

Technische Universität Dresden

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie

Masterarbeit

Titel

Untertitel

vorgelegt von: Martin P. Mustermann
geboren am: 1. Januar 1912 in Dresden

zum Erlangen des akademischen Grades

Master of Science

(M. Sc.)

Betreuer:

Betreuer 1

Betreuer 2

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. K. Röbenack

Tag der Einreichung:

2. Februar 2222

Bitte ersetzen Sie diese Seite vor dem Binden mit der Aufgabenstellung.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage dem Prüfungsausschuss der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik eingereichte Masterarbeit zum Thema

Titel

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, wurden als solche kenntlich gemacht.

Pirna, 1. Januar 2011

Martin P. Mustermann

Kurzfassung

An dieser Stelle fügen Sie bitte eine deutsche Kurzfassung ein.

Abstract

Please insert the English abstract here.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Modellbildung	3
2.1	Herleitung der Bewegungsgleichung	4
2.2	Cholesky-Zerlegung	6
3	Steuerungsentwurf	7
4	Visualisierungen	9
4.1	Animation	9
5	Erläuterungen zur Klasse ArbeitRST	11
5.1	Informationen zu schriftlichen Arbeiten am RST	11
5.2	Die Titelseite	11
5.3	Die Selbstständigkeitserklärung	12
5.4	Kurzfassung	12
5.5	Auswahl des Typs der Arbeit	12
5.6	Eingebundene Pakete	13
5.7	Zusätzliche Makros	13
5.8	Weitere Informationen	13
6	kurzer Titel	17
7	Beispielkapitel	19
7.1	Etwas Mathematik	20
	Literaturverzeichnis	22

Kapitel 1

Einleitung

In dieser Seminararbeit soll eine verfahrbare Pumpe zur Beförderung von flüssigem Beton, wie sie im Baubereich eingesetzt wird, aus regelungstechnischer Sicht untersucht werden. Eine solche Autobetonpumpe ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 1 – Autobetonpumpe mit ausgefahrenem Verteilermast, Quelle:
<http://www.trans-beton.de/images/picts/betonpumpe-004.jpg>

Als erstes soll ein dynamisches Modell für die Pumpe gefunden werden. Dann soll mit Hilfe von numerischen Berechnungen/Simulationen unter Verwendung der Programmiersprache Python der Steuerungsentwurf erfolgen. Alle Gelenkwinkel der Pumpe sollen dabei

möglichst exakt einer vorgegeben Solltrajektorie folgen. Beim Einsatz der Pumpe kommt es darüberhinaus zu starken Schwingungen, welche durch einen Regler verringert werden sollen.

Kapitel 2

Modellbildung

Die Anordnung soll als Mehrfachpendel modelliert werden. Die Masse der Armsegmente wird als konzentriert in den einzelnen Schwerpunkten angenommen. Die Durchbiegung eines Armsegments wird durch ein unaktuiertes Gelenk mit einer Federsteifigkeit k modelliert. Auf eine verteilparametrische Beschreibung soll verzichtet werden.

