Zentrum für Technomathematik

Fachbereich 3 – Mathematik und Informatik

Inverse Unwuchtidentifikation an Flugtriebwerken mit Quetschöldämpfern

Volker Dicken **Peter Maaß**
Ingo Menz **Jenny Niebsch**
Ronny Ramlau

Report 02–09

Berichte aus der Technomathematik

Report 02–09 **Oktober 2002**

Inverse Unwuchtidentifikation an Flugtriebwerken mit Quetschöldämpfern

Volker Dicken, Peter Maaß, Ingo Menz, Jenny Niebsch, Ronny Ramlau

Universität Bremen, Zentrum für Technomathematik, Postfach 33 04 40, 28 334 Bremen
mailto:ramlau@math.uni–bremen.de

Motivation

Seit geraumer Zeit werden immer wieder testgewichtslose, modellgestützte Auswuchtverfahren diskutiert. Im Vordergrund steht zumeist die möglichst exakte Bestimmung der erforderlichen Ausgleichssetzungen nach Größe und Lage. Unter anderem durch Unsicherheiten bei der Modellierung des gesamten Systems von Rotor, Lagerung und besonders von Gehäuse sowie Fundament ist die Genauigkeit der ermittelten Ausgleichssetzungen oft unbefriedigend.

Im Vordergrund dieser ersten Untersuchung steht nicht die exakte Bestimmung der erforderlichen Ausgleichsgewichte, sondern vielmehr die Gewinnung von Hinweisen auf Unwuchten durch Fertigungs– sowie Montagefehler oder –später während des Betriebes– auf Schaufelflug am Verdichter oder an der Turbine von Flugzeugtriebwerken. Diese Hinweise ermöglichen eine gezielte Demontage und Fehlersuche. Durch dieses Vorgehen lassen sich Stillstandszeiten minimieren und damit Kosten senken.

Erschwert wird die Modellierung des Systems durch die an Flugzeugtriebwerken verwendeten Quetschöldämpfer. Diese tragen lokale Nichtlinearitäten in das System. Es ergibt sich dadurch im mathematischen Sinne ein nichtlineares, schlechtgestelltes, inverses Problem. Die in den letzten Jahren entwickelten Regularisierungsverfahren zur Lösung derartiger Aufgabenstellungen wurden in der medizinischen Bilddatenverarbeitung bereits erfolgreich eingesetzt [4,5,6]. Bis jetzt ist offen, wie sich diese Methoden nutzbringend auf Fragestellungen der Rotordynamik übertragen lassen.

Quetschöldämpfer

Quetschöldämpfer werden an den nur sehr schwach gedämpften, wälzgelagerten Flugtriebwerken zur Beruhigung der im Betrieb auftretenden Schwingungen eingesetzt. Durch ihre mit der Stärke der Schwingung zunehmende Dämpfungswirkung eignen sie sich gut zur Beruhigung unwuchterzwungener Schwingungen, die beispielsweise nach einem Schaufelflug auftreten.

Das aus [1] entnommene Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Quetschöldämpfers. Die Detaildarstellung Bild 2 ist [2] entnommen.

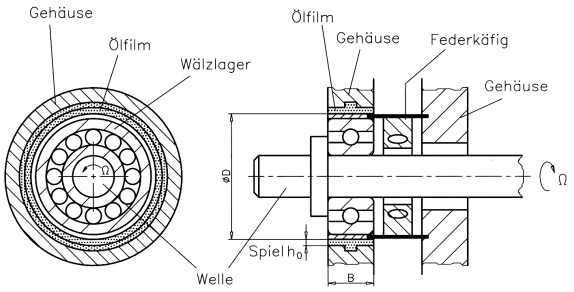

Bild 1: Aufbau eines Quetschöldämpfers aus [1]

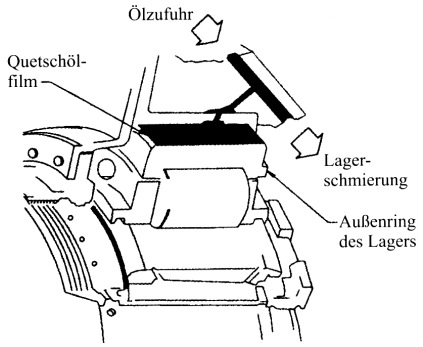

Bild 2: Detaildarstellung aus [2]

