

Beschreibung des Rechenprogramms

FR_calc

zum Buch

Flugregelung

3. Auflage

von **Rudolf Brockhaus, Wolfgang Alles, Robert Luckner**

Erstellt durch: Prof. Dr.-Ing. Robert Luckner
Dipl.-Ing. Andrej Schönfeld
Alexander Köthe, B.Sc.
cand.-Ing. Fadi Bitar

Datum: 31. Oktober 2011

Version: 1.0

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Nutzung des Programmes	3
2.1	Notwendige Dateien	3
2.2	Bedienung des Programms	3
2.2.1	Berechnung eines Flugzeugs	4
2.2.2	Berechnung aller Flugzeuge	6
2.3	Abgespeicherte Daten	6
3	Programmaufbau	8
3.1	Aufbau der einzelnen Dateien	8
3.2	Programmablauf von FR_calc	8
3.3	Beschreibung der einzelnen Funktionen	11
3.3.1	Hauptprogramm FR_calc.m	11
3.3.2	calc_AlleFlugzeuge.m	12
3.3.3	get_Derivative.m	13
3.3.4	select_Flugzeug.m	13
3.3.5	calc_Ersatzgroessen.m	14
3.3.6	calc_Zustandsraum.m	15
3.3.7	calc_Uebertragungsfunktion.m	16
3.3.8	calc_Eigenwerte.m	18
3.3.9	calc_Sprungantworten.m	19
3.3.10	calc_WOK.m	20

1 Einführung

Mit dem MATLAB-Programm `FR_calc` zur 3. Auflage des Buches Flugregelung können für die im Anhang gegebenen Daten von sechs Beispielflugzeugen folgende Größen berechnet werden

- Ersatzgrößen,
- Matrizen \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} und \underline{D} der Zustandsraumdarstellung,
- Eigenwerte,
- Frequenzgänge,
- Wurzelortskurven und
- Zeitantworten.

Das Programm ist mit der MATLAB-Version R2010b getestet wurden. Der Quellcode ist kommentiert. Zum Verwenden des Codes mit anderen MATLAB-Versionen oder in anderen Computer Algebra Systemen, wie beispielsweise SciLab oder Octave können Änderungen erforderlich sein.

Das Rechenprogramm kann vom Benutzer verändert werden, beispielsweise Parameterstudien an den Beispielflugzeugen durchzuführen oder Daten von anderen Flugzeugen einzugeben und für diese die oben genannten Größen berechnen zu lassen. Die einzelnen Funktionen können außerdem in selbstgeschriebene Programme eingebunden werden.

Diese Dokumentation besteht aus zwei Hauptkapiteln. Im ersten Kapitel wird die Benutzung des Tools erklärt (User Manual). Das zweite Kapitel erklärt den strukturellen Aufbau des Quellcodes, so dass einzelne Elemente für eigene Berechnungen genutzt werden können (Programmers Manual).

Der Quellcode ist ausschließlich zur nicht-kommerziellen Nutzung vorgesehen. Jede gewerbliche oder kommerzielle Nutzung des Quellcodes bedarf der Genehmigung der Autoren.

Kommentare und Fragen können mit dem Kontaktformular, das auf der Internetseite <http://www.fmra.tu-berlin.de/menue/service/buch-flugregelung/kontaktformular/> zu finden ist, an die Autoren geschickt werden.

Bitte beachten Sie, dass es in MATLAB zu Fehlermeldungen in Hinblick auf Java kommen kann. Dies liegt an der gewählten Bildschirmauflösung bei der Erzeugung von

Plots. Die Autoren sind der Lösung des Problems nachgegangen, haben jedoch keine zufriedenstellende Lösung gefunden. Eine Erhöhung des *Java Heaps* in den MATLAB *Preferences* verschaffte teilweise Abhilfe, teilweise trat der Fehler trotzdem auf.

2 Nutzung des Programmes

In diesem Unterkapitel wird beschrieben, wie das Programm bedient und genutzt werden kann. Hierzu werden alle zum Programm gehörenden Dateien benannt, es wird auf die Ausführung des Programms eingegangen und es werden die vom Programm erzeugten Dateien beschrieben.

2.1 Notwendige Dateien

In der folgenden Tabelle sind alle notwendigen MATLAB-Funktionen und ihre Bedeutung aufgelistet.

Datei	Bedeutung
FR_calc.m	Hauptprogramm zum Buch Flugregelung
get_Derivative.m	Flugzeug- und Zustandsdaten bereit stellen
select_Flugzeug.m	Unterprogramm zur Auswahl eines speziellen Flugzeugtyps
calc_AlleFlugzeuge.m	Unterprogramm mit Schleife zur Berechnung aller Flugzeuge
calc_Ersatzgroessen.m	Unterprogramm zur Berechnung der Ersatzgrößen
calc_Zustandsraum.m	Unterprogramm zur Berechnung des Zustandsraumgrößen
calc_Uebertragungsfunktion.m	Unterprogramm zur Berechnung der Übertragungsfunktionen
calc_Eigenwerte.m	Unterprogramm zur Berechnung der Eigenwerte und Eigenvektoren
calc_Sprungantworten.m	Unterprogramm zur Berechnung der Sprungantworten
calc_WOK.m	Unterprogramm zur Darstellung von Wurzelortskurven

2.2 Bedienung des Programms

Der Nutzer kopiert die in Abschnitt 2.1 aufgeführten Dateien in einen Ordner seiner Wahl. Anschließend wird MATLAB geöffnet und die Datei `FR_calc.m` ausgeführt. Es erscheint im Befehlseingabefenster (Command Window) die folgende Anzeige:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                                                                 %
% Technische Universität Berlin – Fakultät V                    %
% Institut für Luft- und Raumfahrttechnik                     %
% Fachgebiet Flugmechanik, Flugregelung und Aeroelastizität %
% Prof. Dr.–Ing. Robert Luckner                               %
%                                                                 %
% Rechenprogramm FR_calc zur Berechnung von Ersatzgrößen, Zustands- %
% raumdarstellung, Eigenwerte, Frequenzgänge, Wurzelortskurven und %
% Zeitantworten für die im Buch Flugregelung (Anhang) gegebenen Daten %
% ----- %
%                                                                 %
% Autoren:           Prof. Dr.–Ing. Robert Luckner            %
%                   Dipl.–Ing. Andrej Schönfeld              %
%                   Alexander Köthe, B.Sc.                   %
%                   cand.–Ing. Fadi Bitar                     %
%                                                                 %
% Version :         1.0                                       %
%                                                                 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Hauptmenü
-----