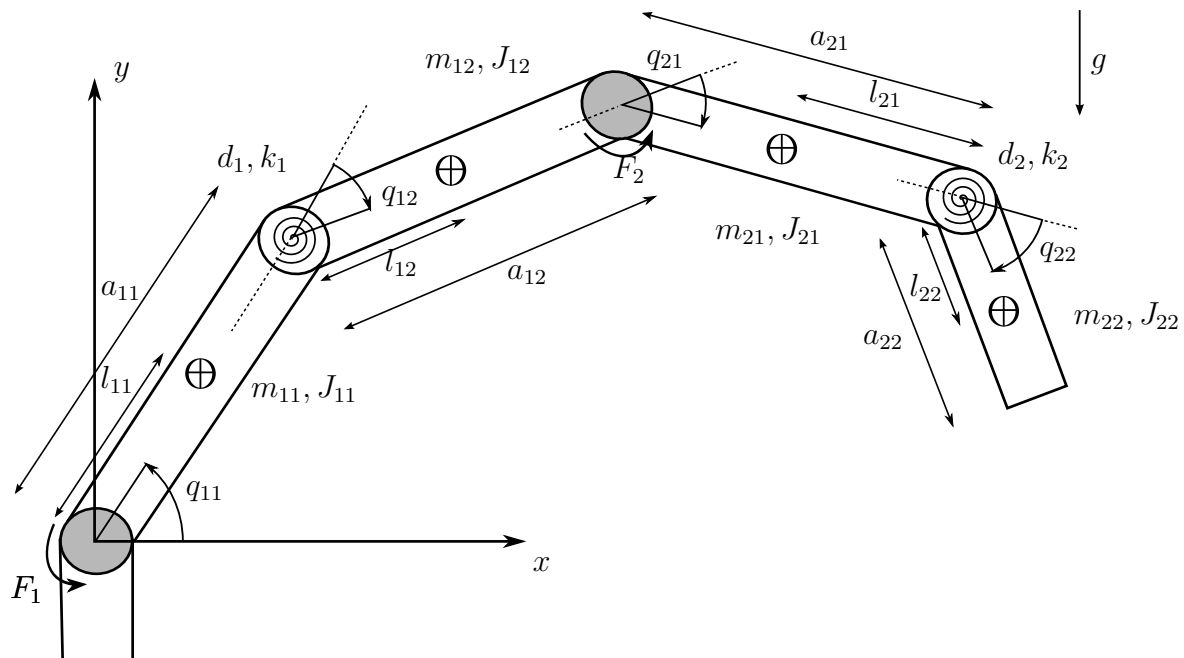


Abbildung 2 – Skizze des Modells für zwei Armsegmente und Durchbiegung

Abbildung 2 stellt das Modell eines Verteilmasts mit 2 Armsegmenten dar. Der erste Index beschreibt das physikalisch vorhandene i-te Armsegment des Verteilmasts. Der zweite Index nur für die Modellierung der Biegung vorhandene Unterteilung der einzelnen Segmente. Die aktuierten Gelenke sind in grau dargestellt. In diese werden äußere Momente F durch die hydraulische Antriebe eingeprägt. Die restlichen Gelenke dienen nur zur Modellierung der Biegung der Armsegmente. Alle Gelenke sind masselos. Es werden Relativwinkel zwischen den Segmenten verwendet.

2.1 Herleitung der Bewegungsgleichung

Ziel ist es die nichtlinearen Bewegungsgleichungen für ein Modell mit beliebig vielen Gelenkwinkel aufzustellen. Für die Herleitung der Bewegungsgleichung wird der Euler-Lagrange-Formalismus verwendet.

Zunächst werden geeignete Koordinaten für die Beschreibung der Schwerpunktlagen der Massen gesucht. Die Schwerpunkte der Teilmassen des i -ten Armsegments werden kartesisch beschrieben durch die Vektoren

$$\vec{x}_i = (x_{ij}, y_{ij})^T. \quad (2.1)$$

Die Gelenke sind über starre Stabelemente mit der Länge a_{ij} gekoppelt. Die Minimalkoordinaten des i -ten Armsegment entsprechen daher den Winkeln

$$\vec{q}_i = (q_{i1}, \dots, q_{ij})^T. \quad (2.2)$$

Die Euler-Lagrange-Gleichungen 2.Art lauten

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial \dot{q}_{ij}} - \frac{\partial L(\vec{q}, \dot{\vec{q}})}{\partial q_{ij}} = F_i - d_i \quad (2.3)$$

mit der Lagrange-Funktion

$$L(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) = T(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) - U(\vec{q}) \quad (2.4)$$

wobei T die kinetische Koenergie und U die potentielle Energie der Massen darstellt. Die kinetische Koenergie berechnet sich zu

$$T = \sum \left(\frac{1}{2} \cdot m_{ij} \cdot (v_{x,ij}^2 + v_{y,ij}^2) + \frac{1}{2} \cdot J_{ij} \cdot \omega_{ij}^2 \right). \quad (2.5)$$

Sie enthält einen translatorischen und einen rotatorischen Anteil.

