

PARADISE: Ein Werkzeug für Entwurf und Analyse robuster Regelungssysteme im Parameterraum

Michael Muhler und Dirk Odenthal

Institut für Robotik und Mechatronik
DLR Oberpfaffenhofen, Postfach 1116, 82230 Wessling,
Tel. +49/(0)8153-28-1181
e-mail: Michael.Muhler@dlr.de, Dirk.Odenthal@dlr.de

Kurzfassung: Das Parameterraumverfahren erlaubt die Berücksichtigung einer Vielzahl von Spezifikationen aus dem Eigenwert- und Frequenzbereich bei der Analyse und Synthese robuster Regelungssysteme. Die für die Umsetzung dieses Verfahrens notwendigen symbolischen und numerischen Berechnungen sind relativ aufwendig und stark problembezogen. Mit der Matlab-Toolbox PARADISE (Parametric Robustness Analysis and Design Interactive Software Environment) wurde deswegen beim DLR ein Werkzeug entwickelt, welches die notwendigen Methoden effizient zur Verfügung stellt. Die Interaktion des Benutzers mit der Toolbox erfolgt über eine grafische Bedienoberfläche, die von der Modelleingabe in Simulink über die Eingabe von Spezifikationen in entsprechenden Editoren bis hin zur Synthese und Analyse des Gesamtsystems den Entwurfsingenieur unterstützt. Von einem parametrischen Modell oder einer Multimodellfamilie ausgehend, werden dabei die Reglerstruktur und Spezifikationen für die Regelgüte und Robustheit des Systems festgelegt. Die Ausgabe der im Hintergrund berechneten Ergebnisse erfolgt grafisch und ein robuster Regler kann in einem iterativen Prozeß entworfen werden. Die Toolbox-Architektur verbunden mit dem Parameterraumverfahren führt zu einem Reglerentwurf, der nicht nur klassische regelungstechnische Anforderungen, wie Stabilität, Regelgüte und Robustheit, berücksichtigt, sondern der auch einfach und transparent durchführbar ist. PARADISE hat sich bereits in einer Vielzahl von Anwendungen im Bereich der Flug- und Fahrdynamikregelung bewährt. Als Beispiel wird der Entwurf robuster PID-Regler vorgestellt.

Schlüsselworte: Parameterraumverfahren, CACSD, Robuste Regelung

1 EINLEITUNG

Die Analyse und Synthese linearer Regelungssysteme ist relativ einfach, wenn sämtliche Streckenparameter bekannt sind und über den gesamten Betriebsbereich als konstant angenommen werden können. Die meisten realen Systeme unterscheiden sich jedoch vom mathematischen Modell, weswegen man beim robusten Reglerentwurf nicht nur ein nominelles Entwurfsmodell benutzt, sondern von einer ganzen Klasse von Streckenmodellen ausgeht. Von den Verfahren der parametrischen robusten Regelungstechnik wird vorzugsweise ein analytisches Modell der Regelstrecke verwendet [1]. Die Modellgleichungen werden dabei zunächst aus physikalischen Überlegungen hergeleitet und linearisiert und die eingehenden Streckenparameter $\mathbf{q}=[q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ werden entweder gemessen bzw. geschätzt oder als variierend bzw. unsicher innerhalb zulässiger Intervalle angenommen, d.h. $q_i \in [q_i^-; q_i^+]$, $i=1, \dots, n$. Das entstehende System wird in Zustandsform

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{q})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}(\mathbf{q})\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{u}(t)\end{aligned}\tag{1}$$

bzw. in Übertragungsform

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}(s, \mathbf{q})\mathbf{u}(s) \quad (2)$$

angegeben und unter anderem als „parametrisches lineares zeitinvariantes (LTI-) System“ bezeichnet. Steht eine kontinuierliche Beschreibung der Streckenfamilie entsprechend Gl. (1) oder (2) nicht zur Verfügung kann die Menge der zulässigen Parametervektoren $\mathbf{q} \in Q$, wobei $Q \subseteq \mathbb{R}^n$ den Betriebsbereich bezeichnet, durch eine endliche Anzahl von Betriebspunkten $\mathbf{q}^{(i)} \in Q$ repräsentiert werden. Die Darstellung der entsprechenden Multimodellfamilie kann wiederum in Zustandsform

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}^{(j)}\mathbf{x} + \mathbf{B}^{(j)}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}^{(j)}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}^{(j)}\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

bzw. in Übertragungsform

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}^{(j)}(s)\mathbf{u}(s) \quad (4)$$

erfolgen.

Beim Reglerentwurf wird beispielsweise ausgehend von der Ausgangsrückführung

$$\mathbf{u}(s) = \mathbf{C}(s, \mathbf{k})(\mathbf{w}(s) - \mathbf{y}(s)) \quad (5)$$

die Reglerstruktur $\mathbf{C}(s, \mathbf{k})$ vorgegeben und die freien Reglerparameter werden im Reglervektor \mathbf{k} zusammengefaßt. Die resultierenden Systemgleichungen des geschlossenen Regelkreises hängen dann sowohl von unsicheren bzw. variierenden Streckenparametern \mathbf{q} als auch von freien Reglerparametern \mathbf{k} ab. *Abbildung 1* zeigt hierzu den Standardregelkreis mit parametrischem Streckenmodell $\mathbf{G}(s, \mathbf{q})$ und Regler $\mathbf{C}(s, \mathbf{k})$.

