

MATLAB-Toolbox zum Offline-Testsignalentwurf mit prozessmodellfreien und prozessmodellbasierten Methoden

Matthias Himmelsbach (geb. Gringard), Andreas Kroll

FG Mess- und Regelungstechnik, FB Maschinenbau, Universität Kassel
Mönchebergstr. 7, 34125 Kassel, DE

E-Mail: {matthias.himmelsbach, andreas.kroll}@mrt.uni-kassel.de

Kurzfassung

In diesem Kurzbeitrag wird eine MATLAB-Toolbox zum Testsignalentwurf für Standardtestsignale für die lineare und nichtlineare Systemidentifikation vorgestellt. Für die Identifikation dynamischer Systeme sind nicht nur die Parameterschätzverfahren und die ausgewählten Modellansätze relevant für die Qualität der geschätzten Modelle, sondern auch die Eigenschaften der zur Identifikation verwendeten Daten, weshalb zielgerichtete Methoden zur Zielsystemanregung von Interesse sind. Im Beitrag werden die Funktionen beschrieben und an Beispielen demonstriert.

1 Einführung

Neben Schätzverfahren und Modellansätzen spielen auch die Eigenschaften der zur Identifikation verwendeten Daten eine große Rolle. Eine wichtige Unterscheidung beim Testsignalentwurf ist in prozessmodellfreie und prozessmodellbasierte Ansätze. Prozessmodellfreie Verfahren verwenden Signalkennwerte und Vorwissen, um Testsignale zu entwerfen. Sie setzen wenig Vorwissen über das Zielsystem oder geeignete Modellansätze voraus. Sie dienen eben-

DOI: 10.58895/ksp/1000124139-9 erschienen in:

Proceedings – 30. Workshop Computational Intelligence: Berlin, 26. - 27. November 2020

DOI: 10.58895/ksp/1000124139 | <https://www.ksp.kit.edu/site/books/m/10.58895/ksp/1000124139/>

falls als Vorstufe für modellbasierte Entwürfe, die strukturelles Modellwissen und ggf. eine Initialparametrierung voraussetzen. Hierbei spielen insbesondere die Homogenisierungsverfahren eine große Rolle.

Prozessmodellbasierte Ansätze verwenden wenigstens Informationen über die Modellstruktur und im nichtlinearen Fall auch die zu schätzenden Modellparameter selbst. Die Entwurfsmethoden sind für lokal-affine Takagi-Sugeno-Modelle implementiert, können aber prinzipiell für weitere Modellklassen verwendet werden. Die Wahl einer Modellklasse lässt Spezifikationen der Verfahrens zu. Zwei Typen modellbasierter Verfahren sind in der Toolbox implementiert: Reduktion der Parameterunsicherheit basierend auf der Fisher-Informationsmatrix (FIM) und die Ausgangshomogenisierung mittels Vorsteuerung. Für alle Entwürfe muss eine Abtastzeit T_A vorgegeben werden, welche sich aus der Anwendung ergibt. Abbruchkriterien für die einzelnen Verfahren sind in den entsprechenden Veröffentlichungen beschrieben. Die Toolbox liefert zeitdiskrete Signale für die Identifikation von Single-Input-Single-Output-(SISO-)Systemen. Sie wird frei zugänglich auf der Homepage (<http://www.uni-kassel.de/fb15/mrt>) des Fachgebietes Mess- und Regelungstechnik (MRT) bereitgestellt werden.

Die Toolbox wurde in der MATLAB Version: 9.5.0.944444 (R2018b) implementiert und getestet. Die Partikelschwarmoptimierung stammt aus der Global Optimization Toolbox Version: 4.0 (R2018b). Die Toolbox wird frei zum Download zur Verfügung gestellt.