Die potentielle Energie berechnet sich zu

$$U = \sum (m_{ij} \cdot g \cdot y_{ij} + k_i \cdot q_{ij}). \quad (2.6)$$

Die kartesischen Schwerpunktkoordinaten lassen sich über die bekannten Armsegmentlängen a_{ij} , Schwerpunktlängen l_{ij} und die Gelenkwinkel q_{ij} berechnen. Exemplarisch ergibt sich damit für die ersten zwei Masselemente aus Abbildung 2:

$$\begin{aligned} x_{11} &= l_{11} \cdot \cos(q_{11}) \\ y_{11} &= l_{11} \cdot \sin(q_{11}) \\ x_{12} &= a_{11} \cdot \cos(q_{11}) + l_{12} \cdot \cos(q_{11} - q_{12}) \\ y_{12} &= a_{11} \cdot \sin(q_{11}) + l_{12} \cdot \sin(q_{11} - q_{12}) \\ &\vdots \end{aligned}$$

Man erhält dabei durch Lösung von (2.3) ein System nichtlinearer Bewegungsgleichungen, welches die allgemeine Form

$$M(\vec{q}) \cdot \ddot{\vec{q}} + C(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) \cdot \dot{\vec{q}} + K \cdot \vec{q} + g(\vec{q}) = \vec{F} \quad (2.7)$$

hat.

Dabei stellt $M(\vec{q})$ die Massenmatrix, der Term $C(\vec{q}, \dot{\vec{q}})$ Zentrifugalkräfte, $K \cdot \vec{q}$ die elastischen Fesselungskräfte und $g(\vec{q})$ Gravitationskräfte dar.

Für Simulation muss (2.7) nach $\ddot{\vec{q}}$ umgestellt werden, da diese die Bewegungsgleichungen über eine numerische Integration löst.

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{\vec{q}} &= \vec{F} - C\dot{\vec{q}} - K\vec{q} - g \\ M^{-1} \cdot M\ddot{\vec{q}} &= M^{-1}(\vec{F} - C\dot{\vec{q}} - K\vec{q} - g) \\ \ddot{\vec{q}} &= M^{-1}(\vec{F} - C\dot{\vec{q}} - K\vec{q} - g) \end{aligned}$$

2.2 Cholesky-Zerlegung

In einer Anordnung von n seriellen Manipulatoren sind $2n$ -Freiheitsgrade, welche die Dimension von $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ beschreiben. Zur Umstellung des Gleichungssystems (2.7) ist die Inverse der Matrix notwendig. Bei der symbolischen Implementierungen ist an dieser Stelle ein sehr hoher Rechenaufwand zu erwarten. Jede Massenmatrix eines solchen mechanischen Systems ist symmetrisch ($\mathbf{M} = \mathbf{M}^T$) und positiv definit ($\forall \text{ EW} > 0$) [2]. Durch diese Eigenschaften lässt sich eine Cholesky-Zerlegung $\mathbf{M} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T$ (mit \mathbf{L} untere Dreiecksmatrix) durchführen [5]. Wenn man sich die Multiplikation

$$\begin{aligned} \mathbf{L}\mathbf{L}^T &= \begin{pmatrix} l_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 & & \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} & & \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ l_{2n1} & & & & l_{2n2n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} l_{11} & l_{21} & l_{31} & \cdots & l_{2n1} \\ 0 & l_{22} & l_{32} & & \\ 0 & 0 & l_{33} & & \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & & & & l_{2n2n} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} l_{11}^2 & l_{21}l_{11} & l_{31}l_{11} & \cdots \\ l_{21}l_{11} & l_{21}^2 + l_{22}^2 & l_{21}l_{31} + l_{22}l_{32} & \\ l_{31}l_{11} & l_{31}l_{21} + l_{32}l_{22} & l_{31}^2 + l_{32}^2 + l_{33}^2 & \\ \vdots & & & \ddots \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.8)$$

betrachtet, können durch einen Koeffizientenvergleich mit

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \cdots & m_{12n} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & & \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ m_{2n1} & & & & m_{2n2n} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

die Elemente l_{ij} mit $i, j = 1, 2, \dots, 2n$ folgender Maßen berechnet werden

$$l_{ij} = \begin{cases} 0, & j > i \\ \sqrt{m_{ii} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik}^2}, & i = j \\ \frac{1}{l_{jj}} \left(m_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik}l_{jk} \right), & i > j \end{cases} \quad (2.10)$$

An dieser Stelle ist zu erahnen, dass die Wurzel nur in jedem Fall reell gelöst werden kann, wenn die zuvor genannten Eigenschaften der Matrix gelten.