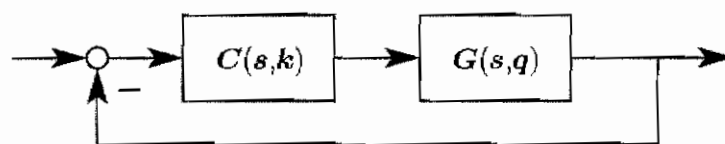


Abbildung 1: Standardregelkreis mit Einheitsrückführung.

Für die durch Gln. (1)-(6) beschriebene Systemklasse hat sich das Parameterraumverfahren [1] in einer Vielzahl von Anwendungen im Bereich des Entwurfs und der Analyse robuster Regelungssysteme bewährt. Die beiden im Zusammenhang mit diesem Verfahren auftretenden grundlegenden Frage- bzw. Aufgabenstellungen lauten [2]:

1. Erfüllt der geschlossene Regelkreis für einen vorgegebenen Regler mit festem $\mathbf{k}=\mathbf{k}^*$ sämtliche Entwurfsanforderungen in robuster Weise, d. h. für alle $\mathbf{q} \in Q$?
2. Bestimme einen Regler $\mathbf{k}=\mathbf{k}^*$, so daß sämtliche Entwurfsanforderungen in robuster Weise erfüllt werden.

Aktueller Stand der Toolbox

Bereits Mitte der 90er Jahre wurde eine erste Version von PARADISE vorgestellt, die die Methoden der parametrischen robusten Regelungstechnik als Matlab-Toolbox implementiert [10]. Hierbei wurde das Konzept einer benutzerfreundlichen Toolbox mit grafischen Schnittstellen und die Kombination von symbolischen und numerischen Algorithmen begründet. Während in der ersten Version symbolische Berechnungen mit Hilfe von Mathematica durchgeführt wurden, steht mittlerweile der gesamte symbolische Code in Maple zur Verfügung. Dieser kann mit der in Matlab verfügbaren Extended Symbolic Toolbox plattformunabhängig verwendet werden. Eine externe Schnittstelle zu Mathematica entfällt damit.

Daneben wurde der Programmcode modularisiert. Um die Rechenzeit zu minimieren wurden effiziente Algorithmen implementiert. Hinzugekommen sind Schnittstellen, um Ergebnisse von PARADISE mit anderen Werkzeugen weiterverwenden zu können. Bei der Bestimmung von relevanten Parametergebieten kann der Benutzer durch die automatische Ermittlung aktiver Berandungen unterstützt werden.

Im nächsten Abschnitt wird das Parameterraumverfahren und relevante Spezifikationen vorgestellt. Bisher ist Paradise noch auf die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Eigenwertkriterien beschränkt, eine Erweiterung auf frequenzabhängige Spezifikationen (siehe Abschnitt 2.2 und 2.3) ist durch die Modularisierung der Toolbox einfach möglich.

2 DAS PARAMETERRAUMVERFAHREN

Den beiden Aufgabenstellungen bei Analyse und Entwurf entsprechend, werden beim Parameterraumverfahren Entwurfsspezifikationen bezüglich Stabilität, Regelgüte und Robustheit in die Ebene zweier Systemparameter (Strecken- und/oder Reglerparameter), d. h. in einen zweidimensionalen Unterraum des Parameterraums, abgebildet. Aus mathematischer Sicht ist es dabei nicht notwendig, zwischen Analyse und Synthese zu unterscheiden; die Synthese kann als Analyse einer vorgegebenen Reglerstruktur aufgefaßt werden. Regler- und Streckenparameter werden entsprechend im Vektor der Systemparameter zusammengefasst, d. h. $\mathbf{t} = [\mathbf{q}^T \ \mathbf{k}^T]^T$.

2.1 Eigenwertabhängige Entwurfskriterien (Γ -Stabilität)

Anforderungen u. a. an Stabilität, Einschwingzeit, Dämpfung und Bandbreitenbegrenzung des geschlossenen Regelkreises können direkt als Pol-Wunschgebiete, so genannte Γ - Gebiete in der Eigenwertebene formuliert werden. Die Berandung $\partial\Gamma$ des Γ -Gebietes wird idealerweise durch zusammengesetzte Kegelschnitte also durch Kreise, Ellipsen, Hyperbeln und Geraden beschrieben [2]. Hierzu zeigt Abbildung 2 einige typische Γ -stabile Gebiete.

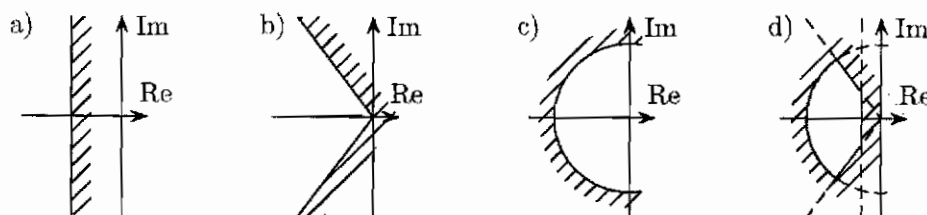


Abbildung 2: Typische Γ -stabile Gebiete.