Die Dämpfung entsteht in einem engen, ölgefüllten Spalt durch Schwingungen des im Innern des Quetschöldämpfers liegenden, nicht rotierenden Wälzlageraußenringes. Dieses Wälzlager trennt lediglich die rotierende Welle vom Ölfilm, denn Quetschöldämpfer sind reine Dämpfungselemente. Sie besitzen keine statischen Trageigenschaften. Die Lagerung des Rotors muß also separat realisiert werden. Sie darf nicht zu steif ausgeführt werden, damit der Quetschöldämpfer seine Wirkung entfalten kann.
Das Dämpfungsverhalten eines Quetschöldämpfers ist nichtlinear. Die Stärke der Dämpfung hängt von der Größe der Schwingung im Ölfilm ab. Für Quetschöldämpfer sind bis jetzt keine den Gleitlagerkoeffizienten entsprechenden Parameter bekannt, mit denen sich zur Schwingungsberechnung eine Zeitschrittintegration vermeiden ließe.
Lediglich für den Sonderfall der auf Kreisbahnen umlaufenden Welle lassen sich die Bewegungsgleichungen linearisieren. Im Falle sehr kleiner Schwingungen hängt die Dämpfungskonstante nur von der Zähigkeit des Öls und der Geometrie des Quetschöldämpfers ab. Normiert man die Dämpfung des Quetschöldämpfers für sehr kleine Kreisbahnen auf 1, so ergibt sich die in Bild 3 dargestellte bezogene Dämpfung ρ in Abhängigkeit vom auf die Spalthöhe H des Ölfilms bezogenen Radius h der Kreisbahn der Welle [1]. Nach diesem Modell wird die Dämpfung für $h=H$ unendlich groß.

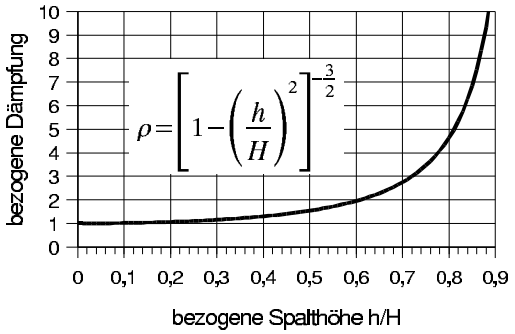

Bild 3: Dämpfungscharakteristik eines Quetschöldämpfers

Rotormodell

Als erster Schritt zur Abschätzung der Machbarkeit wurde ein einfacher, quetschölgedämpfter Rotor in einer isotropen Lagerung modelliert, Bild 4. Die Hauptabmessungen wurden in Anlehnung an die Hochdruckwelle eines kleinen Flugtriebwerkes gewählt. Der Rotor ist an beiden Enden in einem als Rohr modelliertem Gehäuse elastisch gelagert. Die Rotor– sowie die Gehäuselagerung wurden so abgestimmt, daß die unteren Eigenfrequenzen des ungedämpften Systems realistische Werte annehmen, Bild 5. Am linken, verdichterseitigen Lager des Rotors ist der Quetschöldämpfer schematisch zu erkennen.

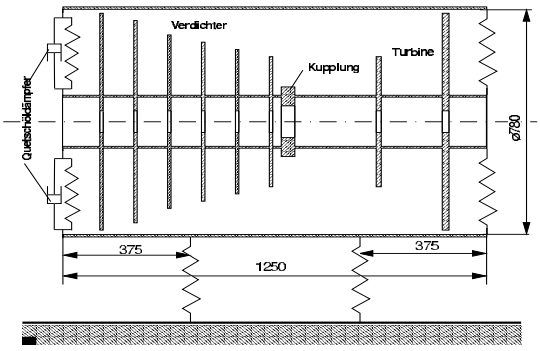

Bild 4: Rotormodell

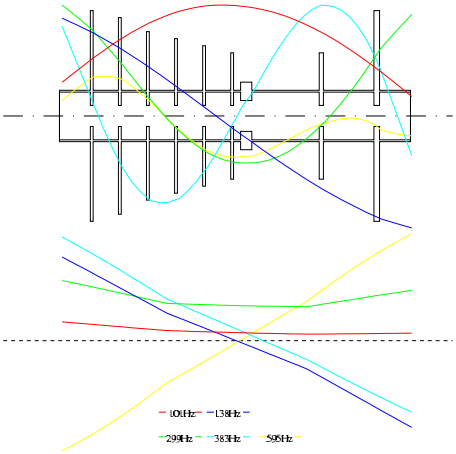

Bild 5: Eigenformen und –frequenzen des ungedämpften Systems

Die Unwuchtantwort des Modells wird bei fester Drehfrequenz Ω durch das nichtlineare Differentialgleichungssystem

