



Erfolgreiche Universitätskooperation ermöglicht computergestütztes Plant Auditing  
Alexander Horch, Vidar Hegre, Katrine Hilmen, Hallgeir Melbø, Lamia Benabbas,  
Stratos Pistikopoulos, Nina Thornhill, Nunzio Bonavita

Störungen und Oszillationen in Produktionsprozessen haben normalerweise großen Einfluss auf die Produktqualität, laufenden Kosten und Rentabilität, wenn nämlich die Produktion von den optimalen Einstellungen abweichen muss, um solchen Unregelmäßigkeiten im Prozess Rechnung zu tragen. Ein internationales Team von ABB und dem Centre for Process Systems Engineering des Imperial College/University College London hat sich vorgenommen, den für die Fehlersuche in Verarbeitungsanlagen erforderlichen Zeitaufwand zu reduzieren, sodass Betriebs- und Wartungsarbeiten effizienter durchgeführt werden können.

Zur Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit werden in modernen Verarbeitungsbetrieben Prozessströme recycelt und die anfallende Wärme wieder in den Prozess integriert. Diese Integration von Massen- und Energieströmen stellt zusätzlich Anforderungen an die Prozesssteuerung, da sich mögliche Oszillationen auf so komplexe Weise in der Anlage ausbreiten können, dass eine einzige Schwankung nicht selten zu einer großflächigen Störung führt. Eine sich ausbreitende Störung kann sich auf wichtige Prozessgrößen wie Materialzufuhr, Produkt- und Recyclingströme, Temperaturen und die Produktzusammensetzung auswirken. Davon betroffen sein kann nur eine einzelne Einheit (z. B. eine Destillationskolonne), eine ganze Anlage, wenn ein ganzer Produktionsprozess betroffen ist, oder sogar ein ganzer Standort, wenn Versorgungssysteme (z. B. für die Dampferzeugung) beeinträchtigt werden. Liegen mehrere gestörte oder oszillierende Messwerte vor, gestaltet sich die Suche nach der eigentlichen Ursache schnell wie die sprichwörtliche Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen.

Zur Lösung dieses Problems haben die ABB Forschungszentren in Deutschland und Norwegen und ABB Advanced Control Solutions in Genua, Italien, gemeinsam mit dem Centre for Process Systems Engineering (CPSE) des Imperial College/University College London (UCL) ein Projekt ins Leben gerufen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Lösung zur automatischen Erkennung anlagenweiter Störungen und Bestimmung wahrscheinlicher Ursachen für eine erfolgreiche Beseitigung bzw. Behandlung der Störungen durch verbesserte Ausrüstungen, Regelungen oder Regelungsstrategien.

In den vergangenen Jahren wurden an der Universität innovative Methoden zur Diagnose industrieller Prozesse auf der Grundlage gehobener Signalverarbeitung sowie spektraler und nichtlinearer Zeitreihenanalysen entwickelt. Diese Methoden bilden nun das Kernstück einer neuen ABB-Lösung zur computergestützten Analyse von Störungen in Industrieanlagen auf der Grundlage von historischen oder Online-Anlagendaten<sup>1)</sup>

■ Umfangreiche Tests mit industriellen

Daten wurden bereits erfolgreich abgeschlossen, und einige der Ergebnisse werden später in diesem Artikel vorgestellt. Zurzeit findet eine umfassende Untersuchung mit Echtzeit-Anlagendaten statt, bei der Zeitreihen analysiert werden, die alle paar Sekunden an Hunderten von Messpunkten entnommen wurden, sodass anlagenweite Probleme erkannt und diagnostiziert werden können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in künftigen Publikationen vorgestellt.