- Parallele zur imaginären Achse begrenzt maximale Einschwingzeit,
- Dämpfungsgerechten bestimmen die Mindestdämpfung,
- Kreis begrenzt maximale natürliche Frequenz und
- die Schnittmenge der drei Gebiete erfüllt die Bedingungen a)-c) simultan.

Die Berandung $\partial\Gamma$ des Γ -Gebietes wird parametrisiert

$$\partial\Gamma: s(\alpha) = \sigma(\alpha) + j\omega(\alpha) \quad \text{für} \quad \alpha \in [\alpha^-, \alpha^+], \quad (6)$$

wobei α als verallgemeinerte Frequenz bezeichnet wird.

Grundlage der Abbildung eigenwertabhängiger Entwurfskriterien in die Ebene zweier Systemparameter ist das charakteristische Polynom des geschlossenen Regelkreises

$$p(s, \mathbf{t}) := \text{Num} | \mathbf{I} + \mathbf{C}(s, \mathbf{k})\mathbf{G}(s, \mathbf{q}) |, \quad \mathbf{t} = [\mathbf{q}^T \ \mathbf{k}^T]^T. \quad (7)$$

Um die Abbildungsgleichungen nun zu berechnen, wird (6) in (7) eingesetzt und alle Parameter bis auf die Parameter der Abbildungsebene t_1, t_2 durch numerische Werte ersetzt. Für einen Punkt ($\alpha = \alpha^*$) auf dem imaginären Teil der Berandung $\partial\Gamma$ hat das charakteristische Polynom damit eine Nullstelle, wenn die beiden Gleichungen

$$\begin{aligned} p_1(\alpha, t_1, t_2) &:= \operatorname{Re} p(s(\alpha), t_1, t_2) = 0 \\ p_2(\alpha, t_1, t_2) &:= \operatorname{Im} p(s(\alpha), t_1, t_2) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

gleichzeitig erfüllt sind (komplexe Grenze). Die reelle Grenze erhält man nach Einsetzen des rein reellen Teils der Berandung $s(\alpha) = \sigma(\alpha)$ in das charakteristische Polynom (siehe Abbildung 3). Die abgebildeten reellen und komplexen Grenzen rechts in Abbildung 3 unterteilen die Ebene der Parameter (t_1, t_2) in eine endliche Anzahl zusammenhängender Teilgebiete. Aus jedem dieser Teilgebiete wird ein Punkt ausgewählt und auf Γ -Stabilität hin überprüft. Ist der Punkt stabil, so ist nach dem Grenzüberschreitungssatz von Frazer und Duncan [2] das gesamte Γ -Teilgebiet stabil. In Abbildung 3 ist das Γ -stabile Gebiet mit Q_Γ bezeichnet.

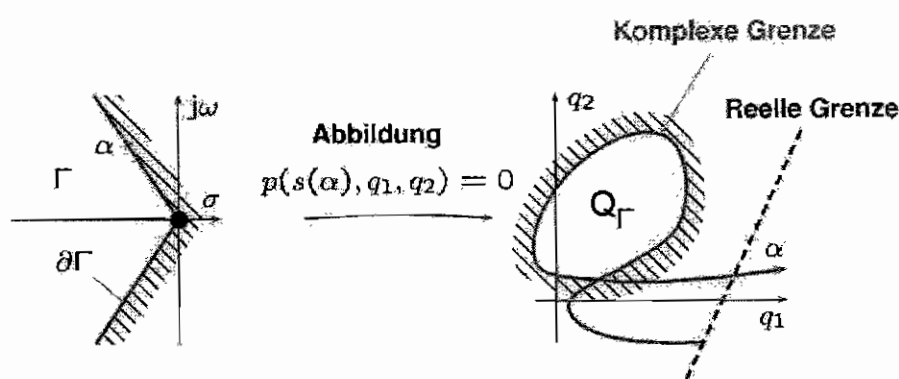


Abbildung 3: Abbildung von Γ -Stabilitätsgrenzen in den Parameterraum.

Bei vollständiger Zustandsrückführung hat sich darüber hinaus in diesem Zusammenhang die Methode der Invarianzebene bewährt [2].

Eigenwertkriterien beziehen sich ausschließlich auf die Pole des geschlossenen Regelkreises. Das interne Übertragungsverhalten hängt jedoch auch wesentlich von den Nullstellen der Regelstrecke ab, die hier nicht berücksichtigt werden. Typische diesbezügliche Spezifikationen können im Frequenzbereich durch Ortskurvenkriterien oder frequenzabhängige Betragskriterien formuliert werden.

