Anleitung für die Simulationssoftware

Grundsätzliches

Die von mir entwickelte Simulationssoftware ermöglicht Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme nach dem Konzept der "System Dynamics".

Programmiersprache und Grafiktool

Da der erste Anstoß zu der Entwicklung von einem Einsatz im Physikunterricht und Programmierung mit Python ausging, entschied ich mich damals, nicht das von mir sonst bevorzugte Grafiktool wxPython, sondern das bei Standardinstallationen von Python mit gelieferte Tkinter zu verwenden. Das hatte gravierende Folgen, was die Klarheit eines objektorientierten Ansatzes anging, die Zugriffe über *tags* (nicht der Tag, sondern das englische *tag*) und *IDs* der Fensterelemente sind sehr gewöhnungsbedürftig und die Dokumentation von Tkinter unbefriedigend. Allerdings stellte sich die Orientierung an *tag* und *ID* in der Umsetzung aber auch als durchaus passend heraus.

Zusammengefasst: Sie benötigen nur eine aktuelle Standardinstallation von Python.

Zur Verfügung stehende Komponenten

Neben der eigentlichen Software zur **Modellierung und Simulation** stehen weitere Komponenten zur Verfügung, die alle auf der selben Basis entwickelt sind:

- Eine Software zum Erstellen von Wirkungsdiagrammen -> Seite 9
- Eine Software zum (interaktiven) Konvertieren der Wirkungsdiagrammdateien in Simulationsdateien (Festlegung, was jeweils Bestandsgrößen, Flüsse, Parameter oder Zwischengrößen sind) -> Seite 10
- Software zur Modellentwicklung dynamischer Systeme und Demonstration des Simulationsverlaufs bei Einsatz von Euler-Cauchy, erweitertem Euler-Verfahren und Runge-Kutta¹. -> Seite 2

Historie

System Dynamics, Simulation dynamischer Systeme haben erste internationale Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit durch die Veröffentlichungen des "Club of Rome" (1968) mit dem deutschen Titel "Die Grenzen des Wachstums" (1972) erzielt.

Die zu Grunde liegenden Verfahren sind lange bekannt, sind aber erst mit der Entwicklung großer Computeranlagen ab der Zeit umfassend eingesetzt worden. Sie werden inzwischen weit verbreitet eingesetzt, wenn es darum geht, die zeitliche Entwicklung von Systemen zu modellieren, um sie zu verstehen und fundierte Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu machen.

Ganz aktuell sind noch Simulationen an den Themen *Covid19*-Pandemie und Klimakrise (*Fridays for Future*) laufend in der öffentlichen Diskussion.

¹ Mathematisch: Numerische Lösung von Differentialgleichungssystemen mit Anfangswerten.

Das Simulationstool: Projekt "Simulation-mit-Python"

Sie starten das Simulationsprojekt¹ über eine der Dateien im Hauptordner. Diese starten jeweils die Anwendung mit zwei Fenstern, dem **Modellentwicklungsfenster** mit dem Titel "Entwicklung Simulation" und dem **Simulationsfenster** mit dem Titel "Grafikfenster".

Das Fenster für die Modellentwicklung

Die Entwicklung ist weitgehend über die Menüs möglich, allerdings gibt es neben Mausaktionen zu vielen Aktionen Kurztasten. Siehe dazu im Menü "Hilfe zu Kurztasten".

Datei-Menü

In den aktuellen Versionen merkt sich das Programm das aktuell gewählte Verzeichnis, aus dem das aktuelle Projekt (Dateinamensergänzung .simdia²) geladen wurde bzw in das es geschrieben wurde. Zum Zurücksetzen auf das Standardverzeichnis, den Ordner *Modelle*, gibt es den Menüpunkt **Modellverzeichnis zurücksetzen**.

Eine besondere Möglichkeit ist der Import eines anderen Modells in das aktuell behandelte Modell. Verhindern Sie dabei <u>unbedingt(!)</u> durch vorherige Umbenennungen in einem der Projekte Namensgleichheiten!

Menü Modellentwicklung

Über dieses Menü kann über **Neues Modell** der Name des Modells festgelegt werden, außerdem können die verschiedenen Elemente der Modellierung erzeugt werden.

