerte bzw. die Beobachtung einzelner Messwerte simultan. Grundsätzlich gilt, dass der Systemzustand umso robuster ist, je grösser der Abstand der aktuellen Komplexität von der kritischen Komplexität für den jeweilig betrachteten Systemzustand ist.

1.3 Anwendungsbeispiel System „Bikeloft“

Die zuvor vorgestellte Vorgehensweise zur Bestimmung des Komplexitätsmasses wurde am Beispiel des Projektes „Bikeloft“ angewendet und auf seine Brauchbarkeit unter realen Anwendungsbedingungen überprüft. „Bikeloft“ ist ein automatisches Parkhaus für Fahrräder mit einer skalierbaren Kapazität von rund 500 bis 1000 Fahrrädern, von der Konzeption und Betrieb sehr ähnlich wie ein Hochregallager.

Aus dem laufenden Versuchsbetrieb der Testanlage wurden an vier Antrieben bzw. Drives insgesamt 76 Sensordaten als Zeitreihen aufgenommen und daraus die Komplexität der Anlage als Funktion der Zeit berechnet. Im Einzelnen waren es Messwerte wie die aktuelle Position, der Drive Status, Strom,



Variante Hochbau

Zugänge:
Veloabgabe und Veloübernahme

Lagerplätze der
Boxen.

Roboter: Für den
Boxentransport
zwischen Zugang
und Lagerplätzen.

Auslastung, Überlast, Scheinstrom, Spannung, Frequenz, Motorleistung, Schleppfehler, Drehmoment, und die Temperatur.

Abbildung 5: Automatisches Velo-Parkhaus „Bikeloft“

Ein Beispiel für einen derartigen Zeitverlauf der Anlage ist der hier gezeigte, der im Rahmen der Entwicklungsarbeiten für das automatische Fahrradparkhaus „Bikeloft“ erstellt wurde. Die Daten wurde jeweils alle 50 ms erfasst.

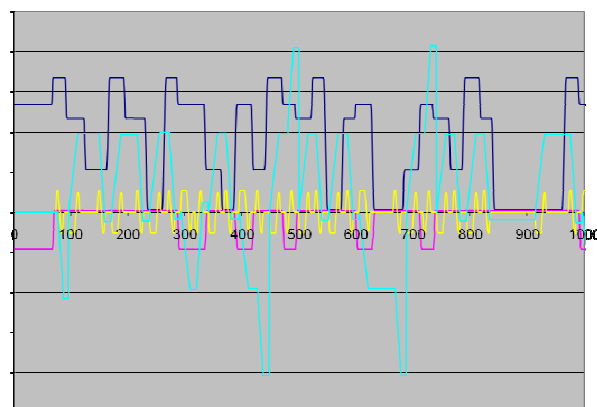


Abbildung 6: Typischer Sensordatenverläufe der Bikeloft-Anlage (Ausschnitt)

Die Messdaten wurden gemäss der in Abschnitt 1.1 bzw. 1.2 beschriebenen Vorgehensweise mit der Software OntoSpace der Firma Ontonix™ analysiert. Exemplarisch wird der Verlauf der Systemkomplexität in Abb. 6 dargestellt. Bei diesem Testlauf wurden an der Anlage gezielt Störungen an der mechanischen Struktur provoziert. Man erkennt deutlich die stetige Zunahme der Komplexität bis auf einen Wert von 60, im Vergleich zu einwandfrei laufender Anlage mit einem durchschnittlichen Kom-

plexitätsmass von 35. Der deutlich veränderte Systemzustand wird durch die stark veränderte Topologie der Systemmap (Relationenmatrix) verdeutlicht. Nach Erreichen der kritischen Komplexität (Komplexitätsmass ~ 60) ist an der realen Anlage ein undefinierter Zustand eingetreten, wodurch ein Abschalten von Subsystemen schliesslich ausgelöst wurde. Deutlich ist die Abnahme der Komplexität zu beobachten, schliesslich wird die Anlage automatisch abgeschaltet, um eine grössere Beschädigung zu vermeiden.

Anhand dieser Versuche konnte die Brauchbarkeit der Methode im Sinne einer vorausschauenden Beurteilung des Systemzustandes nachgewiesen werden. Ebenso zeigt die Systemkomplexität der Anlage weitere Schwächen der mechanischen Konstruktion auf, was sich in dem nicht konstanten Wert des Komplexitätsmasses ausdrückt.

