



Doctoral Thesis

## Ein Beitrag zur Analyse, Synthese und Implementierung robuster Regelkreise

**Author(s):**

Peretti, Guillermo Jose

**Publication Date:**

1994

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000945028> →

**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 Nr. 10442

**EIN BEITRAG ZUR ANALYSE, SYNTHESE UND  
IMPLEMENTIERUNG ROBUSTER REGELKREISE**

ABHANDLUNG  
Zur Erlangung des Titels  
Doktor der Technischen Wissenschaften

der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von  
GUILLERMO JOSE PERETTI

Dipl. El.-Ing. ITBA  
geboren am 7. Januar 1961  
von Argentinien

Angenommen auf Antrag von:  
Prof. Dr. M. Mansour, Referent  
Prof. Dr. D. Bonvin, Korreferent  
Dr. F. Kraus, Korreferent

1994

## KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer theoretischen und praxisbezogenen Methode zum Entwurf von robusten diskreten Kompensatoren für SISO-Systeme. Ausgangspunkt ist eine Familie von linearen Modellen der Regelstrecke mit Parametervektoren innerhalb eines ellipsoidalen Gebietes.

Mathematische Modelle sind vereinfachte Beschreibungen eines realen Systems und können dessen Verhalten nur mit einer gewissen Unsicherheit approximieren. Lineare Modelle werden wegen seiner Einfachheit oft in der Reglersynthese eingesetzt. Ihre Gültigkeit beschränkt sich aber meistens auf einer reduzierten Umgebung des Arbeitspunktes. Grössere Gültigkeitsbereiche erreicht man durch die Verwendung einer *Familie* linearer Modelle. Eine Familie linearer Modelle mit Parametervektoren innerhalb eines ellipsoidalen Gebietes eignet sich für die Beschreibung von unsicher identifizierten Systemen sowie von Systemen dessen Parameter nicht genau bekannt oder langsam variieren. Die Identifikation bietet Werkzeuge an, mit deren Hilfe parametrische Modelle linearer Systeme und deren Unsicherheit geschätzt werden können. Die Entwurfsmethode sollte diese Information benutzen, um bessere Regler zu liefern.

In dieser Arbeit wird ein nichtkonservatives Robustheitsmass für die  $D$ -Stabilität von linearen, diskreten und unsicheren SISO Regelkreisen vorgestellt: der *Dehnungsfaktor*  $\xi_D$ . Der Dehnungsfaktor drückt aus, um wieviel sich die parametrische Modellunsicherheit ausdehnen kann, ohne, dass die Pole des geschlossenen unsicheren Systems ein vorgegebenes  $D$ -Stabilitätsgebiet verlassen. Der Dehnungsfaktor ist das globale Minimum der kritischen Dehnung, eine reelle Funktion der komplexen Variablen  $z$ , welche Singularitäten und mehrere Minima aufweist. Zur schnellen Berechnung des globalen Minimums ohne Durchlauf des Randes des  $D$ -Stabilitätsgebietes werden zwei Methoden vorgeschlagen.

In dieser Arbeit wird die Synthese robuster Kompensatoren als ein Optimierungsproblem betrachtet, bei welchem der Dehnungsfaktor  $\xi_D$  für ein vorgegebenes  $D$ -Stabilitätsgebiet maximiert wird. Diese Synthesemethode hat die Tendenz, Kompensatoren zu generieren, deren Güte sehr empfindlich bezüglich Ungenauigkeiten in den Kompensatoroeffizienten ist. Es werden zwei Wege vorgeschlagen um den Robustheitsverlust, der durch Ungenauigkeiten in den Kompensator entstehen kann, zu reduzieren, sowie eine unerwünschte Annäherung (bzw. Kürzung) der Pole und Nullstellen im Kompensator zu vermeiden. Da der Dehnungsfaktor keine glatte Funktion der Kompensatoroeffizienten ist, eignen sich die bekannten Gradientenverfahren nicht

für die numerische Optimierung. Es müssen Optimierungsmethoden eingesetzt werden, die in der Lage sind, das lokale Maximum einer nichtdifferenzierbaren Funktion zu finden. In den Beispielen wurde ein heuristisches Verfahren benutzt, das jeweils eine zulässige Richtung sucht und in dieser Richtung eine "line search"-Optimierung durchführt. Die Möglichkeiten der Synthesemethode werden anhand verschiedener Beispiele gezeigt.

