



Doctoral Thesis

## Optimal control of switched-input and uncertain systems

**Author(s):**

Nolde, Kristian

**Publication Date:**

2008

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005680020> →

**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. 17886

# Optimal Control of Switched-input and Uncertain Systems

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
KRISTIAN NOLDE  
Dipl.-Ing, TU Hamburg-Harburg  
born March 1, 1977  
citizen of Hamburg, Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Manfred Morari, examiner  
Prof. Dr. Rüdiger Schultz, co-examiner

2008

©2008 Kristian Nolde  
All Rights reserved



# Optimal Control of Switched-input and Uncertain Systems

---

by Kristian Nölde

# Abstract

The thesis is concerned with three application projects that deal with optimal control of switched-input and uncertain systems. In switched-input systems some or all of the system inputs take binary values. In uncertain systems the dynamics or the output are affected by random parameters. In the thesis it is shown how to effectively compute optimal control inputs for switched-input and uncertain systems.

In order to show this, an application-driven approach is taken. In this approach optimal controllers for switched-input and/or uncertain systems from different applications are designed. The projects are presented in three parts of the thesis:

In the first part the development of an optimal controller for thermal printheads is presented. A first-order linear system with a non-linear output mapping containing stochastic noise is proposed as a model for the printing dynamics. The model parameters are identified and an optimal control problem is formulated to determine the printhead input. The control algorithm is successfully tested on a standard thermal printer. A sensitivity analysis is performed using simulations and experiments in order to analyze the printing quality on varying setups with different printheads, printing media and ribbons. A tuning strategy is derived to adapt to changing setups without having to recompute the optimization problem. Robustness of the resulting controller is shown in experiments. Comparing the proposed controller to a current control implementation shows a significant quality gain in barcode readability (ISO/IEC 15416).

The second part presents two load tracking scheduling problem. The first problem deals with the scheduling of employees so that the employee presence tracks a pre-specified demand curve. Requirements such as minimum employee presence or constraints on the shift length have to be respected. The second problem is concerned with the energy-cost optimal scheduling of a steel plant. In the steel plant the total electrical load generated by all machines must track a pre-specified energy curve as close as possible, while respecting constraints that arise from production. For both problems a comparison of discrete-time and continuous-time models of the scheduling problems is made. The results show that in the workforce planning a solution is computed faster for the discrete-time model. In the steel plant scheduling the continuous-time model is superior. It is argued that discrete-time models are

superior for problems where only few possible switching time points exist, i. e. time points when tasks can start or end. Continuous-time formulations do not seem restricted by the number of possible time points, but their limitation appears to be in the number of possible arrangements of the tasks that are to be scheduled. Also, we show an example for the continuous-time problem where small parameter changes lead to large changes in the computation time.

The third part is concerned with the medium term control of a hydro-thermal system. In this project a multistage stochastic programming formulation is presented for monthly production planning of the system. Stochasticity from variations in water reservoir inflows and fluctuations in demand of electric energy are considered explicitly. The problem can be solved efficiently via Nested Benders Decomposition. The solution is implemented in a model predictive control setup, and performance of this control technique is demonstrated in simulations. Tuning parameters such as prediction horizon and shape of the stochastic programming tree are identified and their effects are analyzed.

In the conclusion of the thesis the results of the different projects are related to each other. Three different approaches that were successful in computing input signals for switched-input systems are summarized. The conclusion also combines the different concepts that were used for treating uncertainty in the systems. Observations on the computational complexity of the application projects are given.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden drei Anwendungsprojekte behandelt, die sich mit der optimalen Steuerung von Systemen mit geschalteten Eingängen und Unsicherheiten beschäftigen. In Systemen mit geschalteten Eingängen besitzen einige oder alle der Systemeingänge Binärwerte. In unsicheren Systemen ist die Systemdynamik oder das Ausgangssignal durch zufällige Parameter beeinflusst. In der Arbeit wird gezeigt, wie optimale Steuersignale für Systeme mit geschalteten Eingängen und Unsicherheiten effizient berechnet werden können.

Die Arbeit verfolgt dazu einen anwendungsorientierten Ansatz. In diesem Ansatz wird in mehreren Anwendungsprojekten für Systeme mit geschalteten Eingängen und/oder Unsicherheit eine optimale Steuerung oder Regelung entworfen. Die Projekte sind auf drei Abschnitte der Arbeit aufgeteilt:

Im ersten Abschnitt wird die Entwicklung einer optimalen Steuerung für thermische Druckköpfe vorgestellt. Die Temperaturdynamik im Druckkopf wird dazu mit einem linearen Modell erster Ordnung approximiert. Die Druckausgabe wird als nichtlineare Funktion der Temperatur angegeben. Die Druckausgabe ist mit einer stochastischen Unsicherheit behaftet. Es werden die Modellparameter identifiziert und ein Optimalregelungsproblem wird aufgestellt. Mit Hilfe des Optimalreglers werden die Eingangssignale für den Druckkopf bestimmt. Der erfolgreiche Test des Optimalreglers auf einem typischen Thermodrucker wird gezeigt. Um die Änderungen der Druckqualität in unterschiedlichen Konfigurationen, z.B. variierende Druckköpfe, Druck-Medien und Farbbänder, zu analysieren wird eine Sensitivitätsanalyse mittels Experimenten und Simulationen durchgeführt. Aus deren Ergebnissen wird eine Tuning-Strategie abgeleitet. Die Tuning Strategie erlaubt die Anpassung des Druckers an neue Konfigurationen, ohne dass ein neues Optimierungsproblem gelöst werden muss. Robustheit des resultierenden Reglers wird in Experimenten gezeigt. Im Vergleich des vorgeschlagenen Reglers zu einer bestehenden Implementierung zeigt sich ein signifikanter Qualitätsgewinn beim Erkennen gedruckter Barcodes (ISO / IEC 15416).

Der zweite Abschnitt der Dissertation beschäftigt sich mit zwei Bedarfsfolgeplanungsproblemen. Das erste Problem befasst sich mit der bedarfsgerechten Einsatzplanung von Mitarbeitern. Deren Einsätze sollen so geplant werden, dass die

Mitarbeiterpräsenz einer im Voraus festgelegten Nachfrage-Kurve folgt. Anforderungen wie eine Minimalpräsenz von Mitarbeitern oder Beschränkungen von deren Schichtlänge müssen in der Planung berücksichtigt werden. Das zweite Problem betrifft die energiekostenoptimale Produktionsplanung in einem Stahlwerk. In dem Stahlwerk soll dazu die von alle Maschinen zusammen generierte elektrische Last einer im Voraus festgelegten Lastkurve folgen. Die Einsatzpläne der Maschinen müssen dabei alle Nebenbedingungen in der Produktion berücksichtigen. Die Summe ihrer Energieverbräuche soll weder eine Über- noch eine Unterdeckung der Vorgabe ergeben. Für einen Vergleich werden für die beiden Planungsprobleme jeweils mit einem auf kontinuierlicher Zeit und einem auf Zeitdiskretisierung basierendes Planungsmodell beschrieben. Für beide Probleme werden das zeitkontinuierliche und das zeitdiskrete Modell implementiert und getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Fall des Arbeitereinsatzplanungsproblem mit einem zeitdiskretem Modell die optimale Planung schneller errechnen lässt. Im Planungsproblem für das Stahlwerk ist das zeitkontinuierliche Modell in der Berechnung eines Produktionsplans überlegen. Es wird argumentiert, dass zeitdiskrete Modelle für Probleme überlegen sind, die nur wenige mögliche Schaltzeitpunkte, sprich Zeitpunkte an denen Aufgaben oder Schichten beginnen und enden, beinhalten. Formulierungen mit kontinuierlichen Zeitvariablen besitzen diese Einschränkung nicht, allerdings werden diese durch die Anzahl der Anordnungen von Aufgaben eingeschränkt. Wird diese Anzahl von Anordnungen zu gross, dann lassen sich die Probleme nicht mehr in angemessener Zeit lösen.

Der dritte Abschnitt befasst sich mit der Mittelfristplanung eines Hydrothermischen Kraftwerkssystem. In ihm wird eine Multistage-Stochastic-Programming Formulierung zur Lösung eines monatlichen Produktionsplanungsproblems für ein hydrothermisches Kraftwerkssystem vorgestellt. Diese Modellierung beinhaltet explizit die stochastischen Variationen der Zuflüsse zu den Wasserspeichern, sowie die Schwankungen des elektrischen Energiebedarfs. Das Problem wird unter Anwendung der Nested Benders Decomposition effizient gelöst. Simulationen des geschlossenen Regelkreises werden vorgestellt, um die Funktionsweise des Reglers zu zeigen. Die Lösungen des Problems für mittlere Zeithorizonte können als Eingangssignale für Regler mit kurzen Zeithorizonten genutzt werden. Somit wird ein Aufbrauchen des gespeicherten Wassers durch zu kurze Planungshorizonte vermieden.

In den Schlussfolgerungen der Dissertation werden die Ergebnisse der verschiedenen Projekte zusammengefasst. Drei in den Anwendungsprojekten erfolgreiche Ansätze zur Berechnung der Signale für eingangsgeschaltete Systeme werden vorgestellt. Desweiteren werden die in der Arbeit genutzten Konzepte zur Steuerungs- und Reglerauslegung für Systeme unter Unsicherheit vorgestellt. Es werden Beobacht-



ungen über die Rechenkomplexität der Projekte zusammengefasst.