Die für die allgemeine Invertierung einer Matrix zu berechnende Determinante ist durch diese Zerlegung stark vereinfacht worden. Bei einer Dreiecksmatrix haben nur die Diagonalelemente der Matrix einen Einfluss, da alle anderen Summanden der Regel von Sarrus 0 ergeben. Außerdem gilt $\det(\mathbf{L}\mathbf{L}^T) = \det \mathbf{L} \cdot \det \mathbf{L}^T$. Die Multiplikation der Diagonalelemente von \mathbf{L} und der ihrer Transponierten sind identisch, so dass $\det(\mathbf{L}\mathbf{L}^T) = (\det \mathbf{L})^2$ ist.

Kapitel 3

Steuerungsentwurf

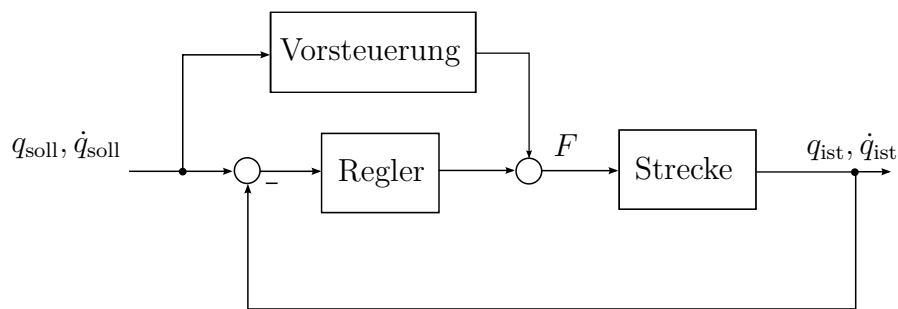


Abbildung 3 – Regelkreis

Planung einer Trajektorie. Allg Darstellung als Polynom n-ten Grades

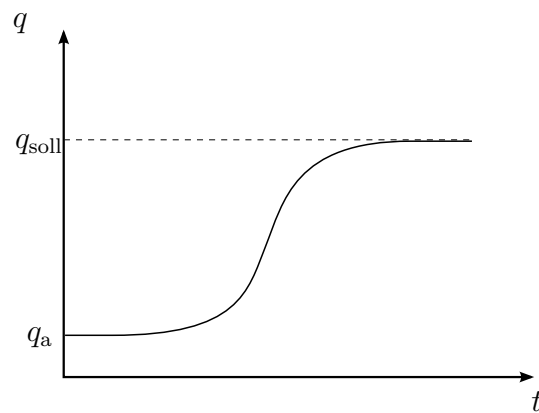


Abbildung 4 – Trajektorie

$$q_{\text{traj}}(t) = a_n t^n + \dots + a_1 t + a_0 \quad (3.1)$$

Randbedingungen

$$\begin{aligned} q(T_0) &= q_a & q(T_1) &= q_{\text{soll}} \\ \dot{q}(T_0) &= 0 & \dot{q}(T_1) &= 0 \\ \ddot{q}(T_0) &= 0 & \ddot{q}(T_1) &= 0 \end{aligned}$$

damit lässt sich ein lineares Gleichungssystem mit 6 Gleichungen aufstellen. Es ergibt sich also ein Polynom 6. Grades.

Mit Hilfe der ermittelten Trajektorie für die Gelenkwinkel und der ersten und zweiten Ableitung, die berechnet werden können, können mit (2.7) die erforderlichen Momente berechnet werden, welche die Motoren aufbringen müssen.

$$F_{\text{Vorst}} = M(\vec{q}_{\text{traj}}) \cdot \ddot{\vec{q}}_{\text{traj}} + C(\vec{q}_{\text{traj}}, \dot{\vec{q}}_{\text{traj}}) \cdot \dot{\vec{q}}_{\text{traj}} + K \cdot \vec{q}_{\text{traj}} + g(\vec{q}_{\text{traj}}) \quad (3.2)$$

Die folgende Abbildung zeigen die Simulationsergebnisse bei Verwendung einer reinen Steuerung bei vier vorhandenen Gelenkwinkel, von denen zwei aktuiert sind.