Das Hauptziel des Projekts ist die Entwicklung einer Softwareanwendung, die in der Lage ist, unerwünschtes Anlagenverhalten und dessen Ursachen zu bestimmen, sodass eine effiziente und gezielte Durchführung von Betriebs- und Wartungsarbeiten gewährleistet werden kann. Bei einem solchen anlagenweiten Ansatz wird das Verhal-

ten der gesamten Anlage mit Hilfe von Prozessmessungen beobachtet, die im Rahmen der Betriebsroutine durchgeführt werden. Somit kann auf die systematische Begehung der Anlage und Überprüfung jedes einzelnen Ausrüstungsteils durch das Wartungspersonal verzichtet werden. Stattdessen kann sich der Wartungsaufwand gezielt auf die für die Wirtschaftlichkeit der Anlage wichtigsten Problembereiche richten. Zu den wichtigsten Anforderungen an diese Methodik gehören:

- Erkennung von einer oder mehreren (periodischen) Oszillationen aufgrund eines regelmäßigen Musters in den Messungen
- Erkennung von nichtperiodischen Störungsmustern in der Anlage
- Lokalisierung der verschiedenen Oszillationen/Störungen in der Anlage und Bestimmung ihrer wahrscheinlichen Ursachen

1) Mit den Anforderungen an die Leistungsfähigkeit nehmen auch die Komplexität und die Qualitätsansprüche in modernen Industrieanlagen zu.



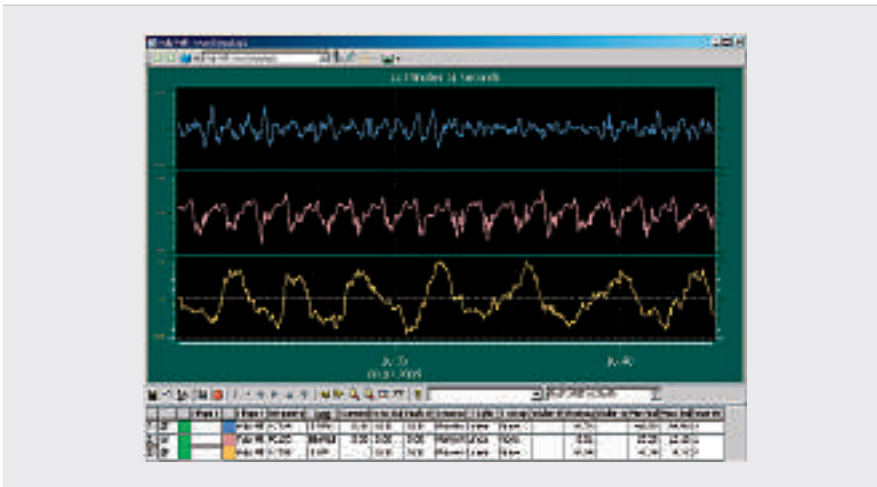
#### Fußnote:

<sup>1)</sup> Um sich einen Vorsprung bei der Anwendung dieser innovativen Technologie zu sichern, hat sich ABB die integrierte computergestützte Methode patentieren lassen.