Vielleicht nicht ganz konsequent verwende ich parallel die Bezeichnungen "Größe" und "Faktor". **Bestand**, **Bestandsgröße** und **Bestandsfaktor** sind also synonym.

Bei der Entwicklung muss bereits festgelegt werden, wenn eine Größe ein **Fluss** (*Flussfaktor*) ist.

Parameter (*Inputfaktoren*) sind Größen, die Eingabewerte liefern.

Sie können konstant sein, aber auch veränderliche Werte sind möglich. Dazu gibt einerseits die Möglichkeit Terme (*Formeln, hier aber ohne Eingangsgrößen*) zu verwenden, andererseits können die Werte auch über eine Tabelle veränderlich vorgegeben werden.

In **Zwischengrößen** werden mehrere Eingabewerte verrechnet. um sie an andere Größen weiter zu geben. Sie weisen daher Terme auf, welche die Größen (Faktoren) enthalten, die in Wirkungen auf die Zwischengröße auftreten. Eine der Weiterentwicklungen ermöglicht es, auch bei Zwischengrößen Tabellen einzubauen. Hierbei handelt es sich allerdings nicht um eine zeitliche Abhängigkeit, sondern die Abhängigkeit von einer (einzelnen) einwirkenden Größe, deren Wert als Eingang für den zugehörigen Tabellenwert verwendet wird³.

Wirkungen werden dargestellt, müssen aber (*im Gegensatz zu Wirkungsdiagrammen*) klar von Flüssen unterschieden werden. Ihre Namen müssen in den **Termen** (*Formeln*) der Zielwerte auftreten.

¹ Im Hauptordner gibt es allein die Startdateien SimulationApp.py, SimulationApp_Groesse_setzen.py und SimulationApp_Groesse_variabel.py, sowie ein Startdatei SimulationApp_Hintergrund_schwarz.py für Grafik auf schwarzer Hintergrundfläche.

² Die Dateien sind einfache Textdateien, das Beschreibungsprinzip ist also lesbar.

³ Siehe auch weiter in der Beschreibung des Tabellenmenüs.

Beim Einbau einer Wirkung mit Hilfe der Maus müssen Sie darauf achten, die linke obere Ecke der Ausgangsgröße anzuklicken und dann zur linken oberen Ecke des Ziels⁴ zu ziehen. Achten Sie darauf, dass Sie vorher jeweils **Wirkung mit Maus** angeklickt haben, da Sie sonst die Zielgröße verschieben.

Dialogfenster

Zu den Menüpunkten vieler Menüs werden Dialogfenster geöffnet. Beim Erstellen einer neuen Bestandsgröße muss beispielsweise zunächst der Name und dann ein Anfangswert angegeben werden.

Achten Sie bei der Vergabe von **Namen** darauf, mit Python konforme Namen zu verwenden, da zu den Namen entsprechende Pythonobjekte erzeugt werden.

Weiterhin müssen in Termen die Eingangsgrößen von Flüssen und Zwischengrößen immer hinter ihrem Namen ein **Paar von öffnender und schließender Klammer** aufweisen, da nur dann der Term von Python richtig



ausgewertet wird. Im Beispiel wird mit **Hasen()*Fuechse()** jeweils der aktuelle Wert der Größe **Hasen** mit dem aktuellen Wert der Größe **Fuechse** multipliziert.



Um die Eingabe von Termen zu erleichtern gibt es einen eigenen Termdialog, bei dem über den Button Funktionen und die einwirkenden Faktoren angezeigt und eingefügt werden können.

Wenn Sie in die Klammer

eine Zahl eingeben, wird der um diese <u>Zeit verzögerte</u>, also ältere Simulationswert der Größe verwendet. Beispiel **Bakterien(3)**.

Menü Bearbeiten

Bearbeiten von **Bestandsfaktor**, **Fluss**, **Parameter Zwischengröße** und **Term** sollten selbst erklärend sein.

Bei Parametern und Zwischengrößen können die Werte durch Tabellen definiert werden. Siehe dazu das Tabellenmenü. Wirkungspfeile werden zunächst mit einem typischen Bogen eingebaut; er kann gekippt werden (*auch rechter Mausklick*) und mit **Bogen bei Wirkung bearbeiten** weiter oder enger eingestellt werden. **Pfeile aktualisieren** ermöglicht eine Aktualisierung nach Verschieben von Elementen.