2 Prozessmodellfreie Entwürfe

Für den prozessmodellfreien Entwurf sind Standardtestsignale implementiert: Multisinus-, Multistufen- und Chirp-Signale. Auf Rauschsignale wurde verzichtet, da bei der Parametrierung kaum Vorwissen eingebracht werden kann, wie dem Frequenzraster oder sinnvollen Stufenlängen. Diese typischen Anregungssignale wurden auch in [1] vergleichend gegenübergestellt. Dieser Teil der Toolbox basiert darauf, dass ein *cell-array* mit den notwendigen Rahmenbedingungen an den Testsignalgenerator übergeben wird. Diese Bedingungen

Tabelle 1: Einstellparameter/Entwurfsoptionen Multisinussignal

Einstellung	Bedeutung/Optionen
f_{\min}, f_{\max}	Frequenzband
T_{\max}	Maximale Experimentdauer
Frequenzauswahl	Alle, Primzahlen, Jede n -te
Phasenauswahl	Zufallsphasen, Schroeder-Phasen
Homogenisierung	mit hom/normal

werden in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt. Die prozessmodellfreien Entwurfsverfahren zielen auf die Einstellung der Signalwerteverteilung und die Kompaktheit der Signale ab. Daher können alle prozessmodellfrei entworfenen Signale zum Abschluss des Entwurfs auf den zulässigen Wertebereich skaliert werden

2.1 Multisinussignale

Bei Multisinussignalen sind die Parameter zur Einstellung der Signaleigenschaften die Amplituden und Phasen der im Signal enthaltenen Frequenzanteile, welche zuvor ausgewählt werden. Bevor Verfahren verwendet werden können, um über die Einstellparameter gezielt Signaleigenschaften zu erreichen, müssen noch Rahmenbedingungen (Tabelle 1) festgelegt werden, welche die Einstellparameter beeinflussen. Bis auf die Option zur Homogenisierung dient alles der Erstellung eines Initialsignals. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Frequenzband mittels Vorwissen ausgewählt werden sollte. Häufig ist die Abtastzeit aus der vorgesehenen Anwendung vorgegeben. Durch die Wahl der maximalen Experimentdauer wird die Grundfrequenz und damit das Frequenzraster festgelegt. Bei der Auswahl der aktiven Frequenzen sollte darauf geachtet werden, dass in einem Frequenzband nur eine begrenzte Anzahl aktiver Frequenzen vorhanden ist, da sonst die Signalenergie je Frequenzanteil reduziert wird. Vertiefende Erläuterungen finden sich in [2].

Tabelle 2: Einstellparameter/Entwurfsoptionen Multistufensignal

Einstellung	Bedeutung/Optionen
n_{step}	Stufenanzahl
$l_{\text{min}}, l_{\text{max}}$	Wertebereich der Stufenlängen
Homogenisierung	mit hom/normal

Das Homogenisierungsverfahren passt die Phasen so an, dass der Wertebereich des Eingangssignals möglichst gleichförmig abgedeckt wird. Für eine genaue Beschreibung des Homogenisierungsverfahrens wird auf [3] verwiesen.

2.2 Multistufensignale

Bei Multistufensignalen sind die direkten Einstellparameter die Höhen und Längen der einzelnen Stufen, nachdem die Rahmenbedingungen aus Tabelle 2 festgelegt wurden. Die exakte Signallänge ist kein Entwurfsparameter. Sie wird indirekt über die Anzahl der Stufen und die Länge der Stufen eingestellt. Die Länge der Stufen sollte so gewählt werden, dass die langsamste Zeitkonstante, die zu finden ist, durch eine Stufe abbildbar ist. Erfahrungsgemäß ist bei einer hohen Stufenanzahl die maximale Experimentdauer in etwa $T_{\text{max}} = n_{\text{step}} \cdot \frac{1}{2} (l_{\text{min}} + l_{\text{max}})$. Die absoluten Stufenhöhen werden an dieser Stelle nicht explizit eingestellt, sondern ergeben sich durch die Skalierung des Testsignals auf den zulässigen Signalwertebereich, welche im Anschluss durchgeführt werden kann. Die Entwurfsverfahren zielen auf die Signalverteilung selbst ab. Für die Grundlagen der Erstellung von Multistufensignalen aus Pseudozufallsbinärsequenzen wird auf [4] verwiesen. Für die nicht-homogenisierte Version werden gleichverteilte Zufallszahlen für die Stufenhöhen und -längen verwendet, da sich keine Vorteile bei der Verwendung von bspw. Sobol-Sequenzen gezeigt haben. Beim homogenisierten Multistufensignal wird eine Scheitelfaktoroptimierung eingesetzt. Dabei ist der Scheitelfaktor des Signals \mathbf{u} definiert als:

$$c_r = \frac{\max |\mathbf{u}|}{\text{rmse}(\mathbf{u})}, \quad \text{rmse}(\mathbf{u}) = \sqrt{\frac{\mathbf{u}^\top \mathbf{u}}{\text{length}(\mathbf{u})}} \quad (1)$$

Tabelle 3: Einstellparameter/Entwurfsoptionen Chirp-Signal

Einstellung	Bedeutung/Optionen
T_{\max} Homogenisierung	Maximale Experimentdauer mit hom/normal

Da ohne weitere Nebenbedingungen ein Binärsignal entsteht, wurden Verteilungsmaße über Nebenbedingungen in das Optimierungsproblem integriert. Für eine detailliertere Beschreibung wird auf [3] verwiesen.

2.3 Chirp-Signale

Chirp-Signale sind eine schnelle Möglichkeit ein Signal zu entwerfen, welches einen Frequenzbereich abdeckt und dabei annähernd eine Gleichverteilung der Signalwerte aufweist. Tabelle 3 zeigt die Einstellmöglichkeiten dieses Signal-typs. Die Eigenschaften eines solchen Signals werden in [3] beschrieben.

2.4 Beispiel

Exemplarisch wird der Entwurf eines Multisinustestsignals vorgestellt. Zunächst muss ein cell-array mit den Rahmenbedingungen erstellt werden:

```
info={'msine',[0.1 2], 50, 0.01, 'primes', 'random', 'normal'}.
```

So wird ein zeitdiskretes Multisinussingal erzeugt, welches den Frequenzbereich von $0,1 - 2$ Hz abdeckt, eine maximale Experimentdauer von $T_{\max} = 50$ s bei einer Abtastzeit von $T_A = 0,01$ s. Es werden nur Primzahlenvielfache der Grundfrequenz verwendet. Die Phasenfestlegung ist zufällig und es wird keine anschließende Homogenisierung durchgeführt. Durch den Aufruf der Funktion für den prozessmodellfreien Testsignalentwurf entsteht das Signal mit den folgenden Angaben gemäß Bild 1. Letzteres zeigt die Ausgabe der integrierten Anzeigefunktion, welche neben dem Scheitelfaktor auch einen Kennwert für