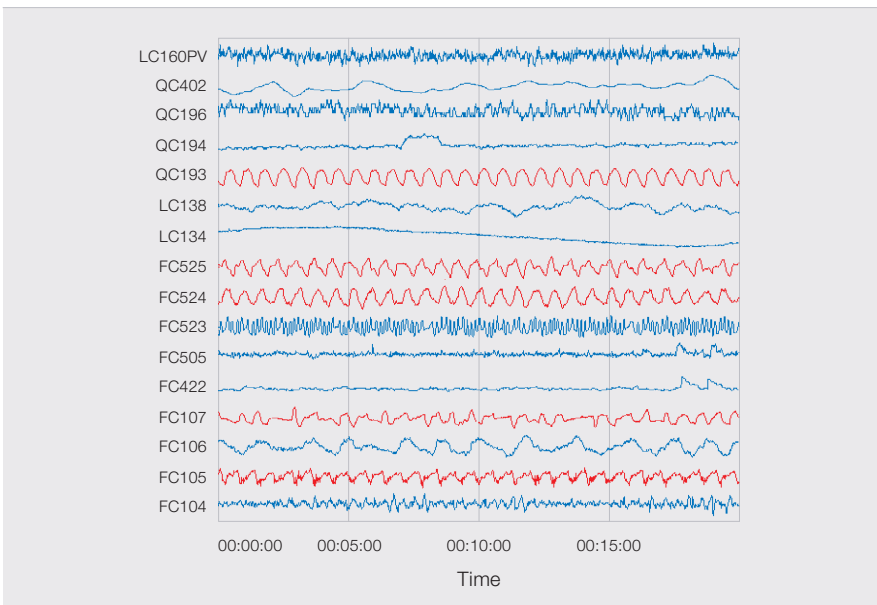


2 Zeitreihen ausgewählter Messungen

a) Typische Darstellung des jüngsten Verlaufs einiger Messungen auf einer PLS-Bedieneranzeige



b) High-Density-Darstellung einer verbreiteten Oszillation mit Kennzeichnung der oszillierenden Messungen



Ein leistungsstarkes Tool sollte nicht nur Häufungen (so genannte «Cluster») von gestörten Prozessgrößen (d. h. Messungen und Regelkreissignale) automatisch erkennen, sondern sollte zudem in der Lage sein, diese zu charakterisieren, anlagenweite Störungen hervorzuheben und diejenigen Stellen anzuzeigen, an denen die Ursachen einer Störung zu finden sein könnten.

**Ursachenanalyse in einer Zellstoffanlage**

In einer Zellstoffanlage kam es aufgrund eines fehlerhaften Ventils zu prozessweiten Oszillationen. Die einzige Möglichkeit herauszufinden, zu welchem Regelkreis das fehlerhafte Ventil gehörte, schien darin zu bestehen, alle Ventile der Reihe nach zu überprüfen. Anhand

dieses einfachen Beispiels und einem relativ kleinen Satz an Daten soll die Lösungsmethode von ABB erläutert werden. Noch deutlicher zeigt sich die Stärke des Verfahrens bei größeren Datenmengen. Für die unten dargestellte Analyse ist eine Vorverarbeitung und optionale Filterung der Daten erforderlich, auf die hier allerdings nicht näher eingegangen wird.

2 zeigt die Zeitreihen ausgewählter Messungen (im Folgenden als «Tags» bezeichnet) im typischen Trendbild einer PLS-Bedieneranzeige (2a) und in einem vom ABB-Analysetool verwendeten «High-Density»-Format mit normalisierten und übereinander angeordneten Trends (2b). Das Trenddisplay im PLS eignet sich aufgrund der geringen

Anzahl von Tags und der niedrigen zeitlichen Auflösung nicht gut zur Erkennung weit verbreiteter Störungen. Im High-Density-Format hingegen ist die oszillierende Störung deutlich sichtbar, und die vom Tool erkannte Häufung von oszillierenden Messungen ist in rot dargestellt. Wie sich aus diesem Cluster die Ursache ableiten lässt, soll in den nächsten Abschnitten erläutert werden.

**Störungserkennung durch Zeitreihen-Clustering**

Der erste Schritt der Analyse besteht in der Erkennung von Trendclustern, die ähnliche periodisch oszillierende Muster aufweisen. Die Erkennung der Oszillationen erfolgt mit Hilfe gehobener Signalverarbeitungsmethoden, wobei die Signale in diesem Fall die Zeitreihen der Messungen darstellen.

Herkömmliche Methoden zu Erkennung von Oszillationen basieren auf der Beobachtung von Nulldurchgängen des mittelwertfreien Signals. Rauschen ist dabei ein Problem, denn es werden zusätzliche Nulldurchgänge verursacht, die die Genauigkeit der Methode beeinträchtigen. Eine Lösung für dieses Problem ist in [1] beschrieben.