$$M\cdot\ddot{v}+D_0\cdot\rho\left(h(v)\right)\cdot\dot{v}+S\cdot v=\Omega^2\cdot P\cdot\left[U^C\cos\left(\Omega t\right)+U^S\sin\left(\Omega t\right)\right] \qquad (1)$$

beschrieben. Die Zuordnung der Unwuchtkomponenten U^C, U^S zu den Freiheitsgraden des Modells wird über die Sortiermatrix P vorgenommen. Sie hat so viele Zeilen wie das Modell Freiheitsgrade, die Anzahl ihrer Spalten entspricht der Anzahl möglicher Unwuchtursachen. Hier werden unwuchtige Schaufelräder sowie Plan– und Fluchtfehler der Kupplung als mögliche Unwuchterregungen angenommen.
Die Matrizen M und S stellen die Trägheits– und Steifigkeitseigenschaften des Modells dar. Die Matrix D_0 beschreibt die Dämpfung des Quetschöldämpfers bei sehr kleinen Schwingungen der Welle. Diese wird durch die Bewegungen der Welle im Ölspalt um den Faktor ρ verstärkt. Die Größe dieses Faktors wird vom Kreisbahnradius h bestimmt, der letztendlich eine Funktion der Schwingungsantwort v ist.

Simulation der Unwuchtantwort

Für einen festen, vorgegebenen Kreisbahnradius h ist Gleichung (1) eine leicht lösbare, lineare Differentialgleichung. Die Unwuchtantwort wird berechnet, in dem man einen Startwert h_0 vorgibt und die für festes h lineare Gleichung (1) löst. Die Lösung liefert in der Regel einen anderen Kreisbahnradius h_1, der als Startwert für den zweiten Iterationsschritt dient. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis sich der zurückgelieferte Kreisbahnradius dem vorgegebenen genügend genau angenähert hat. Es hat sich gezeigt, daß diese Form der Fixpunktiteration gut zur Lösung der nichtlinearen Differentialgleichung (1) geeignet ist.

Zweckmäßiger Weise wählt man $h_0=0$ als ersten Startwert für die Fixpunktiteration. Wenn man die nichtlineare Differentialgleichung für eine erste Drehfrequenz Ω_1 gelöst hat, verwendet man dann den gefundenen Kreisbahnradius h als Startwert für die Berechnung bei der nächsten Drehfrequenz. Um das Verfahren noch weiter zu beschleunigen, empfiehlt es sich, die Lösung der linearen Differentialgleichung bei den zu berechnenden Drehfrequenzen für einige Kreisbahnradien h zu tabellieren. Weil die nichtlineare Differentialgleichung für die Invertierung sehr oft gelöst werden muß, hat dieses Vorgehen einen sehr positiven Einfluß auf die erforderliche Rechenzeit.
Bild 6 zeigt für den gesamten Drehzahlbereich den auf diesem Weg berechneten Kreisbahnradius h für eine Unwuchtanregung durch das exzentrisch sitzend angenommene Verdichterrad 3.

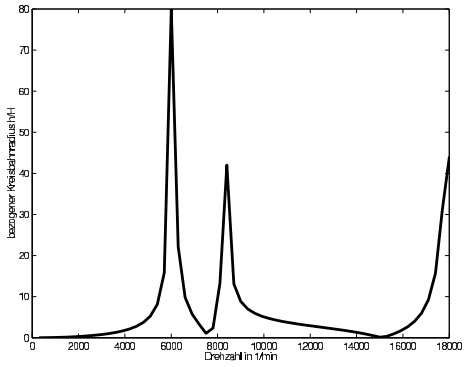

Bild 6: Schwingungsantwort,
Relativbewegung im Ölspalt

Inverses Problem und Tikhonov–Regularisierung

Jede Unwuchtverteilung $f=U^C+i\cdot U^S$ bewirkt bei gegebener Drehfrequenz Ω ein wohldefiniertes Schwingungsverhalten v des rotierenden Systems. Der Zusammenhang zwischen den beiden Größen wird über die Differentialgleichung (1) beschrieben. Die Berechnung des Schwingungsverhaltens des Rotors bei gegebener Unwucht nennen wir das *direkte Problem*. Dementsprechend verstehen wir unter dem *inversen Problem* die Berechnung der Unwucht bei gegebenem Schwingungsverhalten v.

Abstrakt läßt sich der Zusammenhang zwischen der Unwucht f und der Schwingungs–antwort v (gemessen an wenigen Sensorpositionen) als Operatorgleichung

$$A(f)=v \tag{2}$$

auffassen.