2.2 Ortskurvenkriterien (Θ -Stabilität)

Die Erweiterung des Parameterraumverfahrens auf Ortskurvenkriterien (Θ -Stabilität) wird in [5] beschrieben. Im Nyquist-Diagramm formulierte Spezifikationen beziehen sich auf die Ortskurve des aufgeschnittenen Regelkreises. Typische Nyquist-Spezifikationen für lineare Eingrößensysteme sind Amplituden-, Phasen- und Stabilitätsreserve. Weiterhin können diverse Nichtlinearitäten (u.a. Kennliniennichtlinearitäten) in die Stabilitätsuntersuchungen durch Anwendung des Zweiortskurvenverfahren, des Popov- und des Kreiskriteriums mit einbezogen werden.

Die in der Nyquist- bzw. Popov-Ebene formulierten Spezifikationen lassen sich wiederum vorzugsweise durch (zusammengesetzte) Kegelschnitte beschreiben. Abbildung 4 zeigt beispielhaft eine Spezifikation die sich auf die Stabilitätsreserve des Regelkreises bezieht.

Auch bei der Θ -Stabilität können letztlich sämtliche Problemformulierungen auf zwei polynomiale Gleichungen der Form

$$\begin{aligned}
 p_1(\omega, t_1, t_2) &= 0 \\
 p_2(\omega, t_1, t_2) &= \frac{\partial p_1(\omega, t_1, t_2)}{\partial \omega} = 0
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

reduziert werden. Die mathematische Behandlung dieser beiden Gleichungen erfolgt dann in analoger Vorgehensweise zur Γ -Stabilität.

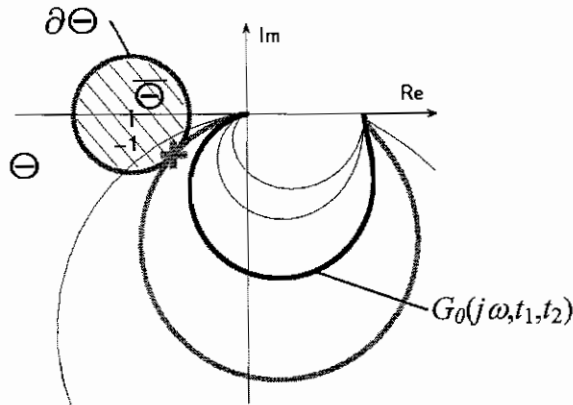


Abbildung 4: Definition der Θ -Stabilität.

2.3 Frequenzabhängige Betragskriterien (B-Stabilität)

Die in [9] beschriebene Erweiterung des Parameterraumverfahrens auf die Abbildung frequenzabhängiger Betragskriterien (B-Stabilität) ermöglicht die Integration der von Frequenzbereichsverfahren, beispielsweise beim H_∞ -Reglerentwurf, verwendeten so genannten "Loop Shaping"-Kriterien für den Entwurf und die Analyse robuster Regelungssysteme [7]. Diese Kriterien beziehen sich u. a. auf die Sensitivität des Regelkreises gegenüber Störgrößeneinflüssen und Messrauschen, auf das Führungsübertragungsverhalten oder auf Spezifikationen bzgl. der Stellenergie sowie auf die Robustheit dieser Eigenschaften sowohl gegenüber strukturierten (parametrischen) als auch unstrukturierten Modellunsicherheiten. Für Eingrößensysteme lassen sich diese Spezifikationen vorzugsweise über frequenzgewichtete Schranken für die Amplitudengänge verschiedener, das interne Systemverhalten beschreibende, Übertragungsfunktionen (Sensitivitätsfunktion, komplementäre Sensitivitätsfunktion, etc.) angeben. Eine verallgemeinerte B-Stabilitätsbedingung lautet in diesem Sinne

$$|G(j\omega, t_1, t_2)| < |G_W(j\omega)| \quad \text{für } \omega \in [\omega^-, \omega^+].$$

Abbildung 5 zeigt hierzu typische Schranken $|G_W(j\omega)|$ die lediglich abschnittsweise bestimmt und nicht notwendigerweise stetig sein müssen. Weitere Details bzgl. B-Stabilität sind in [9] nachzulesen. Auch hier können wiederum sämtliche Problemformulierungen auf zwei polynomiale Gleichungen der in Gl. (9) angegebenen Form reduziert werden.

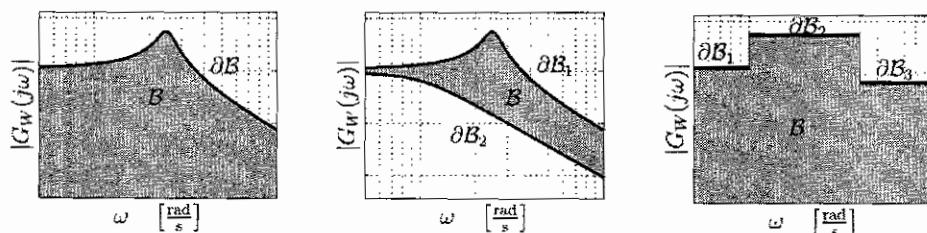


Abbildung 5: Definition der B-Stabilität.

3 ARCHITEKTUR DER TOOLBOX

Die Architektur der CACSD (Computer Aided Control System Design) Toolbox PARADISE ist von folgenden Überlegungen geprägt:

- Benutzerfreundlichkeit,
- Programmpflege (Wartbarkeit),
- effiziente Algorithmen,
- Wiederverwendbarkeit einzelner Bestandteile.