Mit der neuen Lösung werden Oszillationen anhand von Nulldurchgängen der Autokovarianzfunktion des Signals erkannt. So können auch mehrere Oszillationsfrequenzen in derselben Messung erkannt werden. Dies ist eine erhebliche Verbesserung gegenüber bisherigen Methoden, bei denen die Zeitreihen direkt verwendet werden, denn:

- Die Autokovarianzfunktion ist weniger rauschbehaftet als eine Zeitreihe, was die Erkennung von Nulldurchgängen erleichtert.
- Die zur Berechnung der Autokovarianzfunktion verwendete Methode bietet die Möglichkeit, bestimmte Frequenzbereiche herauszufiltern und getrennt zu behandeln.

Der in 2 rot dargestellte Zeitreihen-Cluster lässt sich mit Hilfe dieser Methode leicht erkennen. Die Anzahl der zu analysierenden Tags ist praktisch unbegrenzt. Bei derzeitigen Untersuchungen werden dank der effizienten Implementierung der unterlagerten Algorithmen problemlos mehrere Hundert Tags analysiert.

**Zeitreihen-Clustering durch Spektralanalyse**

Eine weitere Möglichkeit, die in den Messungen enthaltenen Informationen

darzustellen, ist die Spektralanalyse. Sie zeigt an, welche periodischen Merkmale in Zeitreihen enthalten sind. Frequenzspektren sind äußerst nützlich bei der Erkennung von verbreiteten Störungen, denn:

- Die Spektralanalyse lässt sich leicht auf Messungen von mehreren Prozesseinheiten oder Anlagenabschnitten anwenden, da Leistungsspektren nicht durch Phasenverschiebungen aufgrund von Zeitverzögerungen beeinflusst werden.
- Selbst bei rauschbehafteten Zeitreihen liefert die Spektralanalyse klare Ergebnisse, da der spektrale Inhalt der Störung nur ein schmales Frequenzband einnimmt.
- Die Spektralanalyse ist unempfindlich gegenüber fehlenden Daten und «Ausreißern», da sich die Auswirkungen solcher Effekte dünn über sämtliche Frequenzen des Spektrums verteilen.

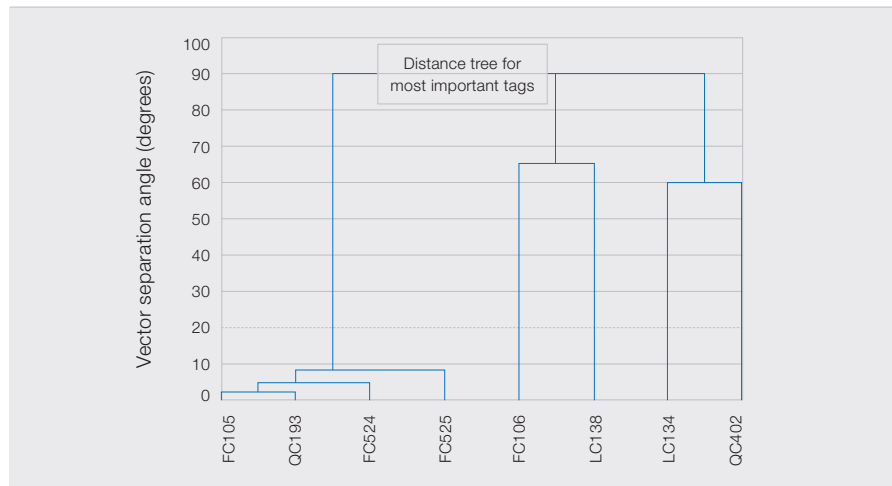
Aus der in [35](#) gezeigten High-Density-Darstellung lassen sich Messungen mit ähnlichen Spektren erkennen. Das von der automatischen Spectral-Clustering-Methode erkannte oszillierende Cluster ist rot gekennzeichnet. Schnelles und automatisches Clustering von Tags mit ähnlichen Spektren ist besonders bei umfangreichen Untersuchungen nützlich. Die im Tool implementierte Methode basiert auf einer spektralen Hauptkomponentenanalyse [2].