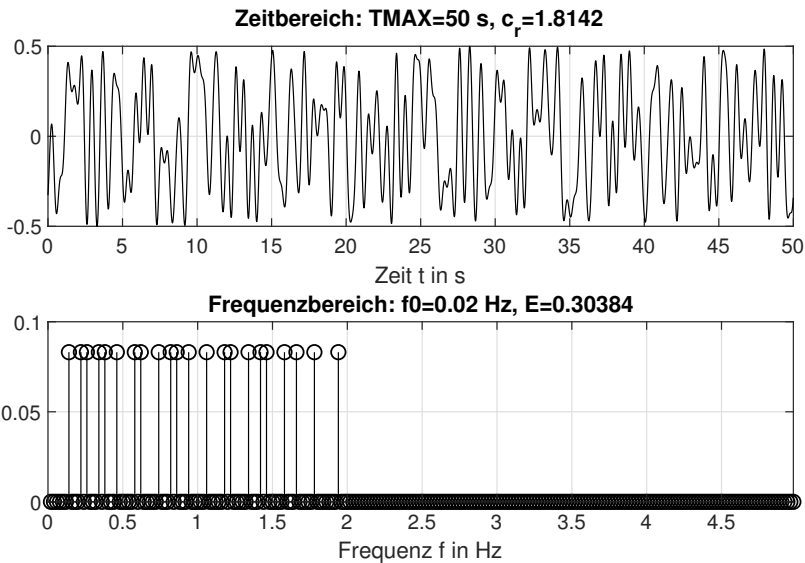


Bild 1: Toolboxanzeige für exemplarischen prozessmodellfreien Multisinustestsigalentwurf

die Signalenergie

$$E = \mathbf{U}^T \mathbf{U}^* \quad (2)$$

angibt, welcher im Frequenzbereich mit der diskreten Fouriertransformierten $\mathbf{U} = \text{DFT}(\mathbf{u})$ bestimmt wird. Hierbei gibt * die komplexe Konjugation an.

3 Prozessmodellbasierte Entwürfe

Prozessmodellbasierte Entwürfe benötigen vollständige Initialmodelle, bestehend aus Strukturinformationen und Modellparametern, um durchgeführt werden zu können. Sowohl der FIM-basierte Entwurf in Abschnitt 3.1 und die Ausgangshomogenisierung in Abschnitt 3.2 sind für lokal-affine Takagi-Sugeno-Modelle implementiert, welche Zugehörigkeitsfunktionen aus dem Fuzzy-c-means-(FCM-)Clusteralgorithmus mit euklidischer Abstandsnorm verwenden.

Tabelle 4: Übergabe eines TS-Modells an die Toolbox

Übergabegröße	Bedeutung
Strukturinformationen	
c	Anzahl der Teilmodelle
n, m	Verzögerungen der Ein- und Ausgangsgröße
\mathbf{T}_z	Abbildung des Regressionsvektors auf die Schedulingvariable
v	Unschärfeparameter
Modellparameter	
Θ^\top	Gesamtparametervektor
Θ_{LM}	lokale Modellparameter
Θ_{MF}	Partitionsparameter (Prototypen \mathbf{v}_i)

Für die Verwendung dieses Teils der Toolbox müssen Informationen über das TS-Modell übergeben werden. Zum einen wird ein MATLAB-*struct*, welches die Strukturinformationen (Anzahl der Teilmodelle c , maximale Lags der Ein- und Ausgänge n und m , Unschärfeparameter v und ggf. eine Funktionsvorschrift zur Berechnung der Schedulingvariablen aus dem Regressionsvektor, welche hier als lineare Abbildung über die Matrix \mathbf{T}_z implementiert ist) enthält und zum anderen der Gesamtmodellparametervektor übergeben. Da zur Bestimmung der FIM die analytischen Ableitungen der FBF nach den Modellparametern notwendig sind, muss dies bei einem Austausch der FBF berücksichtigt werden. Tabelle 4 zeigt die Übergabegrößen an den prozessmodellbasierten Teil der Toolbox.

3.1 Testsignalentwurf zur Reduktion der Unsicherheit

Der Testsignalentwurf zur Unsicherheitsreduktion basiert auf der Minimierung skalarer Maße auf der Fisher-Informationsmatrix (FIM), was z.B. in [5] schon beschrieben wurde. Unter der Annahme normalverteilten Rauschens am Aus-

gang, dessen Realisierungen unabhängig voneinander sind, kann die FIM wie folgt angegeben werden:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \boldsymbol{\Theta}} \right] \left[\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \boldsymbol{\Theta}} \right]^T \quad (3)$$

