

20. Juli 1994

M. Steiner

Robust Control of an Industrial High-Purity Distillation Column

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
HANS-EUGEN MUSCH

Dipl. Chem.-Ing. ETH
born June 19, 1965
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. M. Steiner, examiner
Prof. Dr. D. W. T. Rippin, co-examiner

1994

Abstract

It is well known that high-purity distillation columns are difficult to control due to their ill-conditioned and strongly nonlinear behavior. Usually distillation columns are operated within a wide range of feed compositions and flow rates, which makes a control design even more difficult. Nevertheless, a tight control of both product compositions is necessary to guarantee the smallest possible energy consumption, as well as high and uniform product qualities.

This thesis discusses a new approach for the dual composition control design, which takes the entire operating range of a distillation column into account. With the example of an industrial binary distillation column, a structured uncertainty model is developed which describes quite well the nonlinear column dynamics with several simultaneous model uncertainties. This uncertainty model forms the basis for feedback controller designs by μ -synthesis or μ -optimization. The resulting controllers are distinguished by a high controller performance and high robustness *guaranteed for the entire operating range*. This method enables the synthesis of state-space controllers as well as the μ -optimal tuning of advanced PID control structures.

The already satisfactory compensation of feed flow disturbances can be improved even further by use of feedforward control. Even for the design of the feedforward controllers the basic ideas of the feedback controller design can be employed. A simultaneous feedforward controller design for two column models representing the extreme column loads yields outstanding results. Similar to the feedback controller design, a design of state-space controllers by H_{∞} -minimization or an optimal tuning of simple feedforward control structures by parameter optimization is possible.

Control engineers working in an industrial environment are conscious of the high effort needed for the implementation of state-space control-

lers in a distributed control system. Therefore a controller design based on PID or advanced PID control structures is of high relevance for the industrial practice. Usually, the performance of these PID control structures is expected to lag significantly behind the performance of high-order state-space controllers. However, comparing the performances of the state-space controllers with those of the advanced PID controllers, merely slight advantages of the state-space controllers are detected. This surprising result, achieved with an *unconventional* tuning of the PID control structures, allows the simple implementation of advanced PID control structures in a decentralized control system without a significant loss of controller performance.

The good robustness properties and the high performance of the control schemes are confirmed by the implementation of an advanced PID control scheme on a real industrial distillation column. An estimation of the economic benefits made by this project much more than justifies the effort expended.

Kurzfassung

Bekanntermaßen sind Rektifikationskolonnen mit hohen Produktreinheiten wegen ihres schlecht konditionierten und stark nichtlinearen Verhaltens schwierig zu regeln. Häufig werden sie in einem weiten Bereich unterschiedlicher Zulaufkonzentrationen und -mengen betrieben, was den Entwurf von Regelungen zusätzlich erschwert. Dennoch ist eine gute Regelung beider Produktkonzentrationen notwendig, um einerseits einen möglichst kleinen Energieverbrauch und andererseits hohe und einheitliche Produktqualitäten sicherzustellen.

Diese Arbeit beschreibt einen neuen Ansatz für den Entwurf von Konzentrationsregelungen, der den gesamten Arbeitsbereich einer Rektifikationskolonne berücksichtigt. Am Beispiel einer industriellen binären Rektifikationskolonne wird ein strukturiertes Unsicherheitsmodell entwickelt, welches das nichtlineare dynamische Verhalten der Rektifikationskolonne durch mehrere Modell-Unsicherheiten gut beschreibt. Dieses Unsicherheitsmodell bildet die Basis für den Entwurf von Reglern mittels μ -Synthese oder μ -Optimierung. Die resultierenden Regler zeichnen sich durch eine – über den gesamten Betriebsbereich garantierte – hohe Regelqualität bei sehr grosser Robustheit aus. Dieses Vorgehen erlaubt sowohl den Entwurf von Zustandsregelungen als auch die Berechnung μ -optimaler Einstellungen für erweiterte PID-Regelstrukturen.

Die bereits zufriedenstellende Unterdrückung von Störungen der Zulaufmenge wird durch den Einsatz einer Störgrössenaufschaltung noch verbessert. Auch für ihren Entwurf können ähnliche Konzepte verwendet werden. Ein Entwurf von Störgrössenaufschaltungen, bei dem gleichzeitig zwei Modelle der Rektifikationskolonne berücksichtigt werden, welche die extremen Kolonnenbelastungen wiedergeben, führt zu hervorragenden Ergebnissen. Vergleichbar mit dem Regelungsentwurf können sowohl Störgrössenaufschaltungen mit der Struktur

von Zustandsregelungen (durch Minimierung der H_{∞} -Norm) als auch Störgrößenaufschaltungen mit einfacher Struktur (durch Parameteroptimierung im Zeitbereich) berechnet werden.

In der industriellen Praxis tätige Regelungstechniker sind sich der Schwierigkeiten, die mit der Realisierung von Zustandsregelungen auf dezentralen Prozeßleitsystemen verbunden sind, sicherlich bewußt. Daher ist der Regelungsentwurf auf der Grundlage von PID- oder erweiterten PID-Regelstrukturen von hoher praktischer Relevanz. Meist bleibt die mit solchen Strukturen erzielbare Regelgüte hinter der von Zustandsregelungen deutlich zurück. In dieser Arbeit werden die entworfenen Zustandsregelungen und die optimal eingestellten fortgeschrittenen PID-Regelstrukturen verglichen. Dabei zeigt sich, daß auch mit einfachen Regelstrukturen, die entsprechenden *unkonventionellen* Regler-Einstellungen vorausgesetzt, eine Regelqualität erzielt wird, die der von Zustandsregelungen nahekommt. Dieses überraschende Resultat erlaubt die einfache Implementierung von erweiterten PID-Regelstrukturen in dezentralen Prozeßleitsystemen ohne wesentlichen Verlust an Regelgüte.

Die Erprobung eines Regelungsentwurfs auf der Grundlage fortgeschrittener PID-Strukturen an der industriellen Rektifikationskolonne bestätigt die große Robustheit und die hohe Regelgüte in der Praxis. Dabei zeigt eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit, daß der bei einem solchen Projekt notwendige Aufwand mehr als gerechtfertigt ist.