Aus diesem Grund wurde PARADISE in einzelne Module aufgeteilt. Diese Modularität erlaubt es die obigen Anforderungen umzusetzen. Als Grobunterteilung einer interaktiven CACSD Toolbox bietet sich eine Unterteilung in interaktive und rechenorientierte Module an. Abbildung 6 stellt den Grobaufbau mit den einzelnen Modulen dar.

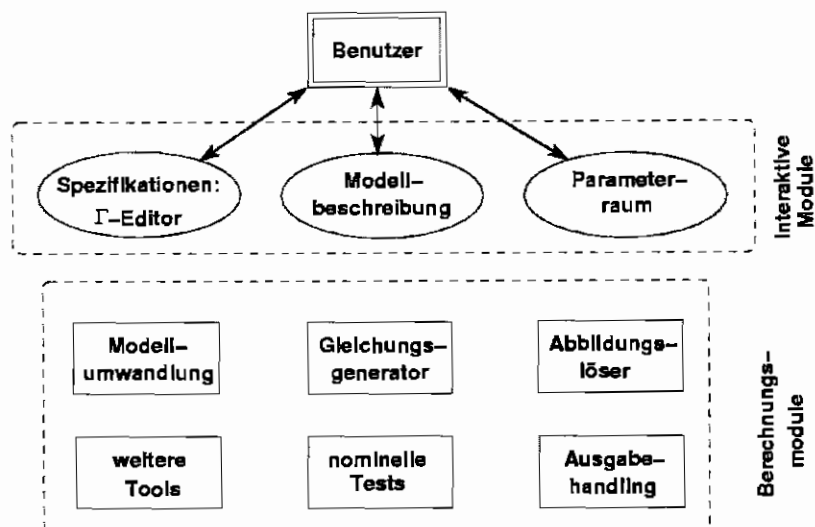


Abbildung 6: Modularer Aufbau der Toolbox.

3.1 Interaktive Module

Um maximale Benutzerfreundlichkeit zu erreichen, bestehen verschiedenste Möglichkeiten der Benutzerinteraktion mit der Toolbox. Neben grafischen Schnittstellen (GUIs) können Daten sowohl aus Dateien (Simulink-Modelle) als auch durch direkten Datenaustausch über Matlab-Variablen erfolgen. Die interaktiven Module werden ausführlich in Abschnitt 4 beschrieben.

3.2 Die Berechnungsmodule in PARADISE

Spezifikationen an einen Regelkreis werden entsprechend Abschnitt 2 durch Lösen von Abbildungsgleichungen der Form (8) bzw. (9) in eine Parameterebene (t_1, t_2) abgebildet. Diese Abbildung ist unabhängig von der konkreten Spezifikation. Dabei werden zunächst die Polynome p_1 und p_2 hinsichtlich ihrer Parameterabhängigkeit bzgl. t_1 und t_2 in Polynome mit affiner, bilinearer und polynomialer Abhängigkeit klassifiziert und dann getrennt behandelt. Die modulare Implementierung dieser Algorithmen ermöglicht die einfache Einbindung von Programmcode für Spezialfälle, wie die in [3] behandelten Sonderfälle. Die Lösung der Abbildungsgleichungen erfordert sowohl numerische als auch symbolische Berechnungen. Mit der Extended Symbolic Toolbox steht dem Matlab-Programmierer eine vollständige Maple-Engine zur Verfügung, die parallel zu Matlab läuft und mit Matlab kommunizieren kann. Eine weitere Effizienzsteigerung kann durch die Verwendung von C-Code in Form von Matlab

Executables erreicht werden. Die eigentlichen Berechnungen laufen im Hintergrund ab, so daß sich der Benutzer nicht um die Auswahl geeigneter Methoden kümmern muß.

4 BEDIENUNG DER TOOLBOX

Dieser Abschnitt behandelt die grundsätzliche Bedienung der Toolbox. Ein detaillierte Beschreibung der Toolbox findet man in [8].

4.1 Eingabe

Der erste Schritt zur Lösung eines Problems der robusten Regelungstechnik ist eine genaue Spezifikation der Regelungsstrecke durch Vorgabe der Reglerstruktur, die Festlegung eines Betriebsbereichs und der regelungstechnischen Spezifikationen.

4.1.1 Eingabe des Systemmodells

Als besonders einfache Eingabe besitzt PARADISE die Möglichkeit Simulink-Modelle eines Regelkreises einzulesen. Hierzu wird das Simulink-Blockschaltbild analysiert und entsprechend ausgewertet, um ein parametrisches Zustandsmodell der Strecke zu bestimmen. Anstatt der sonst üblichen numerischen Werte werden die entsprechenden Parameter in symbolischer Form in die Simulink Blöcke eingetragen. Neben parametrischen Strecken ist PARADISE in der Lage Multimodellformulierungen einzulesen.