Ein weiterer Teil der Arbeit befasst sich mit der Einbettung der Reglerimplementierung im Reglerentwurfsvorgang. Vorgestellt wird CTRL-Lab, ein Werkzeug zur schnellen, DSP-basierenden Implementierung von Regelalgorithmen in MATLAB-Syntax. CTRL-Lab wird wie eine MATLAB-Toolbox bedient und unterstützt drei Implementierungsmodi: interpretierter, kompilierter und mex-Modus. Die Möglichkeiten des Werkzeugs werden anhand von Beispielen illustriert.

Die Anwendbarkeit der Analyse-, Synthese- und Implementierungswerkzeuge wird anhand eines konkreten regelungstechnischen Problems gezeigt: der komplette Entwurfsvorgang eines Bandzugs- und Geschwindigkeitsreglers für einen Tonbandgerätprototyp.

## ABSTRACT

This thesis deals with the development of a theory-based and practice-relevant method for the synthesis of robust compensators for SISO systems, using a family of linear models with parameter vectors inside an ellipsoidal region.

Mathematical models give only simplified descriptions of a real system and can approximate it only with limited accuracy. Due to their simplicity, linear models are frequently used for control system design. Such models are valid only in small neighborhoods of the operating point, where the system model has been linearized. A larger range of validity can be achieved by using a *family* of linear models. A family of linear models with parameters inside an ellipsoidal region is a common description of systems with an imprecisely known or slowly varying operating point. System identification offers methods for the estimation of parametric models of linear systems, together with the corresponding uncertainty. This uncertainty frequently also takes the form of an ellipsoidal region in the model's parameter space. All this information can be utilized in the controller design algorithm in order to improve its quality.

The thesis proposes a non-conservative robustness measure: The *expansion factor*, which is suitable not only for the analysis of robust  $D$ -stability but also for the synthesis of robust pole-placement controllers. The expansion factor indicates how much the uncertainty ellipsoid can be expanded without losing stability with respect to a given  $D$ -region. The expansion factor is the global minimum of the critical expansion, which is a function of the complex variable  $z$ , possibly having several local minima and singularities. Two methods are proposed for the fast computation of the global minimum without the necessity of scanning the edge of the  $D$ -region. The applicability of an analysis method using the notion of the expansion factor is shown in several examples.

A numerical optimisation method is proposed for the synthesis of robust compensators. By heuristically searching the controller's parameter space, the method maximizes the *expansion factor related to the  $D$ -region*. This synthesis method has the tendency to find compensators whose quality is very sensitive with respect to the compensator parameters. Two solutions are proposed in order to reduce the loss of Robustness due to inaccuracy of the controller coefficients, and to avoid the undesired proximity of poles and zeros of the compensator. Due to *non-smoothness of the expansion factor*, gradient optimisation methods cannot be applied. The proposed heuristic method searches for an admissible direction and performs optimisation along this direction.

The advantages of the synthesis method are demonstrated in various examples.

A further part of the thesis deals with embedding the controller implementation in the controller design process. This can be done using CTRL-Lab, a tool for the fast implementation of DSP-based control algorithms programmed in Matlab-Syntax. CTRL-Lab can be used as a usual Matlab Toolbox and supports three operation modes: interpreted, compiled and mex-mode. The flexibility of the tool is illustrated in several examples.

The applicability of the analysis, design and implementation tools is demonstrated on a practical example: a complete design-implementation cycle for controllers of band tension and band speed in a prototype tape-recorder.