Hierbei ist σ^2 die Varianz des Rauschens, N die Anzahl der Beobachtungen, $\hat{y}(k)$ der Modellausgabewert im k -ten Zeitschritt und $\boldsymbol{\Theta}$ sind die Prozessmodellparameter. In der Literatur wird die FIM häufig in Abhängigkeit der Modellparameter angegeben, dies ist jedoch für die Realisierung für ein dynamisches Problem irreführend, denn die FIM hängt neben dem Testsignal auch von der Modellausgabe selbst ab, da vergangene Werte der Modellausgabe Teil der Regressionsvariablen sind. Dies macht die Verwendung eines internen Simulationsmodells nötig, welches in jedem Iterationsschritt ausgewertet werden kann. In der Toolbox wird das folgende Optimierungsproblem gelöst:

$$\boldsymbol{\beta}_{\text{opt}} = \text{argmin}_{\boldsymbol{\beta}} \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{I}(\hat{\mathbf{y}}(\boldsymbol{\Theta}, \mathbf{u}(\boldsymbol{\beta})), \mathbf{u}(\boldsymbol{\beta}), \boldsymbol{\Theta}) \quad (4)$$

Der Fettdruck von \mathbf{u} und \mathbf{y} bezeichnet hier, dass es sich um das gesamte Signal handelt. $\boldsymbol{\beta}$ kennzeichnet hier die Signalmodellparameter, da das Problem für eine individuelle Optimierung aller Einzelwerte von $u(k)$ nicht praktikabel ist. Die Verwendung von Signalmodellen beim optimalen Testsignalentwurf hat ebenfalls implizite Nebenbedingungen zur Folge. Die FIM-basierte Optimierung von Signalmodellparametern wird in [6, 7] für die verwendeten Takagi-Sugeno-Modelle beschrieben. Die Lösung des Problems wird mit dem in MATLAB implementierten Partikelschwarmalgorithmus [9] gelöst, welcher über die entsprechenden Übergabeparameter angepasst werden kann. Tabelle 5 zeigt die Entwurfsoptionen beim FIM-basierten Testsignalentwurf. Die Kombinationen beim Testsignaltyp meint eine Addition eines Multisinussignals mit einem Multistufensignal. Da sich die Modellparameter der TS-Modelle in lokale Modellparameter und Partitionsparameter aufteilen lassen, sind in der Toolbox auch getrennte Optimierungen möglich, um Testsignale zu entwerfen, die eine präzise Schätzung der entsprechenden Parametergruppe ermöglicht. Bild 2 zeigt exemplarisch ein FIM-basiert entworfenes Stufensignal.

Tabelle 5: Entwurfsoptionen FIM-basierter Testsignalentwurf

Einstellung	Optionen
Testsignaltyp	Multisinus, Multistufen, Überlagerung
Zielparameter	Alle, lokale Modellparameter, Partitionsparameter
FIM-Maß	Determinante, Spur, skalierte Spur, Maximieren des kleinsten Eigenwerts, Empfindlichkeitssumme

