

Hochschule Hannover
University of Applied Sciences and Arts

Fakultät I – Elektro- & Informationstechnik
Fachgebiet Ingenieurinformatik & angewandte Mathematik
(EIT – IAM)
Fachgebiet Regelungstechnik & Mechatronik
(EIT – RTM)

Systemtheorie und Optimale Regelung

Teil II Steuerbarkeit

Mohammad Beyki, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Lindemann
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kutzner

8. Februar 2023

2 Steuerbarkeit

Die Steuerbarkeit von Systemen ermöglicht es, eine Aussage über die Regelbarkeit zu treffen. Denn nur, wenn ein System steuerbar ist, kann es auch regelbar sein. Für die Regelbarkeit ist sowohl eine Steuerbarkeit als auch eine Beobachtbarkeit vorauszusetzen. In Kapitel I wurden bereits die ZRD¹ und ihre charakteristischen Matrizen vorgestellt. Nun werden besagte Matrizen genutzt, um Aussagen über das System treffen zu können. Gegenstand unserer Betrachtungen werden LTI-Systeme in ZRD mit folgender Beschreibung sein [1], [2], [5]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t)$$

Dabei gibt die Systemmatrix \mathbf{A} die Ordnung n des Systems an. Das heißt ist \mathbf{A} eine 2×2 - Matrix, so hat das System die Ordnung $n = 2$, bei 3×3 ist $n = 3$ usw.

2.1 Steuerbarkeit nach Kalman

Zunächst soll die Steuerbarkeit nach Kalman² betrachtet werden. Diesbezüglich wird die Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{Q}_S eingeführt [1], [2], [3], [4].

$$\mathbf{Q}_S = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1} \cdot \mathbf{B}] \quad (1)$$

Nach Kalman reicht es aus vollständige Steuerbarkeit eines Systems vorauszusetzen, wenn der Rang von \mathbf{Q}_S nicht gemindert wird. Dies lässt sich über den Höchststrang von \mathbf{Q}_S zeigen (ist \mathbf{Q}_S eine quadratische Matrix, so kann auch der Weg über die Determinantenbildung ungleich null gewählt werden):

$$\det(\mathbf{Q}_S) \neq 0 \quad \text{oder} \quad \text{rang}(\mathbf{Q}_S) = n,$$

wobei "n" für vollen Rang stehen muss.

¹ZRD: Zustandsraumdarstellung

² Otto Föllinger: Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 8. Auflage. Hüthig Verlag, Heidelberg 1994

J. Ackermann: Der Entwurf linearer Regelungssysteme im Zustandsraum. Regelungstechnik 20 (1972), S. 297–300.

2.2 Beispiel: Steuerbarkeit nach Kalman

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b} \cdot u$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x} + d \cdot u$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}^T = [1 \quad 1] \quad d = 1$$

Die Ordnung des Systems ist $n = 2$, da \mathbf{A} eine 2×2 - Systemmatrix ist. Es wird erwartet, dass bei vollständiger Steuerbarkeit die Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{Q}_S einen vollen Rang von $n = 2$ aufweist oder die Determinante der Steuerbarkeitsmatrix ungleich Null ist.

$$\mathbf{Q}_S = [\mathbf{b} \quad \mathbf{A} \cdot \mathbf{b}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -4 \end{bmatrix}, \quad \text{rang}(\mathbf{Q}_S) = 2 = n$$

Das System ist somit vollständig steuerbar nach Kalman. An dieser Stelle muss die $\det(\mathbf{Q}_S)$ nicht mehr gebildet werden, aber um einen Vergleich zu ermöglichen wird die zweite Methode ebenfalls ausgeführt:

$$\det(\mathbf{Q}_S) = (-4) \neq 0$$

2.3 Steuerbarkeit nach Hautus

Als nächstes wird die Steuerbarkeit nach Hautus³ betrachtet. Dazu wird der Rang einer bestimmten Matrixkombination untersucht. Die Kombination ermöglicht es den Einfluss der Eingangsmatrix \mathbf{B} auf die Eigenwertmatrix $\det(\lambda_i \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A})$ genauer zu analysieren [1], [2], [3], [4]:

$$\text{rang}[(\lambda_i \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) \quad \mathbf{B}] = n \quad \text{mit} \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Da λ_i verwendet wird, verweist der Index i darauf, dass für jeden Eigenwert gesondert das System auf Steuerbarkeit untersucht wird. Somit kann für ein System