Eine praktische Darstellungsform der spektralen Cluster ist die eines Hierarchiebaums [36](#). Die senkrechte Achse ist ein Maß für den Unterschied zwischen den Signalspektren. Messungen mit ähnlichen Spektren erscheinen zusammen am Ende eines langen Zweiges, während Messungen mit unterschiedlichen Spektren an separaten Ästen dargestellt werden. So sind sich die fünf rot markierten Spektren in [35](#) sehr ähnlich, wohingegen die übrigen nur wenig gemeinsam haben. Neben der Erstellung der Spektren und der automatischen Erkennung von spektralen Clustern bietet das Tool fortgeschrittenen Benutzern die Möglichkeit, interaktiv mit den Einstellungen für die Analyse zu experimentieren.

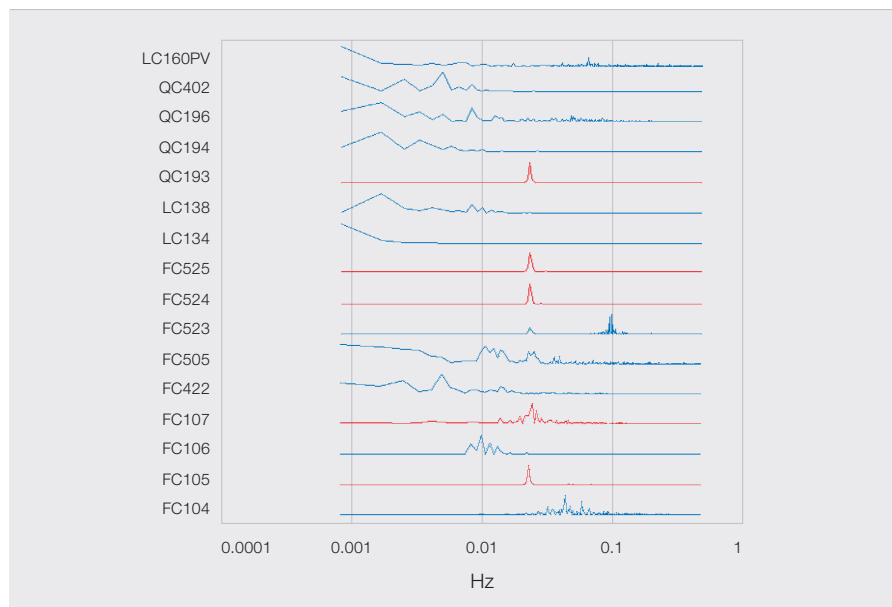
Spectral Clustering funktioniert zuverlässig für Zeitreihen mit nichtperiodischen Merkmalen, solange ihre Spektren ähnlich sind. In Öl- und Gasanlagen zum Beispiel können sich die Auswirkungen nichtperiodischer Gaseinschlüsse bekanntermaßen weit innerhalb einer Plattform ausbreiten.

### 3 High-Density-Darstellungen

a) Darstellung der wichtigsten Spektren in einem Distanzbaum



b) Leistungsspektren der Zeitreihen einer Zellstoffanlage



#### Erkennung wahrscheinlicher Ursachen für Störungscluster

Ein fehlerhaftes Regelventil mit nichtlinearen Eigenschaften (wie einer Totzone oder übermäßiger statischer Reibung [3]) ist eine der Hauptursachen für Störungen in chemischen Prozessen. Die Grenzyklen, die durch die Platzierung von Regelventilen in einer Rückkopplungsschleife verursacht werden, können sich weit ausbreiten. Aus diesem Grund hat sich das Team zunächst auf die Diagnose von nichtlinearen Ursachen konzentriert. Die Methoden, die zur Identifizierung von reibungsbehafteten Regelventilen als Problemursache entwickelt wurden, können auch zur Lokalisierung anderer nichtlinearer Fehler wie periodische Schaumbildung in Destillationskolonnen oder Gaseinschlüsse in Rohrleitungen verwendet werden.