⁴ Beim Ventilsymbol von Flüssen liegt der "empfindliche Punkt" eher links in der Mitte.

Menüe Tabellen

Tabellen muss man starten mit **Tabelle verwenden** und die Eingaben erfolgen dann über **Tabellenwerte eingeben**. Der Dialog stellt auch die Möglichkeit bereit, Werte zwischendurch einzufügen.

Standardmäßig werden die Tabellenwerte auf den Intervallen interpoliert,das kann aber abgeschaltet werden, dann wird konstant der unterhalb gültige Tabellenwert verwendet.

Tabellen können auch gelöscht werden und der aktuelle Zustand der Tabelle kann mit **Tabellenwerte anzeigen** angezeigt werden.

Tabellen Löschen Darstellung H Tabelle verwenden Tabellenwerte eingeben Tabellenwerte interpolieren Tabellenwerte nicht interpolieren Tabelle loeschen Tabellenwerte anzeigen

Menüe Löschen

Die Punkte in diesem Menü sollten selbst erklärend sein.

Menü Darstellung

Der Menüpunkt **Faktoren positionieren** ermöglicht es, einzelne Faktoren im Fenster auf eine exakte Position durch Angabe der Koordinaten zu verschieben. Die aktuelle Position wird im Auswahlfenster angezeigt. Das geht ggf einfacher über einen der Menüpunkte ein Element verschieben, mehrere verschieben oder alle verschieben.

Falls Sie nicht bei der einfachen s/w – Darstellung bleiben wollen, können Sie zu den Modellierungselementen **Farben festlegen**. Dazu können Sie im Dialogfenster die englischen Farbnamen verwenden oder kurze rgb – Angaben nach dem Muster¹ **#fcc** (das wäre ein helles rot, da der Anteil maximal ist, der grüne Anteil etwas geringer, genauso wie der blaue).

ein Element verschieben
mehrere verschieben
alle verschieben
Farben festlegen

Modellkommentar
Modelldaten zeigen
Modelldiagramm speichern

Sie können über **Modellkommentar** einem Modell einen Kommenar zuweisen. Das ist insbesondere dann sinnvoll, wenn bei der Simulationsdurchführung spezielle Werte für Schrittweite und Anzahl der Schritte verwendet werden sollen. Er wird mit den Modelldaten abgespeichert und kann wieder angezeigt werden.

Modelldaten zeigen stellt die Werte (des Modells, also nicht der Darstellung) in einem Textfenster dar, während der Menüpunkt **Modelldaten formatiert ausgeben** dessen Inhalt in eine Textdatei schreibt (*Ordner Modelldaten*).

Modelldiagramm speichern ermöglicht das Abspeichern des Diagramms in eine postscript – Datei (Dateiendung .ps, Ordner Bilder), bitte *immer im Modus mit weißem Hintergrund*. Um diese in ein anderes Dateiformat zu konvertieren, verwenden Sie bitte ein externes Programm. Unter Windows kann dies beispielsweise das kostenlose Programm IrfanView leisten (*Ghostscript und IrfanView-extensions installieren!*). Bei Apple-Systemen öffnen Sie die Datei in der "*Vorschau*" und exportieren das Bild dann im gewünschten Bildformat.

¹ Der erste hexadezimale Wert steht für die Helligkeit des roten Farbanteils, der zweite für grün und der dritte für blau. Hexadezimal: **0,1...9**, **a** (10), **b** (11), **c** (12), **d** (13), **e** (14) und **f** (15).

Menü Hilfe

Selbst erklärend

Mausaktionen

Mausaktionen auf der Simulationsoberfläche sind an die oben beschriebenen *tags* gekoppelt, mit denen eine Zuordnung für die Ereignisbehandlung möglich wird.

Mit der **linken Maustaste** kann man die Symbole ziehen. Das gilt ab der Version 2023-09-18 auch für Wirkungen, um eine einfache Korrektur der Darstellung zu ermöglichen. Da nach allen anderen Veränderungen der Darstellung aber alle Wirkungspfeile automatisch aktualisiert werden, ist das nur als letzte Aktion vor dem Bildexport sinnvoll.