³ Otto Föllinger: Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 8. Auflage. Hüthig Verlag, Heidelberg 1994

J. Ackermann: Der Entwurf linearer Regelungssysteme im Zustandsraum. Regelungstechnik 20 (1972), S. 297–300.

nicht nur eine Aussage im allgemeinen Sinne über die Steuerbarkeit getroffen werden, sondern sogar eine spezielle Betrachtung bezüglich jedes einzelnen Eigenwertes vorgenommen werden. Auf diese Weise ist sogar bekannt welcher Zustand x_i eines Systems nicht steuerbar ist.

2.4 Beispiel: Steuerbarkeit nach Hautus

Um die Steuerbarkeit nach Hautus durchführen zu können, werden zunächst die Eigenwerte des betrachteten Systems ermittelt und im Anschluss in eine Matrix eingesetzt, deren Rang zu bestimmen ist.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(i) Eigenwertbestimmung bezüglich der Matrix \mathbf{A} :

$$\begin{aligned} \det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) &= 0 \\ \Rightarrow (\lambda + 1) \cdot (\lambda + 4) &= 0 \\ \Rightarrow \lambda_1 = (-1), \quad \lambda_2 = (-4) \end{aligned}$$

(ii) Es wird eine Matrix bestimmt, deren Rang zu ermitteln ist:

$$[(\lambda_i \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) \quad \mathbf{b}] = \begin{bmatrix} \lambda_i + 1 & -1 & 1 \\ 0 & (\lambda_i + 4) & 1 \end{bmatrix}$$

(iii) Nun werden die bereits bekannten Eigenwerte λ_i der Systemmatrix \mathbf{A} in die Matrix eingesetzt, deren Rang bestimmt werden muss. Es muss zu jedem Eigenwert eine Ranguntersuchung vorgenommen werden.

$$\lambda_1 = (-1):$$

$$\text{rang} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 0 & 3 & 1 \end{bmatrix} = 2$$

$$\lambda_2 = (-4):$$

$$\text{rang} \begin{bmatrix} -3 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 2$$

Somit ergibt die Steuerbarkeitsuntersuchung nach Hautus ebenfalls vollständige Steuerbarkeit und bestätigt das Ergebnis aus 2.2.

2.5 Steuerbarkeit nach Gilbert

Als nächstes wird die Steuerbarkeit nach Gilbert⁴ eingeführt. Ein Eingrößensystem in kanonischer Normalform⁵ [1], [2], [3], [4]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_D &= \mathbf{A}_D \cdot \mathbf{x}_D + \mathbf{b}_D \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{c}_D^T \cdot \mathbf{x}_D + d_D \cdot \mathbf{u}\end{aligned}$$

mit einfachen Eigenwerten ist steuerbar, wenn jedes Element $\mathbf{b}_{i,D}$ des zum Diagonalsystem gehörenden \mathbf{b}_D - Vektors von null verschieden ist. Ein Mehrgrößensystem ebenfalls in kanonischer Normalform:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_D &= \mathbf{A}_D \cdot \mathbf{x}_D + \mathbf{B}_D \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_D \cdot \mathbf{x}_D + \mathbf{D}_D \cdot \mathbf{u}\end{aligned}$$

mit einfachen Eigenwerten ist steuerbar, wenn in jeder Zeile der \mathbf{B}_D - Matrix mindestens ein Element von null verschieden ist.

Für die Steuerbarkeitsanalyse nach Gilbert ist es notwendig das zu betrachtende System in seine Eigenvektoren zerlegen zu können, da die kanonische Normalform mit einfachen Eigenwerten verwendet wird. Üblicherweise liegt ein System jedoch nicht in kanonischer Normalform vor und muss als erstes in die besagte Form transformiert werden. Erst danach kann eine Steuerbarkeitsanalyse nach Gilbert erfolgen. Dies soll kurz über die folgenden fünf Schritte übersichtlich dargestellt werden:

- (i) Bestimmung der Eigenwerte λ_i

$$\det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0$$

- (ii) Bestimmung der Eigenvektoren \mathbf{t}_i

$$[(\lambda_i \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A})] \cdot \mathbf{t}_i = \mathbf{0}$$

