



Doctoral Thesis

Modeling and simulation for plant performability assessment with application to maintenance in the process industry

Author(s):

Fabricius, Stefan Max Otto

Publication Date:

2003

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004551167> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 15024

Modeling and Simulation for Plant Performability Assessment with Application to Maintenance in the Process Industry

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Stefan Max Otto FABRICIUS
Mechanical Engineer, ETH
born September 14th, 1970
of Ebikon, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. habil. Wolfgang Kröger, referee
Prof. Dr. Essameddin Badreddin, co-referee
Prof. Dr. Philipp Rudolf von Rohr, co-referee

Zurich, 2003

Summary

Component failures in process plants can trigger incidents or cause costly production interruptions. Minimizing the failure count or their adverse effects potentially lead to increased safety, reduced downtime and consequently higher production efficiency. This work explores options for assessing and optimizing plant performability, i.e., the degree of performance (e.g., productivity) while being dependable (safe, reliable, available). Collaboration with a partner from the process industry assures that the economic interests and pragmatic needs that arise in practise are addressed and offers an area to apply system analysis and modeling methods research results.

Plant maintenance strategy and execution play a crucial role in avoiding failures. Preventive-periodic and condition-based strategies are well known, but not suited in all circumstances. In practice, maintenance still often relies on unplanned repairs or exchange of previously failed components (a breakdown strategy). To improve maintenance strategy allocation, a pragmatic, "quick-and-sound" nine-step procedure for maintenance strategy selection was developed. It integrates already available analysis methods (such as Failure Mode and Effects Analysis), jointly considers technical, organizational and economic aspects, treats component as well as plant levels and provides decision aids in the form of flow-charts and checklists. The procedure leads to a process-oriented maintenance strategy choice—i.e., the plant structure and simple dynamic behavior are accounted for—and to a targeted use of preventive schemes where appropriate. The transparent, simple-to-use and systematic approach serves as a first attempt towards enhanced, cost-efficient maintenance with facilitated plant operation and maintenance work planning as side effects. In addition, a concept for real-time, online plant fault monitoring was developed, employing available fault detection techniques, extended by parameterizable modular and distributed schemes for fault prognosis and diagnosis. Further experimental research and development work will be necessary to realize working monitoring solutions though. A laboratory test-bed was designed and installed for this purpose.

Two aspects were seen to complicate the determination of cost-efficient maintenance migration and process plant performability improvement options. First, in practice the economic impact of foreseen maintenance innovations is often hard to estimate prior to introduction as well as to quantify thereafter (or only possible after long time delays), but nevertheless is of decisive importance. Second, plant operation—involving control actions, product changes and dynamic characteristics of the plant—strongly affects component and plant dependability. Hence, performability improvement indeed constitutes a multi-aspect, non-trivial optimization problem. To tackle it, available system analysis and modeling methods—e.g., as used in safety analysis—could be employed. However, most classical safety analysis methods are limited to static or scenario-oriented views, and tend to stand isolated in determining individual dependability attributes. Therefore, an approach to extend the capabilities of the classical analysis methods was taken, based on: i) integration of isolated methods, ii) a move from safety to performability analysis (which inherently leads to consideration of dynamics), iii) multi-formalism modeling and iv) use of computers and the simulative solution approach for quantitative analysis.

Starting with discrete-event modeling formalism, new high-level, timed, generalized stochastic Petri nets (PNs) were developed for component and system functional state representation. It is shown how PNs can be modularly implemented using an available stand-alone computer tool and be deployed for availability assessment by means of sim-

ulation. Result accuracy is proved with model versions of analytically tractable systems. Moreover, it is demonstrated how plant maintenance strategy, costs and resource scarcity can be conveniently included with further extended PNs. This was not previously possible with formalisms as e.g., Markov chains, which are limited to memoryless probability distributions and potentially suffer from combinatory state space explosion.

Discrete-event formalism is well suited to model distinct states and complex logic, but not to represent continuous variables, e.g., tank levels or flow rates. Hence, PNs are not sufficient alone to adequately represent process plants if continuous-type variables are of importance. Therefore, a concept and implementation of hybrid (discrete-event and continuous-time) dynamic performability assessment (HDPa) was developed. It comprises modeling of component failure and repair characteristics, plant topology and flow dynamics, control aspects and performance evaluation in holistic unified models. Leverage of classical analysis methods is featured by appropriate transformation of Fault Trees, enabling their inclusion in HDPa. To facilitate investigation of dynamic behavior, the principles of System Dynamics (J. Forrester) were transferred in a novel approach to problems of performability evaluation. Readily applicable, efficient computer tools for hybrid modeling not suffering from narrow focus on special-purpose applications or from proprietary inflexibility are still rare. Due to this lack, considerable effort was necessary to work out and customize new models and libraries for HDPa. Using the general-purpose, open Modelica modeling language specification and related tools proved most suitable in this respect, since they support many of the modeling principles thought necessary for handling of complex systems, e.g., object-orientation, scalability and multi-formalism. Several new Modelica libraries—among them a Petri net, a System Dynamics and a fluid flow library—were developed, which when combined allow implementation of HDPa and support re-usability of modeling know-how. With a special focus on mass-flow in process plants—and interruptions due to component failure—it is shown in analysis studies how changes to the plant configuration (e.g., increasing intermediate storage tank capacity, introducing more reliable or redundant components, relocating the bottle neck) affect overall production output. The feasibility of the modeling concept is demonstrated in particular for chemical plants with continuous, discontinuous and combined processes. It is proved that the results of process plant analysis using traditional static methods can be misleading and differ significantly from those yielded by the new dynamic ones.