4.1.2 Eingabe des Betriebsbereichs

Nach Einlesen des Modells bestimmt PARADISE automatisch alle im Modell vorliegenden Parameter. Nun kann der Benutzer klassifizieren, welche dieser Größen Reglerparameter, veränderliche Parameter oder konstante Parameter sind. Zusätzlich müssen die numerischen Werte der konstanten Parameter und der Reglerparameter bzw. die Grenzen des Betriebsbereichs Q der veränderlichen Parameter angegeben werden. Hierzu steht ein eigenes GUI zur Verfügung.

4.1.3 Eingabe der Spezifikationen

Als spezielles Werkzeug zur Eingabe von Γ -Spezifikationen steht der Γ -Editor zur Verfügung. Der Benutzer kann verschiedenen Basiselemente aus einer Bibliothek miteinander kombinieren. Die geometrischen Parameter der durch Kegelschnitte beschreibbaren Basiselemente können sowohl grafisch als auch durch direkte Eingabe angegeben werden. Die Basiselemente können beliebig miteinander logisch verknüpft werden, so daß beliebige Kombinationen aus Schnitt- und Vereinigungsmengen innerhalb der Eigenwertebene möglich werden.

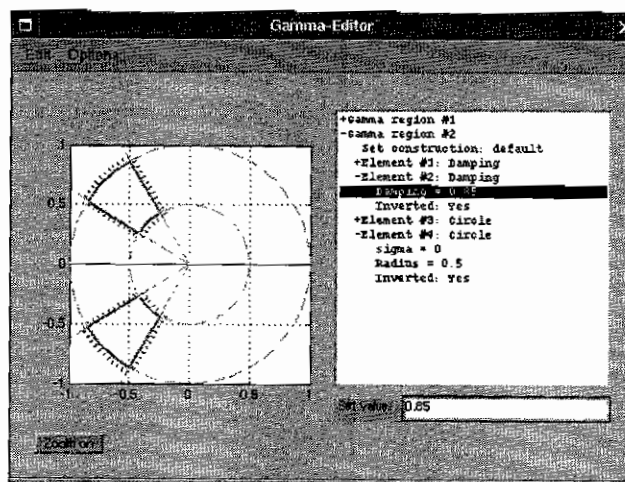


Abbildung 7: Beispiel einer Γ -Gebiet Spezifikation mit dem Γ -Editor.

4.2 Entwurf und Analyse

Zentrale Aufgabe von PARADISE ist die Abbildung von Spezifikationen in eine Parameterebene. Neben der Abbildung von Spezifikationen in Ebenen gegebener Parameter, kann der Benutzer auch eigene Parameterebenen definieren. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einen Invarianzebenenentwurf durchzuführen.

Neben der grafischen Ausgabe von Berandungen kann ein Entwurf validiert und verbessert werden, indem die sich ergebenden Eigenwerte direkt im Γ -Editor dargestellt werden.

Der robuste Entwurf mit PARADISE erfolgt iterativ indem der Benutzer sukzessive die Einhaltung der Anforderungen überprüft, die Reglerparameter auf Grund der grafischen Ergebnisse anpaßt und weitere geeignete Parameterebenen auswählt.

4.3 Ausgabe

Die Ergebnisse der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methoden erfolgt grafisch, um eine möglichst einfache Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen. Daneben existieren Schnittstellen, um die Daten in geeigneten Formaten abspeichern, bzw. weiterverarbeiten zu können. Einzelne Berechnungen können auch durch Funktionsaufruf von Matlab aus durchgeführt werden.

5 BEISPIEL: ROBUSTER PID-REGLER ENTWURF

Als einfaches Beispiel betrachten wir den Entwurf eines robusten PID Reglers

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

für eine unsichere, totzeitbehaftete Strecke erster Ordnung

$$G_1(s) = \frac{K_{DC}}{1 + T_p s} e^{-T_t s} \quad (10)$$

Die beiden Parameter K_{DC} und T_p sind unsicher mit

$$\begin{aligned} K_{DC} &\in [0.8; 1.2] \\ T_p &\in [5.6; 8.4] \end{aligned} \quad (11)$$

Die Totzeit von $T_t=1$ wird durch eine Padé-Approximation erster Ordnung angenähert. Wendet man die Ziegler-Nichols Regeln auf die Strecke mit $K_{DC}=1.2$ und der kleinsten Zeitkonstante $T_p=5.6$ an, so erhält man folgende Reglerparameter: $K_D=3.337$, $K_P=6.1$ und $K_I=1.4047$. Als ersten Schritt analysieren wir die Stabilität dieses Regler in der $K_{DC}-T_p$ Ebene. Abbildung 8 zeigt die zugehörigen PARADISE-Fenster mit dem Ergebnis. Aus den Grenzen im Parameterraum-Fenster kann man ablesen, daß der Betriebspunkt $K_{DC}=1.2$, $T_p=5.6$ in der Tat am kritischsten für die Stabilität des Regelkreises ist. Der gesamte, durch einen Rahmen markierte Betriebsbereich konnte mit den Ziegler-Nichols Regeln stabilisiert werden.