⁴ Otto Föllinger: Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 8. Auflage. Hüthig Verlag, Heidelberg 1994

⁵oder auch Diagonalform genannt

(iii) Bestimmung der Transformationsmatrix \mathbf{T}

$$\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2 \quad \dots \quad \mathbf{t}_n] \quad (3)$$

(iv) Transformation in Diagonalform

$$\mathbf{x} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{x}_D \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_D = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_D = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{B} \quad (6)$$

$$\mathbf{C}_D = \mathbf{C} \cdot \mathbf{T} \quad (7)$$

$$\mathbf{D}_D = \mathbf{D} \quad (8)$$

(v) Beurteilung der Steuerbarkeit des zu untersuchenden Systems

2.6 Beispiel: Steuerbarkeit nach Gilbert

Es wird weiterhin das eingeführte Beispiel aus 2.2 verwendet.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Um die Steuerbarkeit nach Gilbert durchführen zu können, ermitteln wir zunächst die Diagonalform des betrachteten Systems. Dazu müssen die Systemmatrix \mathbf{A} und der Eingangsvektor \mathbf{b} unter Zuhilfenahme einer Transformationsmatrix \mathbf{T} auf Diagonalform $\{\mathbf{A}_D, \mathbf{b}_D\}$ transformiert werden. Zu diesem Zweck muss als erstes eine Transformationsmatrix \mathbf{T} ermittelt werden, welche aus den Eigenvektoren \mathbf{t}_i der Systemmatrix \mathbf{A} besteht. Es werden die oben erwähnten Punkte (i) - (iv) ausgeführt und im Anschluss in (v) die Steuerbarkeit des Beispiel-Systems beurteilt.

(i) Bestimmung der Eigenwerte λ_i

$$\det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0$$

$$\Rightarrow (\lambda + 1) \cdot (\lambda + 4) = 0$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = (-1) \quad \lambda_2 = (-4)$$

(ii) Bestimmung der Eigenvektoren \mathbf{t}_i

$$[(\lambda_i \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A})] \cdot \mathbf{t}_i = \mathbf{0}$$

$$(\lambda_i \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) \cdot \mathbf{t}_i = \begin{bmatrix} \lambda_i + 1 & -1 \\ 0 & \lambda_i + 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{i,1} \\ \mathbf{t}_{i,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\lambda_1 = (-1)$:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{1,1} \\ \mathbf{t}_{1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

das LGS⁶ wird umgeschrieben zu:

$$0 \cdot \mathbf{t}_{1,1} + (-1) \cdot \mathbf{t}_{1,2} = 0 \Rightarrow \mathbf{t}_{1,2} = 0$$

$$0 \cdot \mathbf{t}_{1,1} + 3 \cdot \mathbf{t}_{1,2} = 0 \Rightarrow \mathbf{t}_{1,2} = 0$$

somit folgt aus diesem LGS, dass $\mathbf{t}_{1,2} = 0$ ist. Allerdings liegt für $\mathbf{t}_{1,1}$ kein expliziter Wert vor, sodass $\mathbf{t}_{1,1}$ frei wählbar ist. Der Einfachheit halber wird $\mathbf{t}_{1,1} = 1$ gesetzt, somit folgt für \mathbf{t}_1 :

$$\mathbf{t}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{1,1} \\ \mathbf{t}_{1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\lambda_2 = (-4)$:

$$\begin{bmatrix} -3 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{2,1} \\ \mathbf{t}_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

⁶LGS: Lineares Gleichungssystem

Das LGS wird umgeschrieben zu:

$$(-3) \cdot t_{2,1} + (-1) \cdot t_{2,2} = 0 \Rightarrow -3 \cdot t_{2,1} = t_{2,2}$$

$$0 \cdot t_{2,1} + 0 \cdot t_{2,2} = 0$$

Der Einfachheit halber wird $t_{2,1} = 1$ gesetzt, daraus ergibt sich für $t_{2,2} = (-3)$ und für \mathbf{t}_2 folgt:

$$\mathbf{t}_2 = \begin{bmatrix} t_{2,1} \\ t_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix}$$