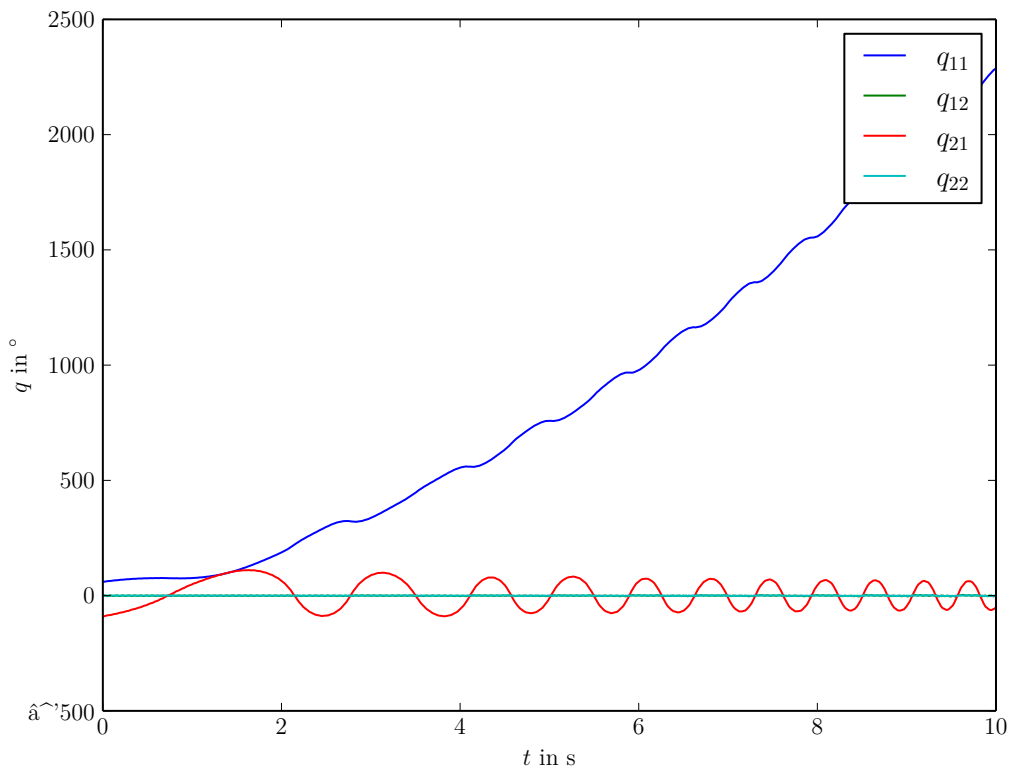


Abbildung 5 – Verlauf der Gelenkwinkel bei Verwendung einer Vorsteuerung, kein Regler vorhanden

Es wurde kein Regler verwendet

Kapitel 4

Visualisierungen

Diverse Daten - beispielsweise Simulationsergebnisse - erfordern eine geeignete Aufbereitung und ansprechende Darstellung. In diesen Darstellungen können Zusammenhänge zwischen verschiedenen abhängigen Größen gezeigt werden, oder mit anderen verglichen werden. Bei dynamischen Systemen sind oft die Zeitverläufe der Systemgrößen von Interesse, die für Analysen in Diagrammen gezeigt werden können. Für einen Überblick über das Verhalten eines Systems bieten sich darüber hinaus Animationen an.

In dem folgenden Abschnitt werden einige Erläuterungen zu der Animation der mobilen Betonpumpe gegeben. Bei sämtlichen abgebildeten Diagrammen stehen alle notwendigen Anmerkungen an den entsprechenden Stellen, so dass hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

4.1 Animation

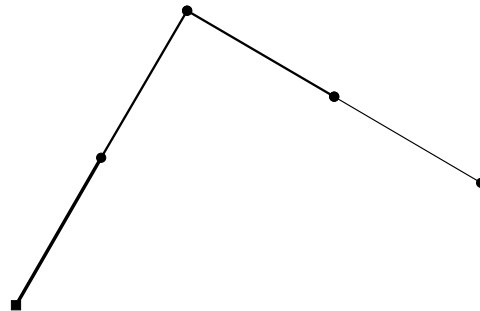


Abbildung 6 – Animationsgrafik von 2 Gliedern (Auslegern) einer mobilen Betonpumpe

In der Abbildung 6 sind zwei Glieder einer mobilen Betonpumpe mit zwei Auslegern abgebildet. Beide Träger wurden in der Modellbildung durch ein elastisches Knickgelenk in ihrer Mitte den realen Gegebenheiten angenähert. An dieser Stelle treten die unerwünschten Effekte auf, die es im späteren gilt zu verringern.