Eine *nichtlineare Zeitreihe* [4] lässt sich nicht als Ausgang eines von weißem Rauschen getriebenen Systems beschreiben. Sie wird bestimmt durch Phasenkohärenz und – im Falle einer oszillierenden Zeitreihe – durch die Existenz von Oberschwingungen. Ein Beispiel hierfür ist ein Signal mit einem rechteckigen Kurvenverlauf. Ein Produktionsprozess fungiert typischerweise als Tiefpassfilter, d.h. Messungen aus der Nähe einer nichtlinearen Quelle haben einen höheren nichtlinearen Anteil als Messungen in einiger Entfernung. Mit anderen Worten, das rechteckige Muster glättet sich auf dem Weg durch die Anlage, und dieses Verhalten wird zur Identifizierung möglicher Problembereiche genutzt.

Eine Möglichkeit zur Erkennung von Nichtlinearitäten ist die visuelle Überprüfung der Zeitreihen und Spektren. Dieses «manuelle» Verfahren ist jedoch recht unzuverlässig, kompliziert und fehleranfällig. Das neuartige Konzept des hier beschriebenen Ansatzes ist eine Quantifizierung der Nichtlinearität, die an der Quelle der Nichtlinearität am stärksten ist. So lässt sich die Oszillation an der Wurzel des Problems von weiteren sich ausbreitenden Sekundärschwingungen unterscheiden. Periodische, aber nicht sinusförmig oszillierende Zeitreihen, wie sie für den Ausgang eines Regelkreises mit einem durch Nichtlinearität verursachten Grenzyklus typisch sind, haben einen hohen «Bewertungsindex».

Bei der Quantifizierung der Nichtlinearität wird die Vorhersagbarkeit jeder Zeitreihe mit einer Reihe konstruierter Zeitreihen mit dem gleichen Leistungsspektrum aber willkürlichen Phasen verglichen. Eine nichtlinearere Zeitreihe weist im Vergleich zu der konstruierten Zeitreihe eine hohe Vorhersagbarkeit auf, wohingegen der Unterschied bei linearen Zeitreihen geringer ausfällt [4].

Die Auswertung des Nichtlinearitätsindex in unserem Beispiel zeigt, dass es sich bei dem Tag QC193 tatsächlich um die Ursache handelt. Trotz der relativ kleinen Datenmenge ist es nicht einfach, die linearste Zeitreihe in 2 und 3 auf manuellem Weg zu erkennen.

Die beschriebene Methode ist insofern recht hilfreich, als dass sie dazu beiträgt, die zur Verfolgung falscher Ursachen aufgewendeten Mannstunden erheblich zu reduzieren. Dies gilt besonders bei großflächigen Problemen. Zwar wird eine datenbasierte, computergestützte Methode wie diese menschliches Wissen und Erfahrung nie ersetzen können, doch zweifelsohne ist sie ein wertvolles Hilfswerkzeug.

### Zusammenarbeit mit den Universitäten

Die meisten der Grundlagen waren zu Beginn des Projekts bereits erforscht und in realen Anwendungen getestet worden. Eine der größten Herausforderungen lag jedoch in der Übertragung der an den Hochschulen entwickelten Algorithmen in eine vollständige Softwareanwendung. Der Prototyp für die anlagenweite Störungsanalyse ist mittlerweile fertiggestellt und wird als Teil des Optimize<sup>IT</sup> Loop Performance Manager [5], dem ABB-Tool zur Abstimmung und Auditierung von Regelkreisen, produktisiert werden.

Die Umsetzung akademischer Forschungsergebnisse in ein kommerzielles Produkt ist eine ebenso anspruchsvolle Aufgabe wie die Umsetzung von prototypischer Software in ein stabiles, leicht verständliches Tool für verschiedene Benutzer. Zunächst gilt es die unterlagerten Algorithmen durch Auswahl robuster und optimierter Parameter anzupassen. Dann muss der Arbeitsablauf entsprechend effizient, einfach und umfassend gestaltet werden. Und schließlich sind noch umfangreiche Tests erforderlich, um die Verwendbarkeit des Tools in einer Vielzahl von Anwendungen sicherzustellen.