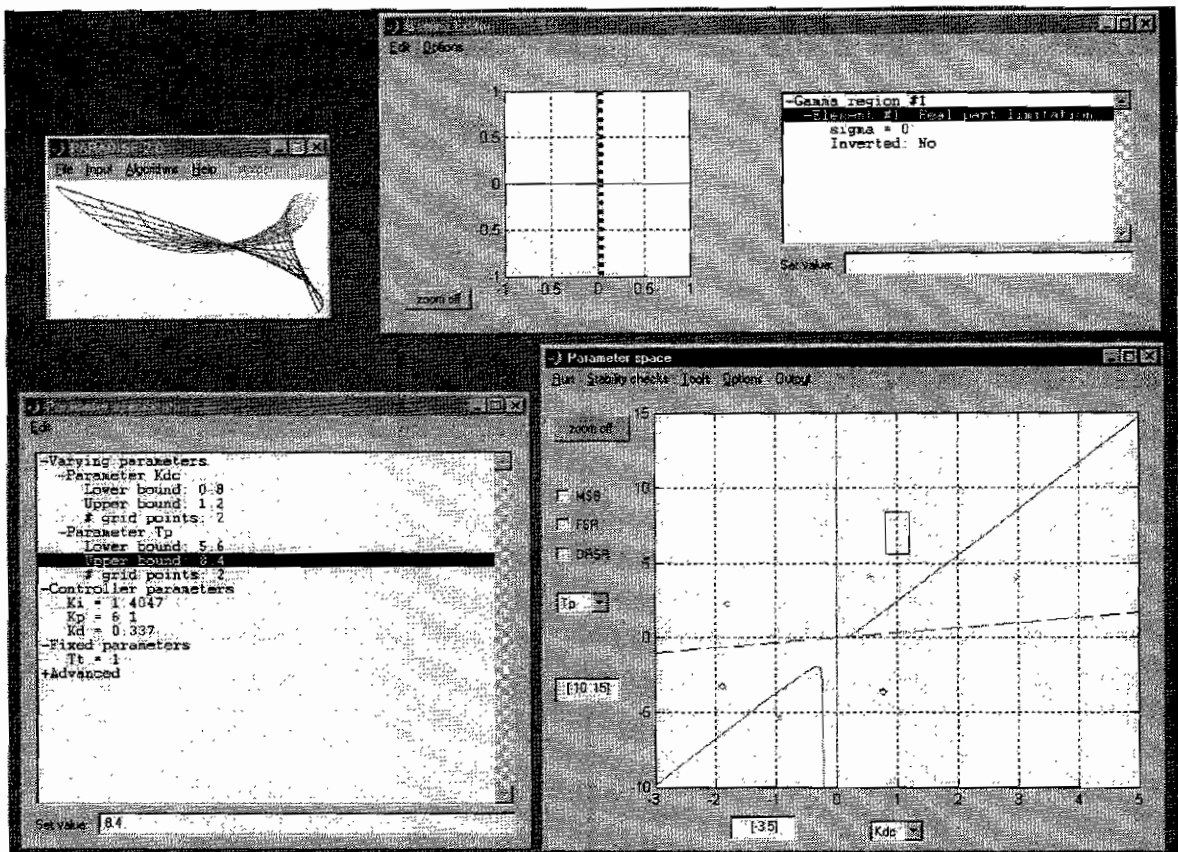


Abbildung 8: Paradise GUIs zur Analyse der Stabilität.

Im nächsten Schritt werden wir Forderungen an die Dämpfung erhöhen: $D=2/3$. Dies geschieht durch die Definition einer Dämpfungsgeraden im Γ -Editor. Abbildung 9 zeigt die sich ergebenden Grenzen in der Reglerebene K_p - K_d . Um Robustheit bzgl. des gesamten Betriebsbereichs zu erreichen, werden die unsicheren Parameter (K_{DC} , T_p) gerastert, d.h. es ergeben sich jetzt Grenzen für 4 Betriebspunkte, da jeweils der minimale/maximale Wert eines Parameters berücksichtigt wird. In einem anschließenden Entwurfsschritt fordern wir zusätzlich, daß die Eigenwerte einen Realteil von kleiner als -0.1786 (kleinste Zeitkonstante des offenen Systems) aufweisen. Dies garantiert ein ausreichend schnelles Einschwingverhalten. Nachdem K_d bereits angepaßt wurde, erfolgt die Abbildung in die K_p - K_i Ebene. Abbildung 9 zeigt die sich ergebenden Grenzen mit den jeweils ausgewählten Reglerparametern (grosser Stern). Nach 2 Entwurfsschritten konnte mit $K_p=5$, $K_d=2$ und $K_i=1$ ein PID-Regler bestimmt werden, der die Dynamikanforderungen robust erfüllt. Abbildung 10 zeigt die Sprungantwort des geregelten Systems für den robusten Regler und den zu Beginn mittels Ziegler-Nichols entworfenen Regler.