Will man nun aus gemessenen Schwingungsdaten auf die Unwuchtverteilung schließen, so muß Gleichung (2) invertiert werden. Dabei treten zwei Probleme auf:

1. Durch die Verwendung von Quetschöldämpfern handelt es sich um ein nichtlineares Schwingungssystem. Der zu invertierende Operator A ist daher auch nichtlinear.

2. Es handelt sich um ein sogenanntes schlecht gestelltes inverses Problem. Das heißt, selbst kleine Fehler in den Meßdaten v können zu sehr großen Ungenauigkeiten bei der Inversion von Gleichung (2) führen.

Ein klassischer Weg zur Lösung der Gleichung (2) besteht in der Anwendung von Iterationsverfahren zur Minimierung der Summe der Fehlerquadrate durch das Funktional

$$R(f)=\|A(f)-v\|^2 \quad . \tag{3}$$

Hat man nur verrauschte Meßdaten v^δ mit

$$\|v^\delta-v\|\le\delta \tag{4}$$

zur Verfügung, so konvergieren die Iterierten im allgemeinen nicht gegen eine Lösung der Gleichung (2). Obwohl $R(f)$ im Verlaufe der Iteration beliebig klein gemacht werden kann, explodiert die Norm der zugehörigen Iterierten. Beim Auswuchten würde man zwar die Schwingungen des Systems reduzieren, aber viel zu große Ausgleichsgewichte benutzen, die sich in ihrer Wirkung größtenteils gegenseitig aufheben (Zickzack–Setzungen). Notwendig ist daher der Einsatz eines sogenannten Regularisierungsverfahrens.

In der letzten Dekade wurden viele der bekannten Regularisierungsverfahren für lineare inverse Probleme auch auf nichtlineare Operatoren verallgemeinert. Dabei hat sich herausgestellt, daß insbesondere die Tikhonov–Regularisierung [3,4,5] sehr gute Ergebnisse liefert. Man approximiert die Lösung von (2), indem man eine global minimierende Funktion des Tikhonov–Funktionals

$$T_\alpha(f)=\|A(f)-v^\delta\|^2+\alpha\cdot\|f\|^2 \tag{5}$$

berechnet. Im Gegensatz zur Lösung von (2) handelt es sich dabei um ein gutgestelltes Problem, das stabil gelöst werden kann. Der Strafterm $\alpha\cdot\|f\|^2$ garantiert die Beschränktheit der Rekonstruktion. Der sogenannte Regularisierungsparameter α wird in Abhängigkeit vom Datenfehler δ durch das sogenannte Morozov'sche Diskrepanzprinzip gewählt: Bezeichnet f_α^δ eine minimierende Funktion des Tikhonov–Funktionals (5), so wird der Regularisierungsparameter so bestimmt, daß

$$\delta\le\|A(f_\alpha^\delta)-v^\delta\|\le c\cdot\delta \tag{6}$$

mit $c > 1$ gilt [6]. Die Berechnung der minimierenden Funktion f_α^δ erfolgt etwa mit dem Gradienten– oder Newtonverfahren [5].

Bei unseren numerischen Testrechnungen haben wir festgestellt, daß die Lösung von (2) nicht eindeutig bestimmt ist. Beim Tikhonov–Verfahren wird z.B. eine Unwucht mit minimaler Masse rekonstruiert, die durchaus von der ursprünglichen Unwucht abweichen kann. Ein Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, daß die rekonstruierte Unwucht für alle Unwuchtebenen von Null verschiedene Einträge hat, was für das Auswuchten ungünstig ist. Wir haben deshalb einen Operator A_e konstruiert, der eine Einschränkung des Operators A ist und die Rekonstruktion einer Unwucht nur auf bestimmten, vorgegebenen Positionen des schwingenden Systems gestattet. Der Vektor e gibt dabei an, auf welchen Positionen Unwuchten rekonstruiert werden können. Durch Verwendung der Tikhonov–Regularisierung mit dem Operator A_e waren wir dann in der Lage, die Unwucht zu lokalisieren sowie deren Größe und Lage abzuschätzen.