Application of performability analysis and simulation can save money in a production company (not only of the process industry), avoiding potentially costly “trial-and-error” experiments with the real plant. In particular, it can help to quantify return-on-investment of maintenance or monitoring innovations, generating results that support informed, founded decision-making. The new performability models offer progress over available static models and methods, help to better understand dynamic system failure and recovery behavior, assist in locating weaknesses and identify potential for cost-efficient improvements. Classical safety analysis (e.g., as carried out for a certain critical chemical reaction in a plant segment) can be supplemented by HDPa in order to combine safety considerations with economic and dynamic operational issues.

Kurzfassung

Komponentenausfälle in verfahrenstechnischen Anlagen können zu gefährlichen Anlagezuständen und teuren Produktionsunterbrüchen führen. Die Verminderung der Anzahl der Ausfälle oder deren unerwünschter Auswirkungen ermöglichen erhöhte Sicherheit, geringere Anlagestillstandszeiten und letztlich höhere Produktionseffizienz. Diese Arbeit untersucht Wege zur Beurteilung und Optimierung der Anlegeleistungsfähigkeit ("performability"), d.h. des Performanzgrades bei einer bestimmten Anlageverlässlichkeit ("dependability"). Durch Zusammenarbeit mit einem Partner aus der Verfahrensindustrie wird der Praxisbezug sichergestellt und ein Anwendungsfeld für Forschungsergebnisse aus dem Gebiete der Systemanalyse- und Modellierungsmethodik eröffnet.

Die Art der Anlageinstandhaltung (IH) spielt eine wichtige Rolle bei der Vermeidung von Ausfällen. Die Praxis beschränkt sich heute noch oft auf rein ausfallbedingte Strategien mit zeitlich nicht planbaren Wiederherstellungsmassnahmen. Zur Verbesserung der IH-Strategiewahl wurde daher eine neue, pragmatische Methode entwickelt. Sie führt schrittweise—unterstützt durch Hilfsmittel wie Checklisten und Flussdiagramme—durch den Entscheidungsprozess, integriert dabei bereits vorhandene Analysetechniken (z.B. Failure Mode and Effects Analysis) und berücksichtigt technische, organisatorische wie auch ökonomische Aspekte. Die Vorgehensweise ermöglicht prozess-orientierte Strategiewahl—indem nebst Komponenteneigenschaften auch die Anlagestruktur und dynamisches Verhalten miteinbezogen werden—und gezielte Zuordnung von präventiven Massnahmen genau dort wo es sinnvoll ist. Die Anwendung der Methode bringt Vorteile durch ihre Transparenz, Systematik, und einfache Benutzbarkeit. Sie stellt einen ersten Versuch dar, die IH kosteneffizienter zu gestalten und gleichzeitig die technische Prozessführung und IH-Planung zu vereinfachen. Ein Konzept zur automatisierten Anlagefehlerüberwachung ergänzt diesen Ansatz. Es basiert auf vorhandenen Fehlerdetektionstechniken und wird um parametrisierbare und verteilte Schemata zur Fehlerprognose und -diagnose erweitert. Um funktionsfähige Überwachungslösungen zu realisieren, ist allerdings weitergehende experimentelle Forschung und Entwicklung nötig; ein hierzu dienendes Laborexperiment wurde entworfen und installiert.

Es hat sich gezeigt, dass zwei Aspekte die Festlegung von Massnahmen für kosteneffiziente IH-Migration und Anlage-Leistungsfähigkeitssteigerung erschweren. Erstens lassen sich in der Praxis die betriebswirtschaftlichen Folgen von vorgesehenen IH-Neuerungen oft nur schwer voraussagen und nach deren Einführung schlecht von anderen Einflüssen isolieren oder erst nach längerer Zeit quantifizieren. Zweitens beeinflusst die Art der Anlageführung (Regelung, Transienten) stark die Verlässlichkeit einzelner Komponenten wie auch der gesamten Anlage. Leistungsfähigkeitssteigerung stellt daher ein facettenreiches und nichttriviales Optimierungsproblem dar. Dessen Lösung kann durch Analyse- und Modellierungsmethoden unterstützt werden. Klassische (Sicherheits-)Analysemethoden weisen jedoch oft Einschränkungen durch statische und szenario-orientierte Sichtweisen und Fokussierung auf einzelne Verlässlichkeitsattribute auf. Deshalb wird versucht, die klassischen Methoden zu erweitern durch: i) Integration isolierter Methoden, ii) Transfer von reiner Sicherheitsanalytik zu Leistungsfähigkeitsermittlung (Dynamikberücksichtigung), iii) Multi-Formalismus Modellierung und iv) Rechneinsatz mit simulativer Auswertung.