Die **rechte Maustaste**¹ (auch über der linken oberen Ecke eines Faktorsymbols) öffnet jeweils ein Konfigurationsfenster für Name und Wert oder Term.

Doppelklick links um Terme etwas komfortabler zu bearbeiten.

Eine weitere Aktion, ein Klick mit der **rechten Maustaste** auf einen Wirkungspfeil, ermöglicht es, die Bogenorientierung des Wirkungspfeils zu wechseln.

Anmerkung

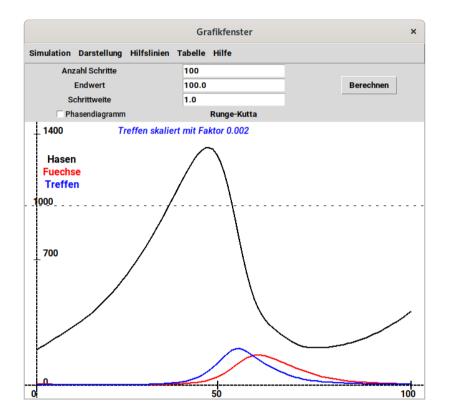
Flüsse mit mehrfachen Quellen bzw. Senken

Flüsse aus einer Quelle oder in eine Senke werden zunächst mit einfachen Flusspfeilen realisiert. Wenn Sie zu einer Bestandsgröße mehrere Quellen oder mehrere Senken benötigen, lässt sich das umsetzen. Allerdings decken sich die Flusssymbole dann. Sie können allerdings die Symbole für die Quellen bzw Senken mit der Maus verschieben und mit einem einfachen Linksklick auf das Symbol für den Fluss ggf dessen Position passend aktualisieren.

¹ Control-linke Maustaste erfüllt dasselbe.

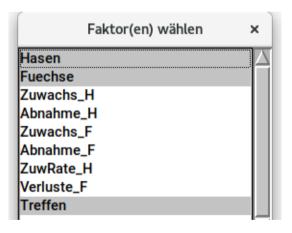
Das Fenster für die Simulationsdurchführung

Die Simulationsausführung und deren Vorbereitung und Konfiguration erfolgt in einem gesonderten Fenster, dem Grafikfenster.



Menü Simulation

Um die Veränderung der Werte der Größen darstellen zu können, müssen Sie zunächst auswählen, welche dieser Größen (Faktoren) in der Darstellung verwendet werden sollen. Dazu dient der Menüpunkt Wähle Faktor(en). Im Dialogfenster halten Sie dazu die Taste Strg (Ctrl) gedrückt und wählen mit der linken Maustaste die gewünschten Größen aus. Im Beispiel wurden so die Bestandsgrößen Hasen, Fuechse und die Zwischengröße Treffen ausgewählt.



Nach der Auswahl der darzustellenden Größen wird der Button **Berechnen** (*und auch der Menüpunkt Start im Simulationsmenü*) aktiv. Wenn Sie nun auf diesen Button **Berechnen** klicken, wird die Simulation mit den im Fenster gezeigten Werten und der vorgegebenen Simulationsmethode **Runge-Kutta** verwendet. Im Beispiel erhält man die abgebildete Darstellung.

Weiter im Menü Simulation

Sie können die gewünschte Simulationsmethode wählen, also *Euler*, *erweitert Euler* (entspricht Runge-Kutta-2) oder *Runge-Kutta (4)*.

Bei diskreter Simulation (im Problem sind keine Zwischenwerte sinnvoll) ist das **einfache** Euler-Verfahren **zwingend**.

Runge-Kutta gelingt es dagegen in der Regel am besten, auch schwierige Verläufe gut numerisch zu generieren.

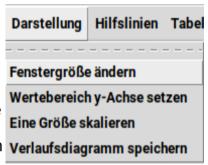
Änderungen übernehmen

Für alle Menüpunkte und Textfelder (s.u.) zur Konfiguration der Darstellung im Grafikfenster gilt, dass erst nach einem erneuten Starten der Simulation über das Menü oder den Berechnen-Button die Änderung dargestellt wird.