Unwuchtidentifikation

Ob sich die Tikhonov–Regularisierung zur Unwuchtidentifikation eignet, hängt sicherlich von der Qualität der verwendeten Meßdaten ab. Da uns keine echten Meßwerte zugänglich waren, müssen wir auf simulierte Schwingungsdaten zurückgreifen. Um wenigstens eine Abschätzung über die Robustheit des mathematischen Apparates zu gewinnen, werden die simulierten Daten verrauscht. Wir verzichten dabei auf die phantasievolle Modellierung aufwendiger Störmodelle. Die simulierten Fourierkoeffizienten der umlauffrequenten Schwingungen werden mit gleichverteilten Zufallszahlen multipliziert, die jeweils auf die Größe des exakten Wertes normiert sind.
Für diese Betrachtung wurde die Unwuchtursache als bekannt angenommen. Der Operator A_e wurde so gewählt, daß nur eine Unwucht an der Verdichterscheibe 3 möglich ist. Bild 7 zeigt die mit diesem sehr einschränkenden Operator ermittelte Identifikationsqualität über dem Rauschniveau. Bei der Verwendung numerisch exakter Werte wird die Unwucht auch exakt identifiziert, bei einem bezogenen Rauschen von 10% sinkt die Identifikationsgenauigkeit auf knapp unter 90%. Es verbliebe nach dem Auswuchten also eine Restunwucht von 10% der Urunwucht. Wird das Rauschen ebenso groß wie die exakten Meßwerte, werden noch 20% der Urunwucht getilgt. Das läßt die Hoffnung, daß diese Methode auch mit echten Daten brauchbare Resultate ergibt.

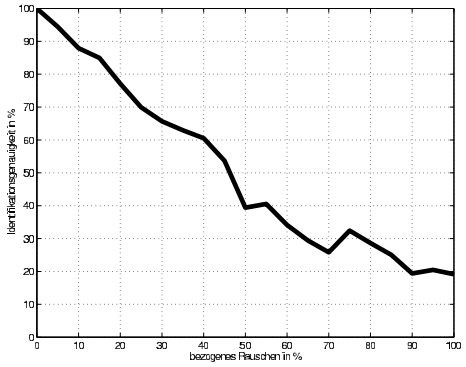

Bild 7: Identifikationsgenauigkeit

Die Tikhonov–Regularisierung liefert bei nicht eingeschränktem Operator A nicht genau die gesetzte Unwucht zurück. Das liegt daran, daß mit den 6 Verdichter– und den beiden Turbinenrädern sowie Flucht– und Planfehler der Kupplung insgesamt 10 verschiedene Unwuchtanregungen möglich sind, die Welle jedoch nur zwei kritische Drehzahlen durch– und eine dritte anfährt. Nimmt man noch den starren Körper hinzu, so ist die Welle in 5 Ebenen wuchtbar (2+N–Theorie). Die Verwendung von mehr Ebenen führt auf fast singuläre oder auch schlechtgestellte Gleichungssysteme. Für derartige Systeme versagt das Fehlerquadratverfahren. Die Tikhonov–Regularisierung findet auch hier noch auswuchtende Gewichtssätze mit minimaler Masse.

Als Maß für die Genauigkeit der Unwuchtidentifikation dient das sich bei der Iteration über den Regularisierungsparameter α ergebende Residuum $\|A(f_\alpha^\delta)-v^\delta\|$ der verbleibenden Restschwingungen nach dem Auswuchten mit der identifizierten Unwucht. Für den auf jeweils eine einzige Unwuchtursache eingeschränkten Operator A_e zeigt Bild 8 die zehn sich ergebenden Residua über der Anzahl der Iterationsschritte für die Bestimmung von (5). Die dick ausgezogene Linie zeigt dabei das Residuum für den auf die Verdichterscheibe 3 eingeschränkten Operator A_e. In diesem Fall bricht die Iteration bereits nach dem elften Schritt ab. Bei Einschränkung des Operators A_e auf eine der neun anderen Unwuchtursachen stagnieren die Residua auf deutlich höherem Niveau. Die Identifikation der Verdichterscheibe 3 als Ursache der Unwucht gelingt auf diese Weise also gut.

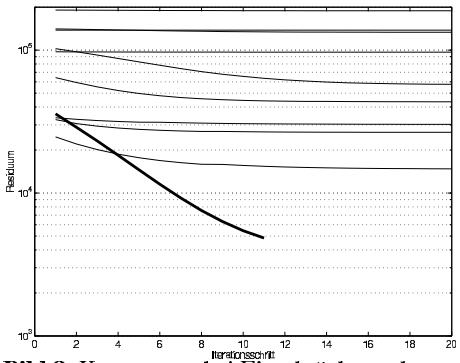

Bild 8: Konvergenz bei Einschränkung des Operators A_e auf jeweils eine Unwucht–ursache; dicke Linie Verdichterscheibe 3