Beginnend mit ereignisdiskretem Modellierungsformalismus wurden neue, zeitbehaftete, stochastische Petrinetze (PN) zur funktionalen Komponenten- und Systemzustandsdarstellung entwickelt. Es wird aufgezeigt, wie sie mit Hilfe eines vorhandenen, eigenständigen

digen Computerwerkzeugs modular implementiert und zur simulativen Verfügbarkeitsbestimmung eingesetzt werden können. Der Vergleich von Simulationsresultaten mit Ergebnissen aus analytisch behandelbaren Modellen belegt die Genauigkeit und Eignung des Ansatzes. Weiter ist dargelegt, wie sich IH-Strategien, Kosten und Betriebsmittelknappheit durch entsprechend erweiterte PN bequem abbilden lassen. Dies war bislang mit Formalismen wie z.B. gewöhnlichen Markovketten nicht möglich, da sie es u.a. nicht erlauben “gedächtnislose” Wahrscheinlichkeitsverteilungen einzubinden und zudem bei grösseren Modellen unter dem Problem der Zustandsraumexplosion leiden.

Ereignisdiskreter Formalismus ist gut geeignet, um klar unterscheidbare Zustände oder komplexe Logik darzustellen; kontinuierliche Variablen (z.B. Tankfüllstände oder Flussraten) sind damit jedoch inheränt schwierig abzubilden. PN sind deshalb allein nicht in der Lage, verfahrenstechnische Anlagen dann hinreichend nachzubilden, wenn auch zeitkontinuierliche Grössen von Bedeutung sind. Daher wurde ein Konzept für hybride (ereignisdiskret und zeitkontinuierlich) dynamische Leistungsfähigkeitsbewertung (HDPa) entwickelt. Es umfasst die Modellierung von Komponentenausfall- und Reparaturverhalten, Anlagestruktur und Massenflussdynamik, Regelungsaspekten und Leistungsbewertung in ganzheitlichen Modellen. Wirksame Einbindung klassischer Analysemethoden ist durch eine bestimmte Art der Fehlerbaumtransformation ermöglicht. Um Dynamikbetrachtungen zu vereinfachen, wurden zudem auf neue Art und Weise die Prinzipien von “System Dynamics” auf HDPa übertragen. Betreffend Computerwerkzeugen für hybride Modellierung besteht ein Mangel, insbesondere dann, wenn keine Einschränkungen durch enge Fokussierung auf ein spezielles Anwendungsgebiet oder durch proprietäre Ausprägung in Kauf genommen werden sollen. Erhebliche Anstrengungen waren daher nötig, um neue—für HDPa passende—Modelle und Modellbibliotheken auszuarbeiten. Es zeigte sich, dass hierfür die offene, allgemeine Modellierungssprache Modelica am besten geeignet ist, da sie viele Modellierungsprinzipien zur Handhabung komplexer Systeme unterstützt, wie Objektorientierung, Skalierbarkeit und Multiformalismus. Als Ergebnis liegen neuentwickelte Modelica-Bibliotheken vor (u.a. eine PN-, eine “System Dynamics”- und eine Fluidströmungsbibliothek), die gemeinsam das HDPa-Konzept umsetzen und die Wiederverwendbarkeit von Modellierungswissen ermöglichen. Unter besonderer Berücksichtigung des Materialflusses in verfahrenstechnischen Anlagen—und entsprechenden Unterbrüchen aufgrund von Komponentenausfällen—wird in Fallstudien aufgezeigt, wie Änderungen der Anlagekonfiguration (z.B. Vergrössern der Puffertanks, Einsetzen höherzuverlässiger und/oder redundanter Komponenten oder Verschieben der Engpässe) den Produktionsausstoss beeinflussen. Die Eignung des Modellierungskonzeptes wird dargelegt, insbesondere für die Behandlung von verfahrenstechnischen Anlagen mit kontinuierlichen, diskontinuierlichen und gemischten Prozessen. Es wird bewiesen, dass der Einsatz klassischer statischer Analysemethoden bei vielen Anlagen zu irreführenden Resultaten führt, die sich von denen aus den neuen dynamischen Ansätzen signifikant unterscheiden.

Durch die Anwendung von HDPa kann eine Produktionsfirma—nicht nur aus der Verfabriksindustrie—Geld einsparen, indem sich potentiell kostenintensive “Versuchs- und Irrtums”-Experimente mit realen Anlagen vermeiden lassen. Insbesondere dient die Methode zur Quantifizierung der Rendite von Investitionen in IH- oder Überwachungsinnovationen und ermöglicht dadurch faktenbasierte und begründete Entscheidungsfindung. Die neuen “Performability”-Modelle stellen einen Fortschritt gegenüber den klassischen statischen Modellen und Methoden dar und helfen dabei, dynamisches Verhalten während Systemausfällen besser zu verstehen. Klassische Sicherheitsanalytik (z.B. für eine bestimmte kritische chemische Reaktion ausgeführt) kann durch HDPa ergänzt werden, um Sicherheitsbetrachtungen mit ökonomischen und operationellen Aspekten zu verbinden.