Kapitel 5

Erläuterungen zur Klasse ArbeitRST

In den folgenden Abschnitten werden einige Erläuterungen zur \LaTeX -Dokumentenklasse `ArbeitRST.cls` gegeben werden. Diese basiert auf der Klasse `scrbook` aus dem KOMA-Script-Paket und kann daher mit Hilfe der Methoden aus diesem Paket modifiziert werden. Für nähere Informationen dazu sei auf die KOMA-Script-Anleitung¹ und die Website

<http://www.komascript.de/>

verwiesen.

Die wesentlichsten Änderungen gegenüber der ursprünglichen Klasse bestehen in einer angepassten Titelseite und der hinzugefügten Selbstständigkeitserklärung.

5.1 Informationen zu schriftlichen Arbeiten am RST

Informieren Sie sich in der für Sie relevanten Prüfungsordnung über die *Anzahl der geforderten Exemplare* die eingereicht werden müssen. Bitte beachten Sie, dass jedes dieser Exemplar die *Aufgabenstellung* enthalten muss. Lassen Sie diese bitte beim Binden zwischen der Titelseite und der Selbstständigkeitserklärung einfügen. Eines der Exemplare muss dabei das *originale*, vom Vorsitzenden des Prüfungsausschusses und dem verantwortlichen Hochschullehrer unterzeichnete, Dokument enthalten, bei den restlichen genügen Kopien. Bitte beachten Sie, dass die Arbeit *einseitig* ausgedruckt werden muss. Ausschlaggebend für die fristgemäße Einreichung ist die *Bestätigung des Prüfungsamtes*. Informieren Sie sich daher im *Vorfeld* über die Öffnungszeiten am Abgabetag. Sollte das Prüfungsamt geschlossen haben, ist es in der Regel möglich mit den Mitarbeitern eine individuelle Vereinbarung zu treffen.

5.2 Die Titelseite

Die Titelseite kann über die in Tabelle 1 angegebenen Befehle angepasst werden.

¹Diese kann unter der URL <http://www.ctan.org/pkg/koma-script> heruntergeladen werden.

Tabelle 1 – Befehle zum Anpassen der Titelseite

Befehl	Bedeutung
<code>\author</code>	legt den Namen des Autors der Arbeit fest
<code>\geburtsdatum</code>	legt das Geburtsdatum des Autors fest
<code>\geburtsort</code>	legt das Geburtsort des Autors fest
<code>\title</code>	legt den Titel der Arbeit fest
<code>\subtitle</code>	legt den Untertitel der Arbeit fest
<code>\betreuer</code>	fügt einen Betreuer hinzu
<code>\date</code>	legt das Einreichungsdatum der Arbeit fest – wird dieser Befehl nicht aufgerufen wird standardmäßig das zum Kompilationszeitpunkt eingestellte Systemdatum verwendet.

5.3 Die Selbstständigkeitserklärung

In der Selbstständigkeitserklärung werden automatisch der Typ der Arbeit, ihr Titel sowie der Name des Autors übernommen. Der Ort kann über den Befehl `\selbstort` geändert werden, wobei standardmäßig „Dresden“ verwendet wird. Das Datum ist standardmäßig identisch zum Einreichungsdatum, kann aber mit dem Befehl `\selbstdatum` geändert werden.

5.4 Kurzfassung

Eine Kurzfassung der Arbeit kann mit dem Befehl `\kurzfassung{deutsch}{englisch}` eingefügt werden. Das erste Argument entspricht dabei der deutschen, das zweite der englischen Version.