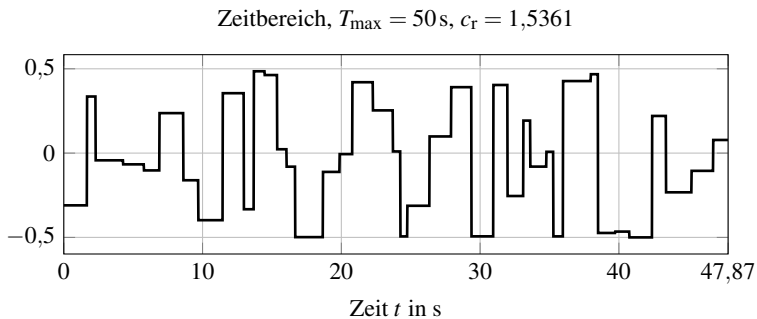


Bild 2: Multistufensignal durch FIM-basierten Testsignalentwurf

3.2 Ausgangshomogenisierung durch Vorsteuerung

Bei der Identifikation nichtlinearer dynamischer Systeme ist davon auszugehen, dass das nichtlineare Verhalten hauptsächlich durch die vergangenen Werte der Ausgangsgröße bestimmt wird. Bei statischen Systemen führen raumfüllende Ansätze zu einer besseren Rasterung bei einem möglichst sparsamen Umgang mit verfügbaren Messpunkten der Ausgangsgröße. Wird eine Homogenisierung der Eingangsgröße durchgeführt, wird außer Acht gelassen, dass dies nicht zwangsläufig zu einer Homogenisierung der Ausgangsgröße und damit zu einer besseren Rasterung des nichtlinearen Verhaltens führt. Aus diesem Grund enthält die Toolbox Methoden, welche eine flachheitsbasierte Vorsteuerung basierend auf Initialmodellen verwendet. Dazu wird zunächst ein

Ausgangssignal erzeugt, welches den Schedulingraum gleichmäßig abdeckt. Wird nur die Ausgangsgröße homogenisiert, können die prozessmodellfreien Testsignalentwurfsfunktionen verwendet werden. Wird der gesamte Schedulingraum betrachtet, müssen Abdeckungsmaße individuell für diesen angepasst werden, um eine geeignete Referenzausgangsgröße zu erhalten, welche vom System durch die entworfene Vorsteuerung erreicht werden soll. Ein n_z -dimensionalen Schedulingraum wird dabei in Hyperquader zerlegt, in welchem die Datenpunkte gezählt werden. Wie sich die Verteilung im Schedulingraum auf die Ausgangsgröße auswirkt, hängt von der individuellen Wahl der Schedulingvariable ab. Die Ausgangsgröße wird dann iterativ mit der MATLAB-PSO ermittelt, was aufgrund der geringen Komplexität keine hohen Rechenkosten verursacht. Für eine geeignete Wahl der Referenzausgangsgröße müssen Rahmenbedingungen wie der zulässige Wertebereich und das relevante Frequenzband des Systems ermittelt werden.

Das Verfahren basiert darauf, bei einem gegebenen Referenzsignal mit den gewünschten Eigenschaften mittels des TS-Initialmodells eine Vorsteuerung so zu entwerfen, dass das zu identifizierende System die Referenzausgangsgröße bestmöglich liefert. Bei der Umsetzung wird die lokale Modellstruktur der TS-Modelle ausgenutzt, indem lokale Steuerfunktionen $u_j(k)$ zu den lokalen Teilmodellen entworfen werden. Die $u_j(k)$ werden dann mit den Fuzzy-Basisfunktionen $\phi_j(k)$ des TS-Initialmodells zwecks simulativer Bewertung und Optimierung überlagert.

$$u(k) = \sum_{j=1}^c \phi_j(k) \cdot u_j(k) \quad (5)$$

Bei einem steuerbaren System kann der Entwurf mit einem virtuellen flachen Ausgang stets durchgeführt werden. Für weitere Informationen zu der Realisierung wird auf [8] verwiesen. Bild 3 zeigt die Auswirkung des Entwurfs. Im oberen Plot ist das entstandene Testsignal zu sehen. Im unteren Plot zum einen das Referenzsignal (gepunktet), die Antwort des Fuzzy-Initialmodells (schwarz), welches für den Vorsteuerungsentwurf verwendet wurde, sowie die tatsächliche Systemantwort (grau). Das Referenzsignal wurde so entworfen, dass der zugehörige Schedulingraum möglichst gleichmäßig abgedeckt ist. Auch wenn die Vorsteuerung nicht exakt ist, was durch die Überlagerung der