(iii) Bestimmung der Transformationsmatrix \mathbf{T}

$$\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2 \quad \dots \quad \mathbf{t}_n]$$

$$\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix}$$

Die benötigte Inverse von \mathbf{T} ergibt sich zu:

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

(iv) Transformation in Diagonalfom

$$\mathbf{A}_D = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_D = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

(v) Beurteilung der Steuerbarkeit des Systems nach Gilbert:

$$\dot{\mathbf{x}}_D = \mathbf{A}_D \cdot \mathbf{x}_D + \mathbf{b}_D \cdot \mathbf{u}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_D = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}_D + \begin{bmatrix} \frac{4}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}$$

Nun wird deutlich, dass auch nach Gilbert, wie zu erwarten war, eine vollständige Steuerbarkeit des Systems vorliegt, da jeder Eintrag von \mathbf{b}_D von null verschieden ist.

2.7 Bedeutung der Steuerbarkeit nach Gilbert

Im Vergleich zu den den anderen beiden Verfahren⁷ der Steuerbarkeitsanalyse bietet das Verfahren nach Gilbert mittels der kanonischen Normalform die Möglichkeit einer Entkopplung der ursprünglichen Zustände. Durch die Transformation in die Diagonalform wird dem Anwender das Herauslesen des Geschehens bereits ohne Visualisierung mittels eines BSBs⁸ wesentlich vereinfacht. Im Grunde wurde besagte Normalform nur angewandt um ohne weitere Rechnung aus der neuen Systemmatrixdarstellung über \mathbf{A}_D in Verbindung mit angepasstem Eingangsvektor \mathbf{b}_D die Steuerbarkeit beurteilen zu können.

In diesem Abschnitt werden das Originalsystem und das transformierte System im direkten Vergleich betrachtet. Dazu wird das BSB beider Strukturen gezeichnet und beide Ausgänge betrachtet. Denn der Ausgang des Originalsystems muss als Gütekriterium für die Anwendbarkeit dieser Steuerbarkeitsanalyse betrachtet werden. Das Originalsystem wird beschrieben durch:

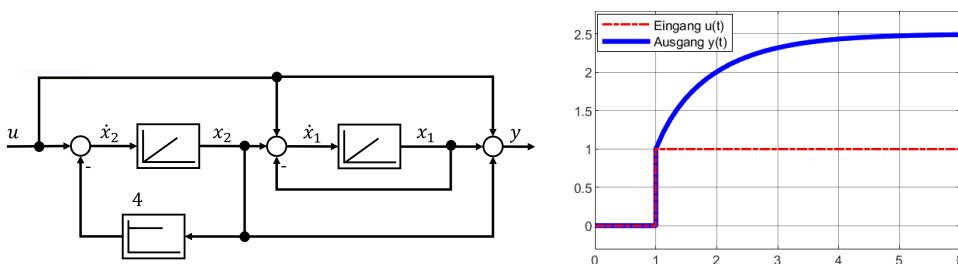
$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{u}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x} + d \cdot \mathbf{u}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{c}^T = [1 \quad 1] \quad d = 1$$

⁷andere Verfahren: Hautus und Kalman

⁸BSB: Blockschaftbild

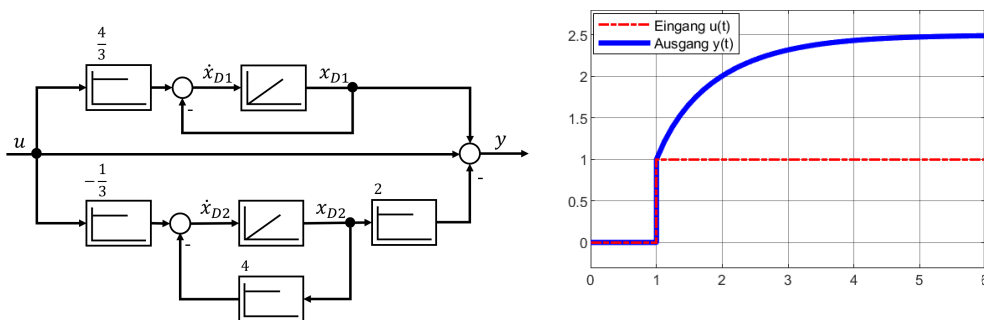


Für die Diagonalisierung des Systems folgt die Systembeschreibung:

$$\dot{\mathbf{x}}_D = \mathbf{A}_D \cdot \mathbf{x}_D + \mathbf{b}_D \cdot u$$

$$y_D = y = \mathbf{c}_D^T \cdot \mathbf{x}_D + d_D \cdot u$$

$$\mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_D = \begin{bmatrix} \frac{4}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad \mathbf{c}_D^T = [1 \quad -2] \quad d_D = 1$$