5.5 Auswahl des Typs der Arbeit

Zur Auswahl des Typs der Arbeit steht die Klassenoption `arbeit` zur Verfügung. Mit dieser können sie zwischen Diplom-, Master- und Studienarbeit sowie dem Bericht zum Forschungspraktikum auswählen:

Tabelle 2 – Auswahl des Typs der Arbeit mittels Klassenoptionen

Diplomarbeit	<code>\documentclass[arbeit=diplom]{ArbeitRST}</code>
Masterarbeit	<code>\documentclass[arbeit=master]{ArbeitRST}</code>
Studienarbeit	<code>\documentclass[arbeit=studie]{ArbeitRST}</code>
Bericht zum Forschungspraktikum	<code>\documentclass[arbeit=forsch]{ArbeitRST}</code>

5.6 Eingebundene Pakete

In der Dokumentenklasse werden bereits einige L^AT_EX-Pakete geladenen. Davon sind die zum Verfassen einer Arbeit möglicherweise relevanten in der Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3 – Auswahl eingebundener Pakete

amsmath, amssymb, amsfonts, amsthm	Pakete zum Satz mathematischer Formeln, Dokumentation finden sie unter http://www.ams.org/publications/authors/tex/amslatex ,
booktabs	besonders empfehlenswert ist der „Short Math Guide for L ^A T _E X“ ermöglicht das Setzen „schöner“ Tabellen, Dokumentation unter http://ctan.org/pkg/booktabs
cite	verbessert einige Aspekte des Zitierens, Dokumentation unter http://ctan.org/pkg/cite
caption, subcaption	Pakete zum Anpassen der Unter- und Überschriften von Tabellen, Grafiken etc., Dokumentation unter http://ctan.org/pkg/caption http://ctan.org/pkg/subcaption

Neben diesen Paketen wird das Paket `hyperref` (<http://ctan.org/pkg/hyperref>) zur farbigen Hervorhebung von Verweisen, Links etc. eingebunden. Bitte deaktivieren Sie diese Markierungen vor dem Ausdrucken mit Hilfe des Befehls

`\hypersetup{hidelinks}`.

5.7 Zusätzliche Makros

In die Dokumentenklasse `ArbeitRST` wurden einige Makros aufgenommen, die sich bei der Arbeit mit L^AT_EX als nützlich erwiesen haben.

Neben diesen Makros wurden Umgebungen zum Erzeugen von Definitionen (`definition`), Beispielen (`beispiel`), Lemmata (`lemma`) und Bemerkungen (`bemerkung`) definiert.

5.8 Weitere Informationen

Da L^AT_EX seine Funktionalität im wesentlichen durch frei verfügbare Pakete erhält, ist es günstig eine Distribution zu installieren, die bereits die wesentlichen Pakete enthält und das Hinzufügen weiterer Pakete vereinfacht. Für Windows existiert beispielsweise MiKTeX (<http://miktex.org/>) und für Linux TeX Live (<http://www.tug.org/texlive/>). Zum Erstellen von L^AT_EX-Dokumenten unter Windows hat sich das Programm TeXnicCenter (<http://www.texniccenter.org/>), vor allem in Verbindung mit dem Sumatra PDF-Betrachter (<http://blog.kowalczyk.info/software/sumatrapdf>), als sehr nützlich erwiesen. Unter Linux gilt dasselbe für das Programm Kile (<http://kile.sourceforge.net>).

Tabelle 4 – Zusätzliche Makros und Umgebungen

Syntax	Ausgabe	Beschreibung
<code>\vect{a}</code>	<i>a</i>	Umschaltung auf fette Schriftart im Mathemodus – oft für Vektoren genutzt
<code>\diag(a,\ldots,z)</code>	$\text{diag}(a, \dots, z)$	Nützlich zur Definition von Diagonalmatrizen
<code>\diff[n]{q}{t}</code>	$\frac{d^n q}{dt^n}$	Ableitungen darstellen
<code>\partiell[n]{q}{t}</code>	$\frac{\partial^n q}{\partial t^n}$	partielle Ableitungen darstellen
<code>\Reals</code>	\mathbb{R}	Körper der reellen Zahlen
<code>\Compl</code>	\mathbb{C}	Körper der komplexen Zahlen
<code>\Real(a)</code>	$\Re(a)$	Realteil von a
<code>\Imag(a)</code>	$\Im(a)$	Imaginärteil von a
<code>\norm{a}</code>	$\ a\ $	Norm von a
<code>\abs{a}</code>	$ a $	Betrag von a
<code>\skalprod{a}{b}</code>	$\langle a, b \rangle$	Skalarprodukt von a und b
<code>\grad(a)</code>	$\text{grad}(a)$	Gradient von a
<code>\div(a)</code>	$\text{div}(a)$	Divergenz von a