1 – Ein Flugzeug berechnen
2 – Alle Flugzeuge berechnen
3 – Programm beenden

Bitte treffen Sie Ihre Auswahl :

```

Dies ist das Hauptmenü des Programmes. Der Nutzer kann zwischen folgenden Möglichkeit zu wählen:

1. Nur ein Beispielflugzeug berechnen oder
2. Alle Beispielflugzeuge in Längs- und Seitenbewegung in allen Flugzuständen in einem Durchlauf berechnen oder
3. das Programm beenden.

2.2.1 Berechnung eines Flugzeugs

Nach der Auswahl des Punktes 1 (Ein Flugzeug berechnen) im Hauptmenü erscheint eine Abfrage, welcher Flugzeugtyp berechnet werden soll:

Flugzeugauswahl

- A – Airbus A300
- B – Boeing 707
- C – Concorde
- D – Dornier Do328
- F – Lockheed F104G
- Q – Programm beenden

Bitte wählen Sie ein Flugzeug aus [A–D,F] oder beenden Sie das Programm [Q] :

Nachdem der Nutzer die Auswahl des Flugzeugtyps getroffen hat, wird ein neuer Ordner mit der Bezeichnung des Flugzeugtyps in dem Verzeichnis angelegt, aus dem das Plot Tool gestartet wurde. Danach erfolgt eine Abfrage, ob die Daten für die Längs- oder Seitenbewegung erzeugt werden sollen:

Auswahl der Bewegungsform

- 1 – Längsbewegung
- 2 – Seitenbewegung
- 3 – Ende

Bitte wählen Sie eine Bewegungsform [1–2] oder beenden Sie das Programm [3] :

Als nächstes wird der Flugzustand ausgewählt, für den die Berechnungen durchgeführt werden sollen. Die verschiedenen Flugzeugstände sind im Anhang des Buches Flugregelung für verschiedene Flugzeugtypen angegeben. Die Auswahl des Flugzustandes geschieht mit folgenden Menü (beispielhaft für die Boeing 707):

Auswahl des Flugzustandes

- 1 – B1 – Landeanflug Boeing 707 (Fahrwerk ausgefahren)
- 2 – B2 – Warteflug Boeing 707
- 3 – B3 – Reiseflug Boeing 707
- 4 – Ende

Bitte wählen Sie einen Flugzustand [1–3] oder beenden Sie das Programm [4] :

Danach beginnt die Berechnung, deren Fortschritt beim Berechnen von Ersatzgrößen, Zustandsraumdarstellung, Eigenwerte, Frequenzgänge (Bodediagramme), Wurzelortskurven und Zeitantworten im Command Window verfolgt werden kann. Bei allen Funktionen wird abgefragt, ob sie grafisch dargestellt werden sollen. Wenn die Plots direkt betrachtet oder als JPEG Grafik abgespeichert werden sollen, sollte die Frage bejaht werden. Bei Fortsetzung des Programms mit einer beliebigen Taste, werden alle Plots geschlossen.

Alle erzeugten Daten werden in dem angelegten Order hinterlegt. In diesem Ordner befindet sich ein Unterordner **Grafiken**, in dem die erzeugten Plots abgespeichert werden. Eine genaue Auflistung der gespeicherten Daten erfolgt in Abschnitt 2.3. Nach Abschluss der Berechnung gelangt der Nutzer wieder in das Hauptmenü.

2.2.2 Berechnung aller Flugzeuge

Wird im Hauptmenü vom Nutzer der Punkt 2 (Alle Flugzeuge berechnen) gewählt, so werden alle Flugzeuge in Längs- und Seitenbewegung mit allen zugehörigen Flugzuständen berechnet. Der Umgang mit den Plots erfolgt gleichermaßen wie in Abschnitt 2.2.

2.3 Abgespeicherte Daten

Im neu angelegten Ordner werden die berechneten Daten in **mat**-Dateien abgelegt, die der Nutzer weiter verwenden kann. Grundsätzlich werden 4 Dateien pro Flugzeug, Bewegungsform und Flugzustand abgespeichert. Werden alle Flugzeuge (5) in allen Bewegungsformen (2) und Flugzuständen (3) berechnet, werden 120 Dateien ausgegeben. Einen Überblick über die Dateien gibt die folgende Tabelle:

Dateiname	Inhalt(e)
A_B_Eigenverhalten.mat	Eigenwerte Eigenvektoren
A_B_Ersatzgroessen.mat	Ersatzgrößen
A_B_Zustandsraum.mat	Systemmatrizen A,B,C,D
A_B_Übertragungsfunktionen.mat	Übertragungsfunktionen
A_B_Sprungantworten.mat	Sprungantworten

Die Bezeichnung A und B stehen für Flugzustand und Bewegungsform. A gibt die Kurzbezeichnung (Bsp. A1, C2, F3) an, die im Anhang des Buches verwendet wird. B gibt die Bewegungsform an. Dabei steht LB für die Längsbewegung und SB für die Seitenbewegung. Durch diese Zuordnung ist eine spätere Verwendung der erzeugten Ausgabedateien problemlos durch den Nutzer möglich.

Ein Beispiel für einen Dateinamen ist `A1_LB_Eigenverhalten.mat`.