Es ist ganz deutlich zu erkennen, dass die Ein- und Ausgangssignalverläufe bei der Darstellung identisch sind. Somit ist zu erwarten, dass der Ausgang des Originalsystems gleich dem Ausgang des Diagonalsystems ist.

$$y(t) = y_D(t)$$

Da beide Ausgänge übereinstimmen müssen, kann beispielsweise genau diese Eigenschaft beider Systeme als Gütekriterium einer exakten Diagonaltransformation verwendet werden.

Um nun ein noch genaueres Bild zu bekommen, werden beide Systeme in ein BSB gelegt und die zugehörigen Sprungantworten in einem Scope betrachtet. Die

Vermutung liegt nahe einen identischen Verlauf des Eingangs und des Ausgangs zu erhalten. Wenn keine Übereinstimmung von $y(t) = y_D(t)$ zu verzeichnen ist, kann dieser Umstand hauptsächlich dreier Ursachen geschuldet sein.

1. Rundungsfehler⁹
2. fehlerhaftes Blockschaltbild¹⁰
3. Fehler bei der numerischen Integration

Im untersuchten Beispiel wird jedoch eine eindeutige Übereinstimmung beider Verläufe verzeichnet (siehe Abbildung 2.6: Sprungantworten beider Systeme).

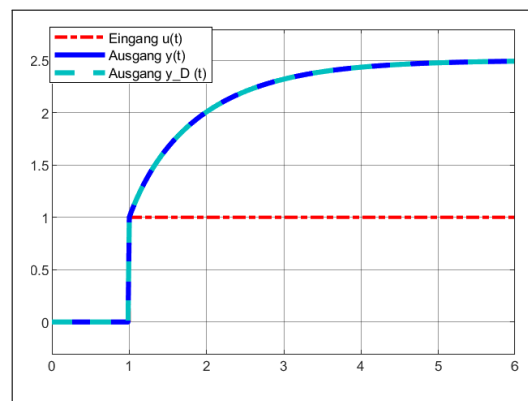


Abbildung 2.1: Sprungantworten beider Systeme

⁹beispielsweise bei der Transformationsberechnung

¹⁰entweder vom Original- oder vom transformierten System

Acknowledgements

The authors would like to thank Hannover School for Nanotechnology (hsn) Leibniz University Hannover (LUH) Laboratory of Nanotechnology and Quantum Engineering (LNQE), Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Renz Institute of Inorganic Chemistry (LUH) and Prof. Dr.-Ing. Robert Patzke University of Applied Sciences and Arts.

Literatur

- [1] Otto Föllinger u. a. *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 13., überarbeitete Auflage. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2022. 452 S. ISBN: 978-3-8007-5518-9.
- [2] Jan Lunze. *Regelungstechnik 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 978-3-662-52675-0 978-3-662-52676-7. DOI: 10.1007/978-3-662-52676-7. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-52676-7> (besucht am 07.02.2023).
- [3] Carolin Penke. “Efficient Algorithms for Solving Structured Eigenvalue Problems Arising in the Description of Electronic Excitations”. In: (2022). Unter Mitarb. von Universitäts-Und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt, Martin-Luther Universität und Peter Benner, xxi, 188 Seiten. DOI: 10.25673/86270. URL: <https://opendata.uni-halle.de/handle/1981185920/88222> (besucht am 07.02.2023).
- [4] Stefan Waldmann. *Lineare Algebra 2: Anwendungen und Konzepte für Studierende der Mathematik und Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022. ISBN: 978-3-662-63638-1 978-3-662-63639-8. DOI: 10.1007/978-3-662-63639-8. URL: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-63639-8> (besucht am 07.02.2023).
- [5] Serge Zacher und Manfred Reuter. *Regelungstechnik für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-658-17631-0 978-3-658-17632-7. DOI: 10.1007/978-3-658-17632-7. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-17632-7> (besucht am 07.02.2023).