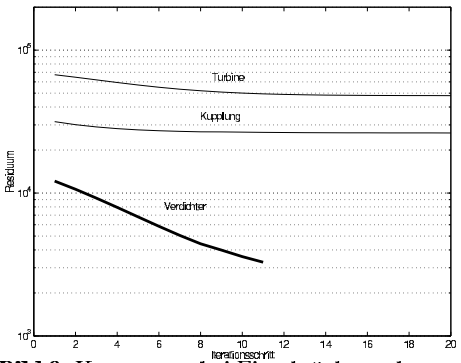

Bild 9: Konvergenz bei Einschränkung des Operators A_e auf die Komponenten Verdichter, Turbine, Kupplungsfehler, dicke Linie Verdichter

Dieses Vorgehen zeigt auch bei weniger starker Einschränkung des Operators A_e auf die drei Hauptkomponenten des Triebwerks, nämlich Verdichter, Turbine und Kupplung gute Ergebnisse, Bild 9. Bei Einschränkung des Operators A_e auf die Turbine und die Kupplung als mögliche Unwuchtursachen stagniert das Residuum schon nach wenigen Iterationsschritten. Nimmt man jedoch die Verdichterräder als mögliche Unwuchtursache an, sinkt das Residuum schnell ab. Die Iteration von (5) bricht nach elf Schritten ab. Das Residuum ist dann ungefähr eine Größenordnung kleiner als bei Annahme der beiden anderen Unwuchtursachen. Bild 9 gibt so einen deutlichen Hinweis darauf, daß die Unwuchtursache im Verdichter zu suchen ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Nach dieser ersten numerischen Untersuchung eignet sich die Tikhonov–Regularisierung in Verbindung mit dem Morozov'schen Diskrepanzprinzip zur inversen Unwuchtidentifikation.

Wegen der Quetschöldämpfer ist unser nichtlineares Modell zunächst auf isotrope Systeme beschränkt. Es läßt sich jedoch auf andere nichtlineare Systeme übertragen, die eventuell ohne die sehr rechenintensive Zeitschrittintegration lösbar sind.

In unserer numerischen Untersuchung haben wir auf die Modellierung von Modellfehlern verzichtet. Wir sind der Überzeugung, daß die praktische Tauglichkeit der vorgestellten Methode jetzt zunächst im Laborversuch geprüft werden sollte.

Danksagung

Dieses Projekt wird vom BMBF unter der Projektnummer 03MSM1HB gefördert.

Literatur

[1] R. Gasch, R. Nordmann, H. Pfützner: Rotordynamik, 2. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2002

[2] R. Holmes: Rotor Vibration Control using Squeeze Film Dampers, IFToMM 1998. Fifth International Conference on Rotordynamics, pp. 32–51

[3] H. Engl, M. Hanke, und A. Neubauer: Regularization of Inverse Problems, Kluwer, Dordrecht, 1996

[4] V. Dicken: Simultaneous Activity and Attenuation Reconstruction in Single Photon Emission Computed Tomography. Inverse Problems, 15(4): 931–960, 1999

[5] R. Ramlau: A steepest descent algorithm for the global minimization of the Tikhonov–functional. Inverse Problems, 18(2): 381–405, 2002

[6] R. Ramlau: Morozov's discrepancy principle for Tikhonov–regularization of nonlinear operators. Numer. Funct. Anal. and Optimiz., 23(1&2): 147–172, 2002

[7] R. Ramlau: TIGRA–an iterative algorithm for regularizing nonlinear ill posed problems. Eingereicht zur Veröffentlichung, 2002

Berichte aus der Technomathematik ISSN 1435-7968

http://www.math.uni-bremen.de/zetem/berichte.html

— Vertrieb durch den Autor —

Reports **Stand: 4. November 2002**

98–01. Peter Benner, Heike Faßbender:
An Implicitly Restarted Symplectic Lanczos Method for the Symplectic Eigenvalue Problem, Juli 1998.

98–02. Heike Faßbender:
Sliding Window Schemes for Discrete Least-Squares Approximation by Trigonometric Polynomials, Juli 1998.

98–03. Peter Benner, Maribel Castillo, Enrique S. Quintana-Ortí:
Parallel Partial Stabilizing Algorithms for Large Linear Control Systems, Juli 1998.

98–04. Peter Benner:
Computational Methods for Linear–Quadratic Optimization, August 1998.

98–05. Peter Benner, Ralph Byers, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Solving Algebraic Riccati Equations on Parallel Computers Using Newton's Method with Exact Line Search, August 1998.