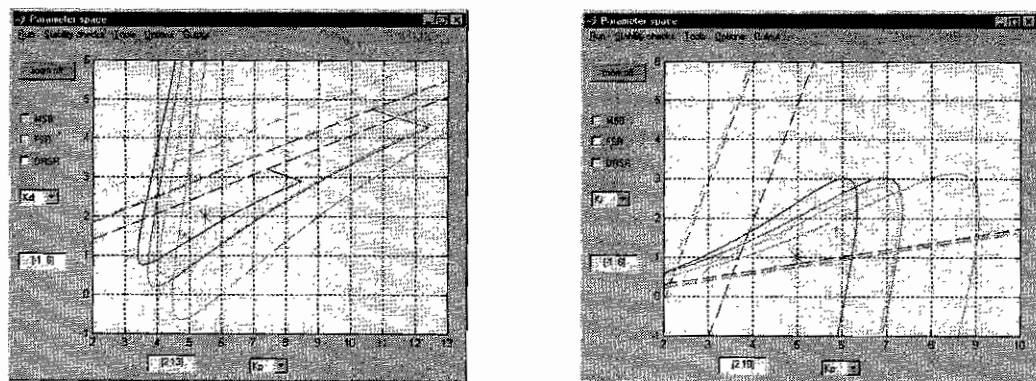


Abbildung 9: Entwurfsschritte 1 und 2.

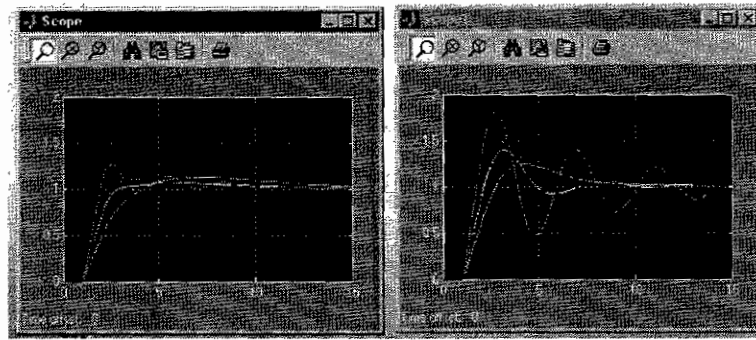


Abbildung 10: Sprungantwort des geregelten Systems: robuster PARADISE Regler (li.) und Ziegler-Nichols (re.).

Weitere Beispiele aus dem Flug- und Fahrdynamikregelungsbereich sind in [4],[6] zu finden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe des Parameterraumverfahrens können regelungstechnische Spezifikationen in eine Parameterebene abgebildet werden. Dadurch kann die Einhaltung dieser Anforderungen überprüft werden. Wie gezeigt, kann dieses Vorgehen auch zum transparenten Entwurf von robusten Reglern benutzt werden.

In der Toolbox PARADISE ist das Parameterraumverfahren implementiert. Besonderer Wert wurde auf eine einfache Benutzbarkeit der Toolbox gelegt, die nicht nur die Methoden bereitstellt, sondern diese soweit wie möglich in den Hintergrund stellt. Hierdurch kommt die einfache Interpretierbarkeit von Resultaten des Parameterraumverfahrens voll zum Tragen.

Aktuelle Informationen zum Stand der Toolbox PARADISE sind auf der PARADISE Homepage <http://www.op.dlr.de/FF-DR-RR/paradise> im Internet verfügbar.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] J. Ackermann. Parameter space design of robust control systems, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 25, pp. 1058-1072, 1980.
- [2] J. Ackermann, A. Bartlett, D. Kaesbauer, W. SieneI, und R. Steinhauser. Robuste Regelung, Analyse und Entwurf von linearen Regelungssystemen mit unsicheren physikalischen Parametern, Springer, Berlin, 1993.
- [3] J. Ackermann and D. Kaesbauer. Design of Robust PID Controllers, Proc. ECC, Porto, Portugal, 2001.
- [4] P. Blue, L. Güvenc, and D. Odenthal. Large envelope flight control satisfying H_∞ robustness and performance specifications, Proc. American Control Conference, Arlington, USA, 2001.
- [5] T. Bünte. Die Anwendung des Parameterraumverfahrens auf Ortskurvenkriterien zur Robustheitsanalyse parametrisch unsicherer Systeme, submitted to Automatisierungstechnik, Nov. 2001,
- [6] T. Bünte, D. Odenthal, B. Aksun-Güvenc, and L. Güvenc. Robust vehicle steering control design based on the disturbance observer, In Proc. 3rd IFAC Workshop on Advances in Automotive Control, Karlsruhe, 2001.
- [7] J. C. Doyle, B. A. Francis und A. R. Tannenbaum. Feedback control theory, Macmillan Publishing Company, Englewood Cliffs, New York, 1992.
- [8] M. Mühler, D. Odenthal, und W. SieneI. PARADISE User's Manual. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V., Oberpfaffenhofen, 2001, <http://www.op.dlr.de/FF-DR-RR/paradise>.
- [9] D. Odenthal und P. Blue. Mapping of frequency response magnitude specifications into parameter space, Proc. 3rd IFAC Symposium on Robust Control Design, Prague, Czech Republic, 2000.
- [10] W. SieneI und T. Bünte. PARADISE - Eine Matlab-Toolbox für Entwurf und Analyse robuster Regelungen, Automatisierungstechnik, pp. 503-512, November 1996.
- [11] J. G. Ziegler and N. B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers, Trans. ASME 64, 1942, p. 759-768.