Die erzeugte Plots werden im JPEG Format mit einer Auflösung von 200 DPI abgespeichert. Die Einstellung der Auflösung und des Speicherformates sind im Quelltext änderbar.

Zusätzlich zu den einzelnen MATLAB-Dateien wird bei Berechnung aller Flugzeuge ein \LaTeX -Dokument erzeugt, in dem die Ersatzgrößen aufgelistet sind. Diese Dokument kann mit Hilfe von \LaTeX ¹ in ein PDF-Dokument überführt werden.

¹ \LaTeX kann über die Internetseite <http://miktex.org/> kostenlos bezogen werden

3 Programmaufbau

Dieses Kapitel beschreibt den Programmaufbau des Rechenprogrammes `FR_calc.m`, um dem Nutzer Modifikationen oder die Verwendung einzelner Routinen in eigenen Programmen zu ermöglichen. Im ersten Teil des Kapitels wird der Datenfluss innerhalb des Tools beschrieben. Danach erfolgt eine Beschreibung der einzelnen Subroutinen.

3.1 Aufbau der einzelnen Dateien

MATLAB Skript Dateien (m-Dateien) im Rechenprogramm `FR_calc` beinhalten neben den Hauptfunktionen noch Hilfsfunktionen, welche die Hauptfunktion bei der Durchführung der Berechnung unterstützen. Der Aufbau einer m-Datei ist in Abbildung 3.1 am Beispiel der Datei `calc_Zustandsraum.m` dargestellt.

3.2 Programmablauf von `FR_calc`

In Abbildung 3.2 ist der Datenfluss innerhalb von `FR_calc` dargestellt. Dabei wird vorausgesetzt, dass entweder alle Flugzeuge mit der Funktion `calc_AlleFlugzeuge` berechnet werden oder ein Flugzeug mit Bewegungsform und Flugzustand in der Funktion `select_Flugzeug` ausgewählt wurde. Die Datei `get_Derivative.m` enthält alle erforderlichen Flugzeug- und Flugzustandsdaten. Es sind dieselben Daten, die im Anhang des Buches angegeben sind. Um die Verwendung in möglichst vielen MATLAB-Versionen zu ermöglichen, wurden keine `mat`-Dateien für die Eingabe verwendet. Die eingelesenen Daten werden als Strukturen `AC` und `FZ` im Workspace gespeichert

Je nach gewählten Flugzeugtyp und Flugzustands werden die gewählten Werte aus der im Workspace gespeicherten Struktur eingelesen und an die Funktion `calc_Ersatzgroessen.m` übergeben. Diese Funktion berechnet die flugmechanischen Ersatzgrößen mit den Formeln, die im Anhang A1 des Buches stehen. Im Fall, dass alle Flugzeugtypen in allen Bewegungsformen und allen Flugzuständen berechnet werden, erfolgt zusätzlich zu Abspeicherung der Ersatzgrößen als `mat`-Datei (vgl. Abschnitt 2.3) eine Ausgabe als PDF-Dokument.

Die Funktion `calc_Zustandsraum` berechnet aus den Ersatzgrößen die Zustandsraummatrizen und speichert diese als *state space* ab. Außerdem werden die Namen für die Zustände selbst und die Eingabegrößen in der `mat`-Datei gespeichert (vgl. Abschnitt 2.3).

Die Funktion `calc_Eigenwerte` bestimmt die Eigenwerte und Eigenvektoren aus der Zustandsmatrix A . Sind diese Daten berechnet, können die Pole und Nullstellen in

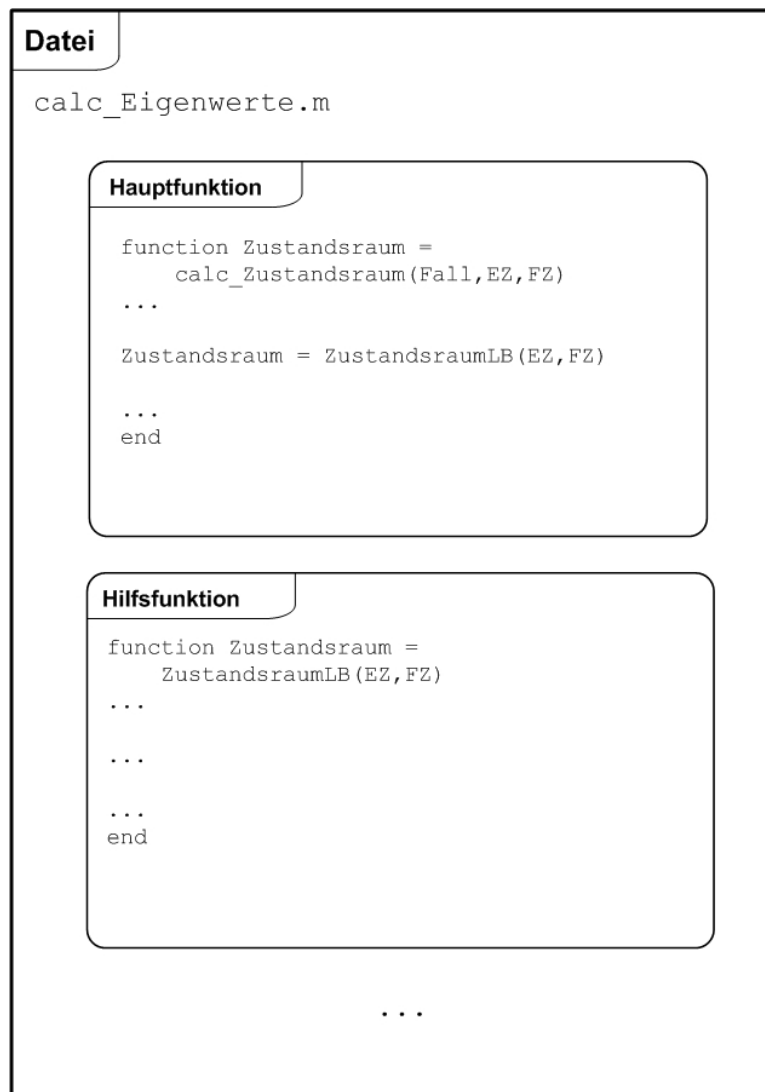


Abb. 3.1: Aufbau einer m-Datei am Beispiel von `calc_Zustandsraum.m`

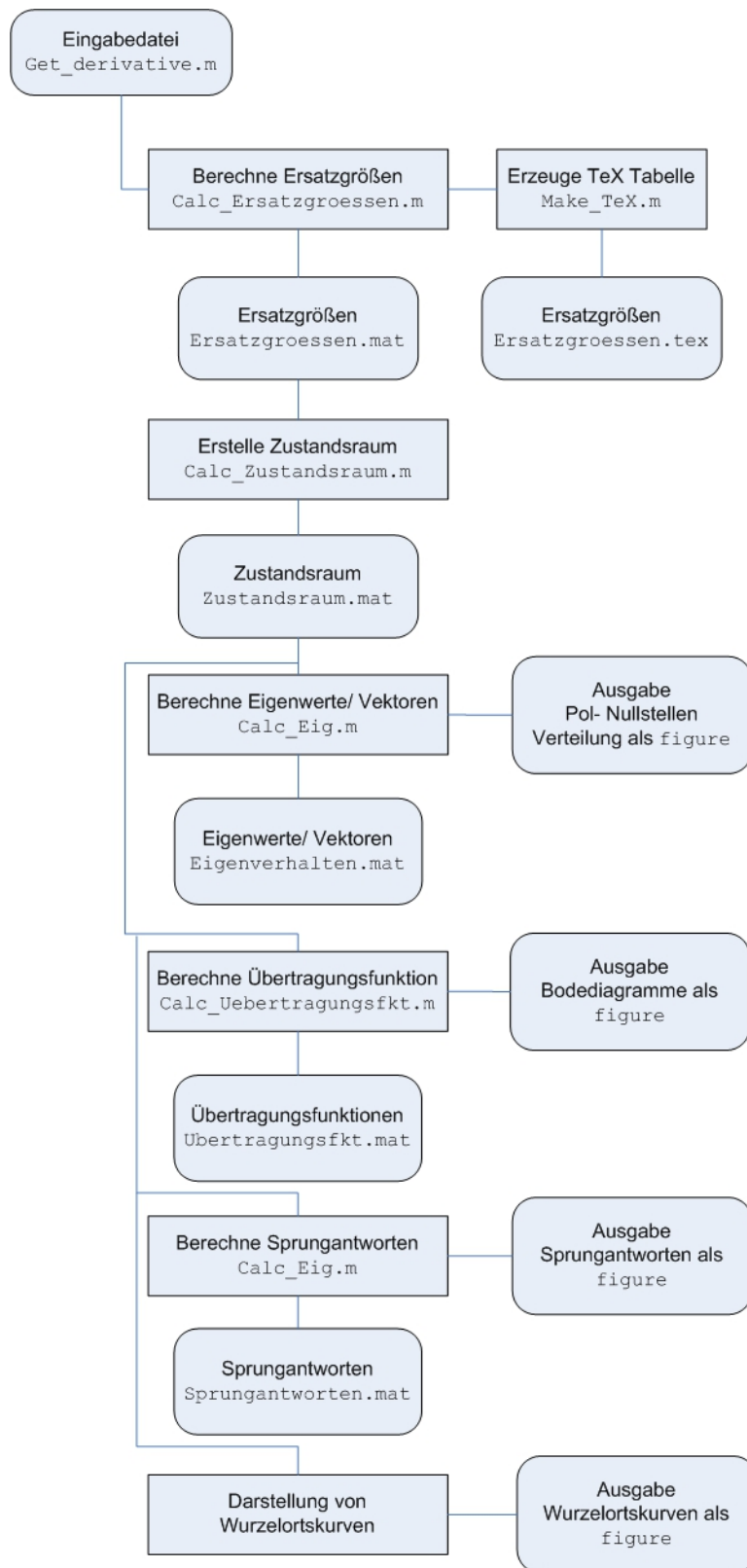


Abb. 3.2: Datenfluss von FR_calc

der komplexen Zahlenebene dargestellt werden. Eigenwerte und Eigenvektoren werden wiederum als `mat`-Datei gespeichert (vgl. Abschnitt 2.3).

In der Funktion `calc_Uebertragungsfunktionen` werden die Übertragungsfunktionen erzeugt. Diese werden als Datentyp *transfer function* abgespeichert und in einer `mat`-Datei hinterlegt (vgl. Abschnitt 2.3).

Die vorletzte Funktion `calc_Sprungantworten` bestimmt die Sprungantworten auf Änderungen der Steuergrößen. Die Sprungantworten werden in einer Struktur als `mat`-Datei abgespeichert (vgl. Abschnitt 2.3). Sie können als Zeitverlauf grafisch dargestellt werden. Ein kürzerer Zeitschritt zeigt das Kurzzeitverhalten und ein längerer Zeitschritt das Langzeitverhalten.

Die Unterroutine `calc_WOK` erzeugt die Wurzelortskurven. Die Ergebnisse werden nicht abgespeichert. Es ist eine graphische Ausgabe der Wurzelortskurve möglich.

3.3 Beschreibung der einzelnen Funktionen