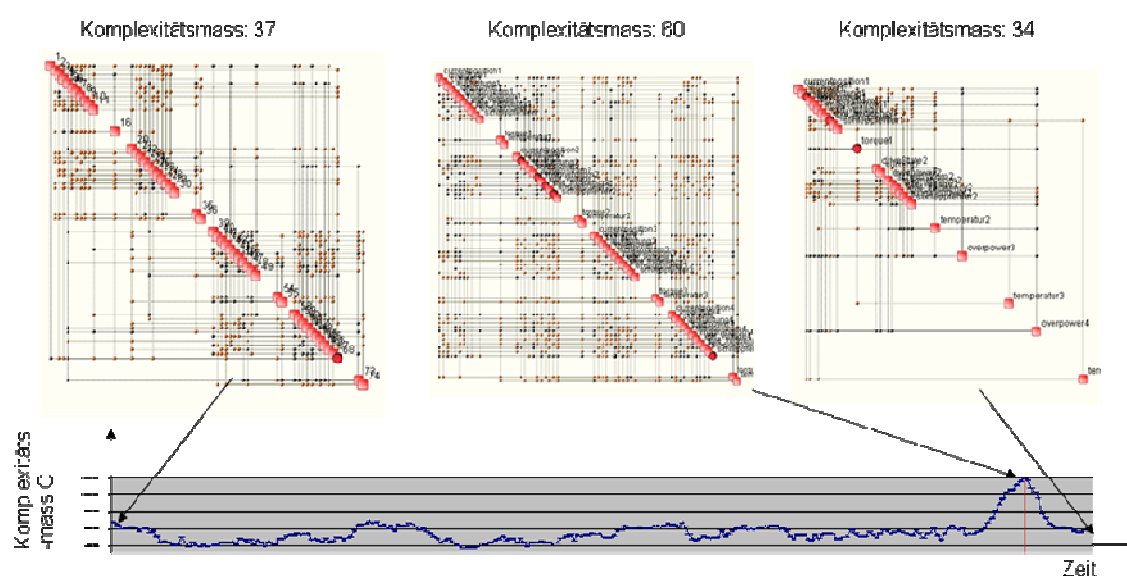


Abbildung 7: Zeitliche Veränderung der Systemkomplexität (Beispiel System „Bikeloft“)

1.4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine neue Methode vorgestellt, um den Zustand eines Systems beurteilen zu können. Als Mass für die Güte des Systemzustandes wurde als quantifizierende Grösse die Komplexität bzw. das Komplexitätsmass zugrunde gelegt. Anhand einer exemplarischen Anwendung wurde der Einsatz dieser Methode in der Praxis demonstriert. Erste Ergebnisse bestätigen die Anwendbarkeit und den Nutzen, der sich daraus ergibt, dass die Auswertung einer Vielzahl von Systemparametern letztlich anhand einer skalaren Grösse erfolgen kann. Dadurch wird die Beurteilung des Zustandes komplexer Systeme erheblich vereinfacht. Gleichzeitig wurde erläutert, dass sich mit diesem Ansatz eine vorausschauende Aussage über den Systemzustand ableiten lässt. Die bisher erarbeiteten Ergebnisse müssen noch weiter vertieft und die gefundenen Resultate noch erhärtet werden, um den definitiven produktiven Einsatz dieser Methode freigeben zu können.

1.5 Literatur

Marczyk, J.: "Complexity Management: New Perspectives and Challenges for CAE in the 21-st Century", Benchmark Magazine, NAFEMS, July 2008.

Marczyk, J.: "Practical Complexity Management", Editrice Uni-Service, Trento, Italy, 2009.

Elspass, W.J., Ch. Henschel, A. Wytenbach: „Automatisches Zweirad Parksystem BikeLof“, KTI-Projekt 9574.1, Projektantrag, Winterthur, Juli 2008.

1.6 Danksagung

Das Projekt Bikeloft wurde von der Förderagentur für Innovation KTI in den Jahren 2008 bis 2010 unterstützt, wofür wir uns an dieser Stelle nochmals bedanken wollen.