98–06. Lars Grüne, Fabian Wirth:
On the rate of convergence of infinite horizon discounted optimal value functions, November 1998.

98–07. Peter Benner, Volker Mehrmann, Hongguo Xu:
A Note on the Numerical Solution of Complex Hamiltonian and Skew-Hamiltonian Eigenvalue Problems, November 1998.

98–08. Eberhard Bänsch, Burkhard Höhn:
Numerical simulation of a silicon floating zone with a free capillary surface, Dezember 1998.

99–01. Heike Faßbender:
The Parameterized SR Algorithm for Symplectic (Butterfly) Matrices, Februar 1999.

99–02. Heike Faßbender:
Error Analysis of the symplectic Lanczos Method for the symplectic Eigenvalue Problem, März 1999.

99–03. Eberhard Bänsch, Alfred Schmidt:
Simulation of dendritic crystal growth with thermal convection, März 1999.

99–04. Eberhard Bänsch:
Finite element discretization of the Navier-Stokes equations with a free capillary surface, März 1999.

99–05. Peter Benner:
Mathematik in der Berufspraxis, Juli 1999.

99–06. Andrew D.B. Paice, Fabian R. Wirth:
Robustness of nonlinear systems and their domains of attraction, August 1999.

99–07. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Balanced Truncation Model Reduction of Large-Scale Dense Systems on Parallel Computers, September 1999.

99–08. Ronald Stöver:
Collocation methods for solving linear differential-algebraic boundary value problems, September 1999.

99–09. Huseyin Akcay:
Modelling with Orthonormal Basis Functions, September 1999.

99–10. Heike Faßbender, D. Steven Mackey, Niloufer Mackey:
Hamilton and Jacobi come full circle: Jacobi algorithms for structured Hamiltonian eigenproblems, Oktober 1999.

99–11. Peter Benner, Vincente Hernández, Antonio Pastor:
On the Kleinman Iteration for Nonstabilizable System, Oktober 1999.

99–12. Peter Benner, Heike Faßbender:
A Hybrid Method for the Numerical Solution of Discrete-Time Algebraic Riccati Equations, November 1999.

99–13. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Numerical Solution of Schur Stable Linear Matrix Equations on Multicomputers, November 1999.

99–14. Eberhard Bänsch, Karol Mikula:
Adaptivity in 3D Image Processing, Dezember 1999.

00–01. Peter Benner, Volker Mehrmann, Hongguo Xu:
Perturbation Analysis for the Eigenvalue Problem of a Formal Product of Matrices, Januar 2000.

00–02. Ziping Huang:
Finite Element Method for Mixed Problems with Penalty, Januar 2000.

00–03. Gianfrancesco Martinico:
Recursive mesh refinement in 3D, Februar 2000.

00–04. Eberhard Bänsch, Christoph Egbers, Oliver Meincke, Nicoleta Scurtu:
Taylor-Couette System with Asymmetric Boundary Conditions, Februar 2000.

00–05. Peter Benner:
Symplectic Balancing of Hamiltonian Matrices, Februar 2000.

00–06. Fabio Camilli, Lars Grüne, Fabian Wirth:
A regularization of Zubov's equation for robust domains of attraction, März 2000.

00–07. Michael Wolff, Eberhard Bänsch, Michael Böhm, Dominic Davis:
Modellierung der Abkühlung von Stahlbrammen, März 2000.

00–08. Stephan Dahlke, Peter Maaß, Gerd Teschke:
Interpolating Scaling Functions with Duals, April 2000.

00–09. Jochen Behrens, Fabian Wirth:
A globalization procedure for locally stabilizing controllers, Mai 2000.

00–10. Peter Maaß, Gerd Teschke, Werner Willmann, Günter Wollmann:
Detection and Classification of Material Attributes – A Practical Application of Wavelet Analysis, Mai 2000.

00–11. Stefan Boschert, Alfred Schmidt, Kunibert G. Siebert, Eberhard Bänsch, Klaus-Werner Benz, Gerhard Dziuk, Thomas Kaiser:
Simulation of Industrial Crystal Growth by the Vertical Bridgman Method, Mai 2000.

00–12. Volker Lehmann, Gerd Teschke:
Wavelet Based Methods for Improved Wind Profiler Signal Processing, Mai 2000.

00–13. Stephan Dahlke, Peter Maass:
A Note on Interpolating Scaling Functions, August 2000.