Menü Darstellung

Sie können die **Fenstergröße ändern**, sowohl in der Breite, als auch in der Höhe sind andere Werte möglich. Sie können die verwendeten **Werte für die y-Achse setzen**, indem Sie die untere und die obere Grenze eingeben. Die automatische Festlegung des Wertebereichs können Sie wieder einstellen mit Eingabe 0 bis 0.

Durch **Eine Größe skalieren** passen Sie für diese Größe die Werte an den dargestellten Wertebereich an, so dass Sie auch unterschiedliche Größenordnungen in einem Diagramm darstellen können. Diese Skalierung beenden Sie mit der Eingabe 1.



Entsprechend dem Modelldiagramm können Sie auch das Verlaufsdiagramm speichern.

Menü Hilfslinien

Mit **Hilfslinie zeichnen** können Sie waagerechte Linien eintragen. Da auf der y-Achse auch ihr Wert angezeigt wird, erleichtert dies die Beurteilung.

Der zweite Menüpunkt **Hilfslinie entfernen** dient dazu eine vorhandene Hilfslinie zu entfernen.

Mit **Hilfsliniendaten sichern** und **Hilfsliniendaten einlesen** können Sie die aktuellen Werte für die Hilfslinien in eine

gesonderte Datei sichern und auch wieder einlesen. Es ist eine reine Textdatei, welche die Liste enthält, also beispielsweise [1,2,3].



MenüTabelle

Tabellenwerte anzeigen stellt die aktuellen Werte zum Simulationsfenster in einem Tabellenfenster dar, während **Tabelle in csv-Datei** die Möglichkeit bietet, die Daten in eine Datei zu schreiben. In dieser Form können sie von allen Programmen zur Tabellenkalkulation angezeigt werden.

Hier werden allerdings alle Werte ausgegeben. Ein ToDo wäre die Möglichkeit ausgewählte Schritte auszugeben.

Menü Hilfe

Selbst erklärend

Textfelder

Auch die Textfelder sollten selbst erklärend sein. **Anzahl Schritte**, **Endwert** und **Schrittweite** sind von einander abhängende Werte, so dass sich Veränderungen bei den jeweils anderen ergeben.

Ändert man als beispielsweise allein die **Anzahl Schritte**, ergibt sich durch die unveränderte Schrittweite ein anderer Endwert.

Wenn andererseits die **Schrittweite** geändert wird und der Endwert bleibt, muss sich die Anzahl der Schritte ändern.

Beachten Sie, dass die Darstellung <u>erst nach</u> dem Anklicken von **Berechnen** erneuert wird.

Checkbox

Mit dem Anklicken der Checkbox mit der Beschriftung **Phasendiagramm** können Sie die Ausgabe umschalten. Im Phasendiagramm wird der zeitliche Verlauf nur noch mittelbar dargestellt. Es geht statt dessen um den Zusammenhang zweier Größen, eine davon in waagerecht, die andere senkrecht zugeordnet. Ein typisches Beispiel ist die Darstellung der Bahn bei einer Planetenbewegung. Bevor Sie **Berechnen** anklicken, müssen Sie in zwei Schritten die zu verknüpfenden Größen angeben.

Projekt zum Erstellen von Wirkungsdiagrammen

Starten Sie die Datei wirkungsdiagrammApp.py (feste Größe mit Scrollbalken) oder die Datei WirkungsdiagrammApp_Groesse_variabel.py.

Wegen der fehlenden Ausführung einer Simulation gibt es hier nur ein einzelnes Fenster. Der Menüaufbau ähnelt dem des Simulationsprogramms.

<u>Hinweis</u>: Die Wirkungspfeile können *mit der Maus verschoben* werden, u.a. um Überdeckung mit den Faktornamen zu verhindern. Ab der Version 2023-09-09 werden diese Verschiebungen mit abgespeichert.

Datei-Menü

Keine besonderen Aktionen, Modelldateien (Dateinamensergänzung .wirkdia) werden in den Ordner **Modelle** gespeichert.