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Funktionen von `FR_calc` beschrieben. Im gesamten Programm wird mit einer `Error` Variablen gearbeitet. Tritt an einer Stelle ein Fehler auf, so nimmt sie den Wert 1 an. Sonst hat sie den Wert null.

3.3.1 Hauptprogramm `FR_calc.m`

Das Hauptprogramm, die Datei `FR_calc.m`, besteht aus einer Hauptfunktion und zwei Hilfsfunktionen. Um die Flugzeug- und Flugzustandsdaten einzulesen, ruft die Hauptfunktion `FR_calc` zuerst die Funktion `get_Derivative.m` auf. Die Werte befinden sich in den Strukturen `AC` und `FZ` (vgl. Abschnitt 3.3.3). Danach erscheint der Eröffnungsbildschirm im Kommando Fenster und anschließend wird in einer Schleife das Hauptmenü mit der Hilfsfunktion `Hauptmenue` aufgerufen. Diese Hilfsfunktion gibt das Hauptmenü auf den Bildschirm aus, nimmt die Eingaben des Nutzers entgegen und verarbeitet diese. Um Eingabefehler abzufangen, die das Programm zum Absturz bringen könnten, werden in der Hilfsfunktion `Hauptauswahl` die Eingaben überprüft. Entspricht die Eingabe des Nutzers keinen gültigen Wert, so wird er erneut aufgefordert seine Eingabe zu wiederholen. Als Eingabeparameter verlangt die Hilfsfunktion eine Zeichenkette - die Eingabe des Nutzers im Command Window.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Haupt- und Hilfsfunktionen innerhalb der Datei `FR_calc.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
FR_calc	Hauptfunktion	keine	Error - Fehlervariable
Hauptmenue	Hauptmenü	keine	Error - Fehlervariable
Hauptauswahl	Prüfung der Nutzereingabe im Hauptmenü	Auswahl - Nutzereingabe	Error - Fehlervariable

3.3.2 calc_AlleFlugzeuge.m

Die Datei `calc_AlleFlugzeuge.m` besteht aus einer Haupt- und einer Hilfsfunktion. Die Hauptfunktion wird durch das Hauptprogramm `FR_calc.m` aufgerufen und verlangt keine Eingabeparameter. Die Hauptfunktion enthält drei Zählschleifen über

1. Alle Flugzeuge,
2. Alle Bewegungsformen (Längs- und Seitenbewegung) und
3. Alle Flugzustände.

Der Ablauf der Funktion kann der Abbildung 3.2 entnommen werden. Die Funktion ruft nach Durchlaufen aller Zählschleifen die Hilfsfunktion `Erstelle_Tex` auf. Sie benötigt als Eingabeparameter die Ersatzgrößen in der Längsbewegung (`EZLB`) und die Ersatzgrößen der Seitenbewegung (`EZSB`) jeweils als Vektor. Danach wird die Datei `Ersatzgroessen.tex` erstellt. Dies ist eine \LaTeX -Tabelle, welche die Ersatzgrößen für alle 14 Flugzustände enthält.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Haupt- und Hilfsfunktionen innerhalb der Datei `calc_AlleFlugzeuge.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
Alle_Flugzeuge	Berechnung aller Flugzeuge	keine	Error - Fehlervariable
Erstelle_Tex	Erstellen einer \LaTeX -Tabelle mit den Ersatzgrößen	EZLB - Ersatzgrößen Längsbewegung; EZLB - Ersatzgrößen Seitenbewegung	Error - Fehlervariable

3.3.3 get_Derivative.m

Diese Datei enthält alle wesentlichen Flugzeug- und Flugzustandsdaten. Die Daten zu den Flugzeugen sind in der Struktur `AC` angeordnet. Die Parameter für den Flugzustand und die Derivate der Längs- und Seitenbewegung werden zuerst in einem separaten Vektor abgespeichert und später in einer Zählschleife in die Struktur `FZ` abgelegt. Nach Verlassen der Funktion bleiben die beiden Strukturen `AC` und `FZ` im Workspace erhalten. Alle anderen Variablen werden gelöscht.

3.3.4 select_Flugzeug.m

Diese Datei besteht aus einer Hauptfunktion und drei Hilfsfunktionen und ermöglicht die Berechnung für ein Flugzeug. Die Hauptfunktion `select_Flugzeug` wird aufgerufen, wenn der Nutzer im Hauptmenü die Berechnung eines Flugzeugs auswählt (vgl. Abschnitt 3.3.2).

Die Hauptfunktion beginnt mit einem Menü zu Flugzeugauswahl. Der Nutzer wird aufgefordert einen Flugzeugtypen auszuwählen. Dies geschieht in einer Schleife. Die Eingabe des Nutzers wird durch die Hilfsfunktion `Flugzeugauswahl` überprüft. Ist die Eingabe auswertbar, so wird die Schleife verlassen. Ist die Eingabe ungültig, erfolgt eine erneute Aufforderung an den Nutzer. Dadurch ist das Programm gegen Abstürze gesichert. Als Eingabeparameter benötigt die Hilfsfunktion `Flugzeugauswahl` die Variable `Auswahl`, welche die Texteingabe des Nutzers repräsentiert. Hat der Nutzer einen Flugzeugtypen ausgewählt, wird von der Hilfsfunktion `Flugzeugauswahl` der Wert 0 für die Variable `Error` zurück gegeben und damit wird die Schleife für die Flugzeugauswahl verlassen. Anschließend wird ein Ordner für den Flugzeugtypen angelegt. Der Flugzeugtyp wird in der Variable `auxAuswahl` abgelegt.