00–14. Ronny Ramlau, Rolf Clackdoyle, Frédéric Noo, Girish Bal:
Accurate Attenuation Correction in SPECT Imaging using Optimization of Bilinear Functions and Assuming an Unknown Spatially-Varying Attenuation Distribution, September 2000.

00–15. Peter Kunkel, Ronald Stöver:
Symmetric collocation methods for linear differential-algebraic boundary value problems, September 2000.

00–16. Fabian Wirth:
The generalized spectral radius and extremal norms, Oktober 2000.

00–17. Frank Stenger, Ahmad Reza Naghsh-Nilchi, Jenny Niebsch, Ronny Ramlau:
A unified approach to the approximate solution of PDE, November 2000.

00–18. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Parallel algorithms for model reduction of discrete–time systems, Dezember 2000.

00–19. Ronny Ramlau:
A steepest descent algorithm for the global minimization of Tikhonov–Phillips functional, Dezember 2000.

01–01. Efficient methods in hyperthermia treatment planning:
Torsten Köhler, Peter Maass, Peter Wust, Martin Seebass, Januar 2001.

01–02. Parallel Algorithms for LQ Optimal Control of Discrete-Time Periodic Linear Systems:
Peter Benner, Ralph Byers, Rafael Mayo, Enrique S. Quintana-Ortí, Vicente Hernández, Februar 2001.

01–03. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Efficient Numerical Algorithms for Balanced Stochastic Truncation, März 2001.

01–04. Peter Benner, Maribel Castillo, Enrique S. Quintana-Ortí:
Partial Stabilization of Large-Scale Discrete-Time Linear Control Systems, März 2001.

01–05. Stephan Dahlke:
Besov Regularity for Edge Singularities in Polyhedral Domains, Mai 2001.

01–06. Fabian Wirth:
A linearization principle for robustness with respect to time-varying perturbations, Mai 2001.

01–07. Stephan Dahlke, Wolfgang Dahmen, Karsten Urban:
Adaptive Wavelet Methods for Saddle Point Problems - Optimal Convergence Rates, Juli 2001.

01–08. Ronny Ramlau:
Morozov's Discrepancy Principle for Tikhonov regularization of nonlinear operators, Juli 2001.

01–09. Michael Wolff:
Einführung des Drucks für die instationären Stokes–Gleichungen mittels der Methode von Kaplan, Juli 2001.

01–10. Stephan Dahlke, Peter Maaß, Gerd Teschke:
Reconstruction of Reflectivity Desities by Wavelet Transforms, August 2001.

01–11. Stephan Dahlke:
Besov Regularity for the Neumann Problem, August 2001.

01–12. Bernard Haasdonk, Mario Ohlberger, Martin Rumpf, Alfred Schmidt, Kunibert G. Siebert:
h–p–Multiresolution Visualization of Adaptive Finite Element Simulations, Oktober 2001.

01–13. Stephan Dahlke, Gabriele Steidl, Gerd Teschke:
Coorbit Spaces and Banach Frames on Homogeneous Spaces with Applications to Analyzing Functions on Spheres, August 2001.

02–01. Michael Wolff, Michael Böhm:
Zur Modellierung der Thermoelasto-Plastizität mit Phasenumwandlungen bei Stählen sowie der Umwandlungsplastizität, Februar 2002.

02–02. Stephan Dahlke, Peter Maaß:
An Outline of Adaptive Wavelet Galerkin Methods for Tikhonov Regularization of Inverse Parabolic Problems, April 2002.

02–03. Alfred Schmidt:
A Multi-Mesh Finite Element Method for Phase Field Simulations, April 2002.

02–04. Sergey N. Dachkovski, Michael Böhm:
A Note on Finite Thermoplasticity with Phase Changes, Juli 2002.

02–05. Michael Wolff, Michael Böhm:
Phasenumwandlungen und Umwandlungsplastizität bei Stählen im Konzept der Thermoelasto-Plastizität, Juli 2002.

02–06. Gerd Teschke:
Construction of Generalized Uncertainty Principles and Wavelets in Anisotropic Sobolev Spaces, August 2002.

02–07. Ronny Ramlau:
TIGRA – an iterative algorithm for regularizing nonlinear ill–posed problems, August 2002.

02–08. Michael Lukaschewitsch, Peter Maaß, Michael Pidcock:
Tikhonov regularization for Electrical Impedance Tomography on unbounded domains, Oktober 2002.

02–09. Volker Dicken, Peter Maaß, Ingo Menz, Jenny Niebsch, Ronny Ramlau :
Inverse Unwuchtidentifikation an Flugtriebwerken mit Quetschöldämpfern, Oktober 2002.