Tabelle 5 – Beispiele der vordefinierten Umgebungen

Syntax	Ausgabe
<code>\begin{definition}[Beispiel]</code> Beispiel für eine Definitionsumgebung <code>\end{definition}</code>	Definition 5.1 (Beispiel). <i>Beispiel für eine Definitionsumgebung</i>
<code>\begin{beispiel}[Beispiel]</code> Beispiel für eine Beispielumgebung <code>\end{beispiel}</code>	Beispiel 5.1 (Beispiel). <i>Beispiel für eine Beispielumgebung</i>
<code>\begin{lemma}[Beispiel]</code> Beispiel für eine Lemmaumgebung <code>\end{lemma}</code>	Lemma 5.1 (Beispiel). <i>Beispiel für eine Lemmaumgebung</i>
<code>\begin{bemerkung}[Beispiel]</code> Beispiel für eine Bemerkungsumgebung <code>\end{bemerkung}</code>	Bemerkung 5.1 (Beispiel). <i>Beispiel für eine Bemerkungsumgebung</i>

[net/](http://jabref.sourceforge.net/)). Zum Erstellen und Verwalten von Bibtex-Dateien wurden gute Erfahrungen mit JabRef (<http://jabref.sourceforge.net/>) gemacht. Es existieren zahlreiche Bücher zum Umgang mit \LaTeX , von denen an dieser Stelle nur [4] aufgeführt wird.

Kapitel 6

Ausführlicher Kapiteltitel, der wirklich viel zu lang für das Inhaltsverzeichnis in dieser Dokumentvorlage ist

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben.

Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Kapitel 7

Beispielkapitel

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein.

Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

7.1 Etwas Mathematik

L^AT_EX eignet sich in besonderem Maße zum Setzen von mathematischen Formeln. Eine einzelne Formel erhalten Sie mit der `equation`-Umgebung:

$$1 + e^{i\pi} = 0. \tag{7.1}$$

Bitte beachten Sie, dass Formeln Teil des Satzes sind und somit mit den entsprechenden Satzzeichen versehen werden müssen. In der Regel genügt es für eine Gleichung nur dann eine Nummer zu vergeben, wenn Sie später auch auf diese verweisen. Um auf die Nummer einer Gleichung zugreifen zu können verwenden Sie den Befehl `eqref`:

... wie in Gl. (7.1) gezeigt....

Möchten Sie verhindern, dass eine Gleichung nummiert wird, verwenden Sie die `equation*`-Umgebung:

$$E + F - K = 2.$$

Für Gleichungssysteme bietet sich die `align`- bzw. `align*`-Umgebung an, wobei bei letzterer keine Gleichungsnummern ausgegeben wird:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{7.2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}. \tag{7.3}$$

Alternativ können Sie auch eine `aligned`-Umgebung verwenden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \tag{7.4}$$

Mit Hilfe der `subequations`-Umgebung lassen sich die Nummern der einzelnen Gleichungen eines Systems vereinheitlichen:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} = 0 \tag{7.5a}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(gh + \frac{u^2}{2} \right) = 0. \tag{7.5b}$$

Die `subequations`-Umgebung funktioniert auch zusammen mit mehreren einzelnen Gleichungen:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} = 0 \tag{7.6a}$$

und

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(gh + \frac{u^2}{2} \right) = 0. \quad (7.6b)$$

Literaturverzeichnis

- [1] FLIESS, M., J. LÉVINE, P. MARTIN und P. ROUCHON: *Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples*. International Journal of Control, 61(6):1327–1361, 1995.
- [2] JANSCHKE, K.: *Systementwurf mechatronischer Systeme: Methoden – Modelle – Konzepte*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] MIKUSIŃSKI, J.: *Operatorenrechnung*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1957.
- [4] MITTELBACH, F. und M. GOOSENS: *Der L^AT_EX-Begleiter*. Pearson Studium, 2. Aufl., 2005.
- [5] SCHWARZ, H. und N. KÖCKLER: *Numerische Mathematik*. Vieweg Studium. Vieweg+Teubner Verlag, 2009.