Die Bewegungsform wird in gleicher Weise wie das Flugzeug ausgewählt und wird daher nicht näher beschrieben. Die Eingabe des Nutzers wird durch die Hilfsfunktion `Bewegungsauswahl` überprüft, die genauso aufgebaut ist, wie die Hilfsfunktion `Flugzeugauswahl`. Die ausgewählte Bewegungsform wird in der Variable `auxBewegungsform` gespeichert.

Die Auswahl des Flugzustandes funktioniert ähnlich wie die Flugzeug- und Bewegungsauswahl. Der Flugzustand ist jedoch nicht hart kodiert, sondern wird der Struktur `FZ` entnommen. Die Überprüfung der Eingabe durch den Nutzer erfolgt durch die Hilfsfunktion `Flugzustandsauswahl`, die wie die Hilfsfunktionen `Flugzeugauswahl` und `Bewegungsauswahl` aufgebaut ist. Mithilfe der Variablen `auxFlugzustand` wird der Flugzustand gespeichert.

Die weiteren Schritte in der Hauptfunktion `select_Flugzeug` entsprechen Abbildung 3.2, mit Ausnahme der Erstellung des \LaTeX -Dokumentes. Die Funktionen werden nacheinander mit den benötigten Eingabeparametern aufgerufen und anschließend abgespeichert. Bei der Speicherung der Daten (vgl. Abschnitt 2.3) wird zwischen Längs- und Seitenbewegung unterschieden.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Funktionen innerhalb der Datei `select_Flugzeug.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
<code>select_Flugzeug</code>	Hauptfunktion für die Berechnung eines Flugzeugs	keine	Error - Fehlervariable
<code>Flugzeugauswahl</code>	Prüfung der Nutzereingabe bei der Flugzeugauswahl	Auswahl - Nutzereingabe	Error - Fehlervariable
<code>Bewegungsauswahl</code>	Prüfung der Nutzereingabe bei der Bewegungsauswahl	Auswahl - Nutzereingabe	Error - Fehlervariable
<code>Flugzeugzustandsauswahl</code>	Prüfung der Nutzereingabe bei der Flugzeugzustandsauswahl	Auswahl - Nutzereingabe	Error - Fehlervariable

3.3.5 `calc_Ersatzgroessen.m`

Die Datei `calc_Ersatzgroessen.m` umfasst eine Hauptfunktion und drei Hilfsfunktionen. Zur Ersatzgrößenberechnung benötigt die Hauptfunktion `calc_Ersatzgroessen` als Eingabe die Bewegungsform, die Flugzeugdaten und die Flugzustandsdaten. Diese Werte werden jeweils aus der im MATLAB-Workspace hinterlegten Struktur (vgl. Abschnitt 3.3.3) herausgenommen. Danach wird in Abhängigkeit der Bewegungsform entweder die Funktion `ErsatzgroessenLB` für die Längsbewegung oder `ErsatzgroessenSB` für die Seitenbewegung gerechnet.

Beide Hilfsfunktionen sind in ihren Ein- und Ausgabevariablen identisch. Sie benötigen die Flugzeug- und Flugzustandsdaten und geben die Ersatzgrößen für die Bewegungsform zurück. Die Gleichungen sind dem Anhang A.1 des Buches Flugregelung entnommen worden. Die Ersatzgrößen werden jeweils in einer Struktur `EZ` abgespeichert, die an die übergeordnete Funktion `calc_Ersatzgroessen` zurückgegeben wird.

Nachdem eine der beiden Hilfsfunktionen durchlaufen wurden, gibt die Hauptfunktion `calc_Ersatzgroessen` die Ersatzgrößen an die Funktion `select_Flugzeug` zurück. Ist ein Fehlerfall aufgetreten, so wird anstatt der Ersatzgrößen die Zahl 1 zurück gegeben.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Funktionen innerhalb der Datei `calc_Ersatzgroessen.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
<code>calc_Ersatzgroessen</code>	Hauptfunktion für die Berechnung der Ersatzgrößen	<code>fall</code> - Bewegungsform; <code>AC</code> - spezifische Flugzeugdaten; <code>FZ</code> - spezifische Flugzustandsdaten	<code>Ersatzgroessen</code> - Struktur mit den Ersatzgrößen
<code>ErsatzgroessenLB</code>	Berechnung der Ersatzgrößen in der Längsbewegung	<code>AC</code> - spezifische Flugzeugdaten; <code>FZ</code> - spezifische Flugzustandsdaten	<code>ErsatzgroessenLB</code> - Struktur mit den Ersatzgrößen