Dank eines multidisziplinären Projektteams lassen sich diese robusten und optimierten innovativen Methoden nun auf neue Anlagendaten anwenden. Ein Prototyp ist bereits im Betrieb. Die Methoden eignen sich zur automatischen Erkennung von Datenkomprimierung, zur automatischen Auswahl von Filtereckfrequenzen und zur Auswahl von Optimierungsparametern für die Bewertung von Nichtlinearitäten. Neue Daten werden automatisch so angepasst, dass sie bestmöglich analysiert werden können. Der Benutzer muss lediglich die Störung auswählen, für die die Ursache bestimmt werden soll.

### Blick in die Zukunft

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen ABB und dem CPSE des Imperial College/University College London wird weiter fortgesetzt, um neue Ideen zu entwickeln und in innovative Funktionalitäten umzusetzen.

Eine solche Idee befasst sich mit der Nutzung elektronischer Informationen über die Topologie von Anlagenteilen und deren Konnektivität wie Rohrleitungs- und Instrumentierungspläne (R&I-Pläne), Signal- und Funktions-

diagramme. Die Nutzung von Prozesswissen in Kombination mit der hier beschriebenen Methode zur Bewertung von Nichtlinearitäten wird besonders in Fällen mit mehreren «Verdächtigen» zu einer weiteren Verbesserung der Diagnose beitragen.

Nichtlineare Probleme wie festsitzende Ventile sind zwar recht häufig, doch es gibt noch andere Ursachen. Eine zukünftige Herausforderung liegt in der Erweiterung des Tools für die Ursachendiagnose. So kann es zum Beispiel zu Wechselwirkungen zwischen Regelkreisen kommen, wenn zwei Regler einen gemeinsamen Massen- und/oder Energiespeicher besitzen und etwa Druck- und Niveaugler um die Regulierung eines Reaktors konkurrieren. Strukturelle Störungen aufgrund koordinierter Energie- und/oder Massenströme werden angesichts zunehmend integrierter Prozesse in der Industrie immer häufiger. Entsprechende Beispiele dürften den meisten Ingenieuren bekannt sein.

Das Projektteam vom Imperial College/UCL und ABB vereint Menschen aus verschiedenen Positionen mit verschiedenen Fähigkeiten: Professoren, ein Postdoctoral Researcher, Studenten, Wissenschaftler aus der Industrie, Softwareentwickler, Produktmanager und Leute aus industriellen Geschäftsbereichen. Die Zusammenarbeit in diesem vielfältigen, von Fachwissen und hohen Erwartungen geprägten Umfeld verläuft reibungslos und effizient. Das Projekt ist ein hervorragendes Beispiel für eine fruchtbare und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen der Industrie und der akademischen Welt.

### Dr. Alexander Horch

ABB Corporate Research, Deutschland  
alexander.horch@de.abb.com

### Vidar Hegre

#### Dr. Katrine Hilmen

#### Dr. Hallgeir Melbø

ABB Corporate Research, Norwegen

### Dr. Lamia Benabbas

#### Prof. Stratos Pistikopoulos

#### Prof. Nina Thornhill

Imperial College/UCL Centre for Process Systems Engineering, Großbritannien

### Nunzio Bonavita

ABB Advanced Control Solutions, Italien

### Literaturhinweise:

- [1] Thornhill, N. F., Huang, B., and Zhang, H., 2003, Detection of multiple oscillations in control loops, *Journal of Process Control*, 13, 91–100.
- [2] Thornhill, N. F., Shah, S.L., Huang, B., and Vishnubhotla, A., 2002, Spectral principal component analysis of dynamic process data, *Control Engineering Practice*, 10, 833–846.
- [3] Shinsky, F. G., 2000, The three faces of control valves, *Control Engineering*, 47 (7) (July), p83.
- [4] Kantz, H., and Schreiber, T., 1997, *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [5] Bonavita, N., Bovero, J. C., and Martini, R., 2004, Control loops: performance and diagnostics, in: *48th ANIPLA Conference*, Milano, Italy, September 2004.