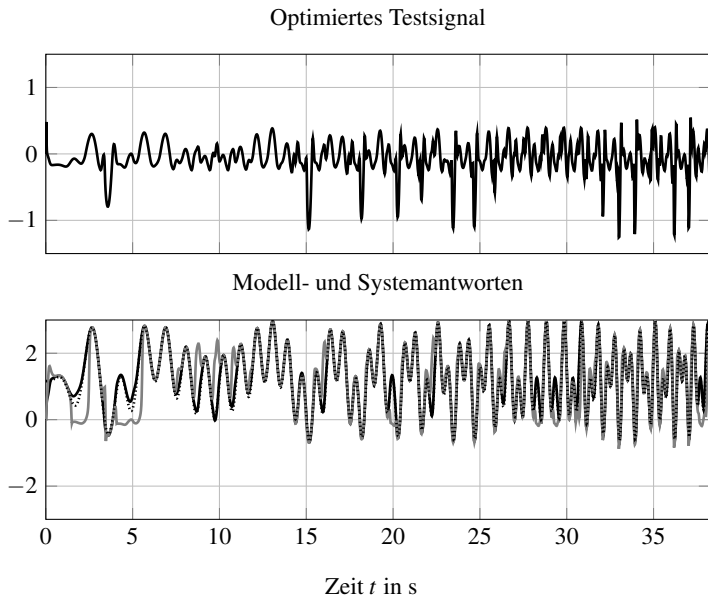


Bild 3: Testsignal und Ausgangsgrößen, Referenzsignal (gepunktet), Antwort Fuzzy-Modell (schwarz), Systemantwort (grau)

lokalen Steuerfunktionen bedingt ist, sind sich die Signale dennoch sehr ähnlich, so dass am System Daten erhoben werden konnten, die eine gleichmäßige Abdeckung des Schedulingraums aufweisen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden kurz die Funktionen einer MATLAB-Testsignalentwurfstoolbox vorgestellt. Hierbei ist der prozessmodellfreie Teil für jeden Modelltyp verwendbar und nicht auf Takagi-Sugeno-Modelle beschränkt.

Die prozessmodellbasierten Entwürfe sind für TS-Modelle implementiert. Die Toolbox ist frei verfügbar. Sie enthält für alle Kategorien Demonstrationsbeispiele, sowie eine detaillierte Anleitung ihrer einzelnen Elemente. Bei der Ausgangshomogenisierung kann der Effekt direkt am Signal abgelesen werden.

Die Wirkung der Methoden wurde an verschiedenen Fallbeispielen untersucht und in [3, 6, 8] veröffentlicht.

Danksagung

Die Forschungsarbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt, Projektnummer KR 3795/7-1.

Literatur

- [1] T. O. Heinz und O. Nelles, „Vergleich von Anregungssignalen für nicht-lineare Identifikationsaufgaben“, In: *Proc. 26. Workshop Computational Intelligence*, S. 139–158, Dortmund, Deutschland, 2016.
- [2] R. Pintelon und J. Schoukens, „System identification: a frequency domain approach“, 2. Ausgabe, Wiley, 2012.
- [3] M. Gringard und A. Kroll, „Zur Homogenisierung von Testsignalen für die nichtlineare Systemidentifikation“, In: *at - Automatisierungstechnik* Band 67, Nr. 10, S. 820-832, 2019.
- [4] K. Godfrey. „Perturbation signals for system identification“, Prentice Hall, 1993.
- [5] A. Atkinson und A. Donev, „Optimum experimental designs“. Oxford: Clarendon Press, 1992.
- [6] M. Gringard und A. Kroll, „Optimal experiment design for identifying dynamical Takagi-Sugeno models with minimal parameter uncertainty“, In: *Proc. Symposium on System Identification 2018*, Stockholm, Schweden, 2018.
- [7] C. Hametner, M. Stadlbauer, M. Deregnaucourt, S. Jakubek und T. Winsel, „Optimal experiment design based on local model networks and multiplayer perceptron networks“. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Band 25, Nr. 1, S. 251-261, 2013.

- [8] M. Gringard und A. Kroll, „On considering the output in space-filling test signal designs for the identification of dynamic Takagi-Sugeno models“, In: *Proc. IFAC World Congress 2020*, Berlin, Deutschland, 2020.
- [9] Mathworks, „Optimization Toolbox User’s Guide“, 2019.