<code>ErsatzgroessenSB</code>	Berechnung der Ersatzgrößen in der Seitenbewegung	<code>AC</code> - spezifische Flugzeugdaten; <code>FZ</code> - spezifische Flugzustandsdaten	<code>ErsatzgroessenSB</code> - Struktur mit den Ersatzgrößen

3.3.6 `calc_Zustandsraum.m`

Die Datei `calc_Zustandsraum.m` umfasst eine Hauptfunktion und zwei Hilfsfunktionen und ist ähnlich wie die Datei `calc_Ersatzgroessen.m` aufgebaut. Die Hauptfunktion der Zustandsraumberechnung `calc_Zustandsraum` benötigt als Eingabe die Bewegungsform, die Ersatzgrößen und die Flugzustandsdaten. Die übergebenen Flugzustandsdaten werden jeweils der im Workspace hinterlegten Struktur (vgl. Abschnitt 3.3.3) entnommen. Die Ersatzgrößen sind aus der Hauptfunktion `calc_Ersatzgroessen` bekannt. Danach wird in Abhängigkeit der Bewegungsform entweder die Funktion `ZustandsraumLB` für die Längsbewegung oder `ZustandsraumSB` für die Seitenbewegung gerechnet.

Beide Hilfsfunktionen sind in Ihren Ein- und Ausgabevariablen identisch. Sie benötigen die Ersatzgrößen und Flugzustandsdaten und geben jeweils die Zustandsmatrizen für die Bewegungsform zurück. Die Gleichungen können dem Anhang A.1 des Buches Flugregelung entnommen werden. Die Zustandsraummatrizen werden jeweils in einer Datenstruktur vom Typ *state space* abgespeichert, die an die übergeordnete Funktion

`calc_Zustandsraum` zurück gegeben wird. Neben den Zustandsraummatrizen sind die Bezeichnungen für die Ein- und Ausgangsgrößen in der *state space* Struktur hinterlegt.

Nachdem eine der beiden Hilfsfunktionen durchlaufen wurde, gibt die Hauptfunktion `calc_Zustandsraum` den Zustandsraum an die Funktion `select_Flugzeug` zurück. Ist ein Fehler aufgetreten, so wird anstatt des Zustandsraumes die Zahl 1 zurück gegeben.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Funktionen innerhalb der Datei `calc_Zustandsraum.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
<code>calc_Zustandsraum</code>	Hauptfunktion für die Berechnung des Zustandsraumes	Form - Bewegungsform; EZ - Ersatzgrößen; FZ - spezifische Flugzustandsdaten	Zustandsraum - <i>state space</i> Struktur
<code>ZustandsraumLB</code>	Berechnung des Zustandsraumes in der Längsbewegung	EZ - Ersatzgrößen; FZ - spezifische Flugzustandsdaten	Zustandsraum - <i>state space</i> Struktur
<code>ZustandsraumSB</code>	Berechnung des Zustandsraumes in der Seitenbewegung	EZ - Ersatzgrößen; FZ - spezifische Flugzustandsdaten	Zustandsraum - <i>state space</i> Struktur

3.3.7 `calc_Uebertragungsfunktion.m`

Die Datei `calc_Uebertragungsfunktion.m` besteht aus insgesamt einer Hauptfunktion vier Hilfsfunktionen. Die Hauptfunktion `calc_Uebertragungsfunktion` benötigt als Eingabewerte die Bewegungsform und die Matrizen des Zustandsraums und gibt die Übertragungsfunktionen des Flugzeugs vom Typ *transfer function* zurück. In der Hauptfunktionen werden zuerst die Übertragungsfunktionen selbst berechnet. Danach wird der Nutzer gefragt, ob die Frequenzgänge im Bodediagramm grafisch dargestellt werden sollen. Die Abfrage geschieht in einer Schleife, die so lange durchlaufen wird, bis die Eingabe des Nutzers verarbeitet werden kann. Die Eingabe des Nutzers wird mithilfe der Hilfsfunktion `Darstellungsauswahl` abgeglichen (vgl. Abschnitt 3.3.2). Ist die Nutzereingabe gültig, wird die Schleife verlassen. Wird ausgewählt, dass die Bodediagramme nicht dargestellt werden sollen, wird die Funktion verlassen und die Übertragungsfunktionen an die Funktion `select_Flugzeug` übergeben. Sollen die Bodediagramme dargestellt werden, wird in Abhängigkeit der Bewegungsform eine Hilfs-

funktion (`Bode_LB` oder `Bode_SB`) zum Plotten der Bodediagramme gestartet und danach die Übertragungsfunktionen an die Funktion `select_Flugzeug` übergeben.