Menü Neu

Über **Neues Modell** kann der Modellname festgelegt werden. In das Modell können nur **Faktoren** (Größen) und **Wirkungen** zwischen ihnen eingefügt werden. Mit **Wirkung mit Maus** können die Wirkungen jeweils durch Ziehen von der linken oberen Ecke des Ausgangsfaktors zur linken oberen Ecke des Zielfaktors eingebaut werden.

Menü Bearbeiten

Faktor bearbeiten zum Ändern des Namens. **Wirkung bearbeiten** wechselt zwischen verstärkender (*gleichsinniger*) und dämpfender (*gegensinniger*) Wirkung, die mit + bzw – im Wirkungspfeil gekennzeichnet werden. Den selben Effekt erzielen Sie mit **Linksklick** auf das Pfeilsymbol, während ein **Rechtsklick die Bogenorientierung** wechselt.

Menü Löschen

Sollte selbst erklärend sein.

Menü Darstellung

Fenstergröße ändern ermöglicht bei der Version mit Scrollbalken eine andere Breite oder Höhe, um mehr Platz zu haben oder kleinere Ausschnitte für kleinere Bilddateien. **Alle verschieben** ermöglicht das Verschieben aller bisher dargestellten Größen, beispielsweise um oben oder links weitere einfügen zu können.

Modelldaten zeigen stellt die Werte in einem Textfenster dar.

Modelldiagramm speichern ermöglicht das Abspeichern des Diagramms in eine postscript – Datei (*Dateiendung .ps ; siehe dazu die Erläuterung beim Simulationsprojekt*).

Menü Hilfe

Sollte selbst erklärend sein.

Projekt zum Exportieren von Wirkungsdiagrammen

Starten Sie die Datei Export_App.py oder Export_App_Groesse_variabel.py. Auch hier wird nur ein Fenster benötigt.

Begründung

Wirkungsdiagramme lassen sich nicht direkt verwandeln, da das Simulationsprogramm zu den einzelnen Größen (Faktoren) ihre Einordnung als Bestand, Fluss, Parameter oder Zwischengröße benötigt.

Menü Datei

Das Programm erfüllt daher allein die Aufgabe, Wirkungsdiagramme zu geladenen Dateien (*Dateiendung .wirkdia*) so interaktiv zu bearbeiten, dass die Informationen in entsprechende Simulationsdateien (*Dateiendung .simdia*) gespeichert werden können (Speichern über **Daten exportieren** im Menü **Datei**). Die Darstellung bleibt dabei im Format des Wirkungsdiagramms. Allerdings kann der Zwischenstand der Bearbeitung immer über den Menüpunkt Modelldaten zeigen im Menü Darstellung angezeigt werden.

Menü Neu

Das Menü ermöglicht das Hinzufügen von Faktoren und Wirkungen.

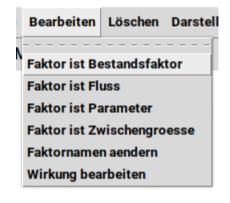
Menü Bearbeiten

Das Menü stellt die Punkte

- Faktor ist Bestandsfaktor
- Faktor ist Flussfaktor
- Faktor ist Parameter
- Faktor ist Zwischengröße

zur Verfügung.

Zusätzlich werden **Faktornamen ändern** und **Wirkung bearbeiten** (*Art ändern*) angeboten



Menü Löschen

Bietet das Löschen von Faktoren und Wirkungen. Wirkungen zu löschen ist dort notwendig, wo sie durch Flüsse neu modelliert werden müssen.

Menü Darstellung

Modelldaten zeigen stellt den bearbeiteten Zustand in einem Textfenster dar. Das ist sinnvoll, um den Stand der Bearbeitung zu prüfen. In der aktuellen Version zeigt die grafische Darstellung die Einordnung der Faktoren (*als Bestand, Fluss, Parameter oder Zwischengröße*) in der Darstellung durch die Farbdarstellung des Rahmens an (grau,blau,rot grün).

Außerdem kann man beim Fenster mit Scrollbalken **Fenstergröße ändern** nutzen. Aber **ACHTUNG**: Leider hat das den Nachteil, dass die bisherige Bearbeitung verloren geht und die Darstellung gelöscht wird. Also <u>nur gleich am Anfang</u> machen!

Menü Hilfe

Sollte selbst erklärend sein.