In den Hilfsfunktionen `Bode_LB` und `Bode_SB` werden für beide Bewegungsformen jeweils die Zustands- und Steuergrößen definiert. Als Eingangsparameter erwartet die Funktion die Übertragungsfunktionen. Es werden zwei geschachtelte Zählschleifen über die Zustands- und Steuergrößen durchlaufen. Innerhalb der Schleife wird die eigentliche Hilfsfunktion `Bode` aufgerufen, die die Bodediagramme darstellt. Sollte eine Übertragungsfunktion nicht generiert worden sein, wird die Funktion nicht aufgerufen. Dies wird mit einer Selektion abgefangen. Die Funktion liefert keine Werte zurück.

Die Hilfsfunktion `Bode` erstellt das Bodediagramm. Sie benötigt als Eingabewerte die separierte Übertragungsfunktion, sowie die Bezeichnungen von Zustands- und Steuergröße. Danach generiert die Funktion einen Eingangsfrequenzbereich und berechnet durch die in MATLAB standardisierte Bodefunktion Amplituden- und Phasengang. Der Amplitudengang wird im oberen Diagramm als ein `subplot` dargestellt. Der Phasengang wird im unteren `subplot` dargestellt. In Abhängigkeit von der Verstärkung der Übertragungsfunktion wird ggf. eine Phasendrehung von $\pm 360^\circ$ vorgenommen. Die Hilfsfunktion liefert keine Werte zurück. Sie speichert am Ende die Plots als JPEG-Grafik mit 200 DPI ab.

Hinweis: Die mit der MATLAB-Funktion `bode` berechneten Phasenverläufe werden nachträglich um -180° verschoben, wenn der Verstärkungsfaktor der Übertragungsfunktion negativ ist.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Funktionen innerhalb der Datei `calc_Ubertragungsfunktion.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
calc_Uebertragungsfunktion	Hauptfunktion für die Berechnung der Übertragungsfunktionen	Fall - Bewegungsform; Zustandsraum - Zustandsraum	Uebertragungsfunktionen - <i>transfer function</i> - Struktur
Darstellungsauswahl	Überprüfung der Nutzereingabe	Auswahl - Nutzereingabe	Error - Fehlerausgabe
Bode_LB	Bodediagramme mit Zustands- und Steuergrößen für die Längsbewegung	UE - Übertragungsfunktion	-
Bode_SB	Bodediagramme mit Zustands- und Steuergrößen für die Seitenbewegung	UE - Übertragungsfunktion	-
Bode	Darstellung der Bodediagramme	UE - Übertragungsfunktionen; state - Zustandsgröße; input - Steuergröße	-

3.3.8 calc_Eigenwerte.m

Die Datei `calc_Eigenwerte.m` besteht aus einer Hauptfunktion und drei Hilfsfunktionen. Die Routine berechnet die Eigenwerte und Eigenvektoren. Zudem soll die Funktion, bei Auswahl durch den Nutzer, die Pole und Nullstellen in der komplexen Zahlenebene darstellen. Die Hauptfunktion `calc_Eigenwerte` bestimmt die Eigenwerte und Eigenvektoren der Systemmatrix A . Danach erfolgt eine Abfrage, ob die Pole und Nullstellen in der komplexen Zahlenebene dargestellt werden sollen. Diese Abfrage erfolgt innerhalb einer Schleife. Die Eingabe des Nutzers wird mit der Hilfsfunktion `Darstellungsauswahl` überprüft. Das Verfahren ist identisch zu dem, das für die Datei `calc_Uebertragungsfunktion.m` (vgl. Abschnitt 3.3.7) beschrieben wurde.

Die Hilfsfunktionen `Pol_Nullstellen_LB` und `Pol_Nullstellen_SB` stellen die Pole und Nullstellen für die Längs- und Seitenbewegung in der komplexen Zahlenebene dar. Die Achsen werden dabei gleich skaliert dargestellt. Um eine optimale Darstellung zu erreichen, werden von den Polen und Nullstellen die minimalen und maximalen Real- und Imaginärteile ermittelt. Danach wird der Ursprung des Koordinatensystems entsprechend verschoben. Als Eingangsparameter benötigen beide Hilfsfunktionen die Über-

tragungsfunktionen. Es werden keine Werte zurück gegeben. Die Hilfsfunktion speichert am Ende die Plots als JPEG-Grafik mit 200 DPI ab.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Funktionen innerhalb der Datei `calc_Eigenwerte.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
<code>calc_Eigenwerte</code>	Hauptfunktion für die Berechnung der Eigenwerte	<code>Fall</code> - Bewegungsform; <code>Zustandsraum</code> - Zustandsraum; <code>UE</code> - Übertragungsfunktionen	<code>Eigenvektoren</code> - Eigenvektoren; <code>Eigenwerte</code> - Eigenwerte
<code>Darstellungsauswahl</code>	Überprüfung der Nutzereingabe	<code>Auswahl</code> - Nutzereingabe	<code>Error</code> - Fehlerausgabe
<code>Pol_Nullstellen_LB</code>	Pol- Nullstellen Darstellung in der Längsbewegung	<code>UE</code> - Übertragungsfunktion	-
<code>Pol_Nullstellen_SB</code>	Pol- Nullstellen Darstellung in der Seitenbewegung	<code>UE</code> - Übertragungsfunktion	-

3.3.9 `calc_Sprungantworten.m`

Die Datei `calc_Sprungantworten.m` besteht aus einer Haupt- und einer Hilfsfunktion. Die Hauptfunktion `calc_Sprungantworten` benötigt als Eingabeparameter die Matrizen des Zustandsraums und gibt eine Struktur mit den Zeitantworten der Zustands- und Stellgrößen zurück. In der Funktion erfolgt zuerst eine Abfrage, ob die Sprungantworten grafisch dargestellt werden sollen. Die Eingaben wird mit der Hilfsfunktion `Darstellungsauswahl` überprüft (vgl. Abschnitt 3.3.7).

Nach der Eingabe durch den Nutzer werden zwei Sprungsignale unterschiedlicher Länge erzeugt. Der Signalsprung erfolgt nach einer Sekunde und wird gehalten. Das Signal für die Kurzzeitdynamik ist insgesamt 20 Sekunden, das Signal für die Langzeitdynamik 120 Sekunden lang. Anschließend wird zuerst die Kurzzeitdynamik und anschließend die Langzeitdynamik simuliert. Dazu werden zwei Zählschleifen genutzt. Die erste Zählschleife läuft über alle Steuergrößen. Bei jeder neuen Steuergrößen wird in einem Subplot eine Grafik mit dem Eingangssignal dargestellt. Bei Winkeln wird der Sprung zur Darstellung von Radian in Grad umgerechnet. Danach folgt die Zählschleife über

alle Zustände. Es wird jeder Zustand mit dem entsprechenden Eingangssignal simuliert und die Werte in die Struktur abgespeichert. Bei einer graphischen Ausgabe werden die Sprungantworten im Subplot abgebildet und anschließend als JPEG-Grafik mit 200 DPI abgespeichert.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Funktionen innerhalb der Datei `calc_Sprungantworten.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
<code>calc_Sprungantworten</code>	Hauptfunktion für die Berechnung der Sprungantworten	ZR - Zustandsraum	Sprungantworten - Sprungantworten
<code>Darstellungsauswahl</code>	Überprüfung der Nutzereingabe	Auswahl - Nutzereingabe	Error - Fehlerausgabe

3.3.10 `calc_WOK.m`

Die Datei `calc_WOK.m` besteht aus einer Haupt- und einer Hilfsfunktion. Die Hauptfunktion `calc_WOK` benötigt als Eingabeparameter die Matrizen des Zustandsraum. Es erfolgt eine Abfrage, ob die Wurzelortskurven dargestellt werden sollen. Die Eingabe wird mit der Hilfsfunktion `Darstellungsauswahl` überprüft (vgl. Abschnitt 3.3.7).

Danach folgen zwei Zählschleifen über die Zustands- und Steuergrößen. Der Verstärkungsfaktor wird ermittelt und die Wurzelortskurven berechnet. Wenn ein Ergebnis ermittelt wurde, wird die Wurzelortskurve grafisch ausgegeben und als JPEG-Grafik mit 200 DPI abgespeichert. Es erfolgt keine Speicherung der numerischen Werte.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die benötigten Eingangsparameter und berechneten Ausgangswerte der Funktionen innerhalb der Datei `calc_WOK.m`:

Funktion	Beschreibung	Eingangsparameter	Ausgangswerte
<code>calc_WOK</code>	Hauptfunktion für die Darstellung der Wurzelortskurve	ZR - Zustandsraum	keine
<code>Darstellungsauswahl</code>	Überprüfung der Nutzereingabe	Auswahl - Nutzereingabe	Error - Fehlerausgabe

Es ist zu beachten, dass es sich bei den mit der MATLAB-Funktion `rlocus` erzeug-

ten Wurzelortskurven um 180° -WOKs handelt. Hier werden die Verstärkungen mit -1 multipliziert, sodass alle WOKs gelten für

$$u = -(-K)x = Kx$$

also 0° WOKs entsprechen.

Hinweis: In Kapitel 14 des Buches sind in den Bildern 14.2, 14.3, 14.6, 14.7, 14.9, 14.11 und 14.13 die 0° WOKs für einen Flugzustand ähnlich A1 abgebildet. Beim Vergleich mit den hier berechneten WOKs ist zu beachten, dass im Buch das Vorzeichen der Rückführung nicht immer positiv ist, sondern so gewählt wurde, dass die gewünschte Wirkung erreicht wird. Beispielsweise ist die Rückführung des Schiebewinkels auf das Seitenruder negativ: $\zeta = K_{\zeta\beta}\beta$ mit $K_{\zeta\beta} < 0$.