Lösung 5

1. *Explizites Eulerverfahren*

a) Man erhält das Richtungsfeld in Abb. 1.

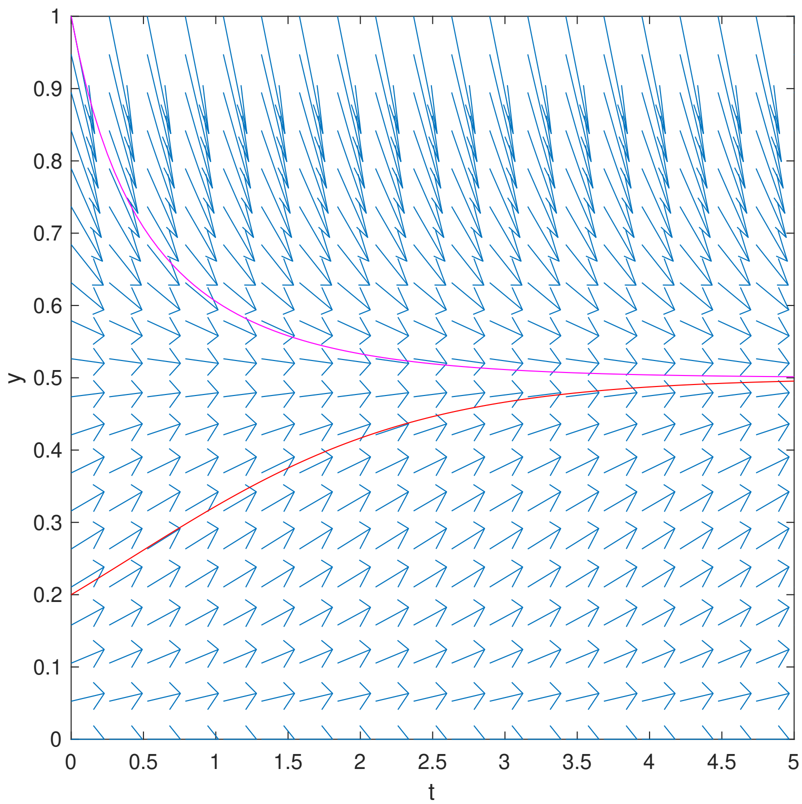

Abbildung 1 – Richtungsfeld der logistischen Diff.-Gl. und zwei mit dem Euler Verfahren numerisch berechneten Lösungen.

b) Siehe das kommentierte `expEuler.m`.

c) Die beiden numerisch berechneten Lösungen sind in Abb. 1 dargestellt.

d) Wir beobachten, dass in dem `log-log`-Plot ($\log(h)$ vs. $\log(\text{Abs. Fehler})$) der absolute Fehler auf einer Geraden liegen (für $h \lesssim 0.1$). Dank dem Gitter erkennt

Bitte wenden!

man auch leicht, dass die Gerade ungefähr Steigung Eins hat. Also der absolute Fehler verhält sich wie $E_N = O(h^p)$ mit $p = 1$. Das explizite Euler Verfahren hat somit Ordnung Eins!

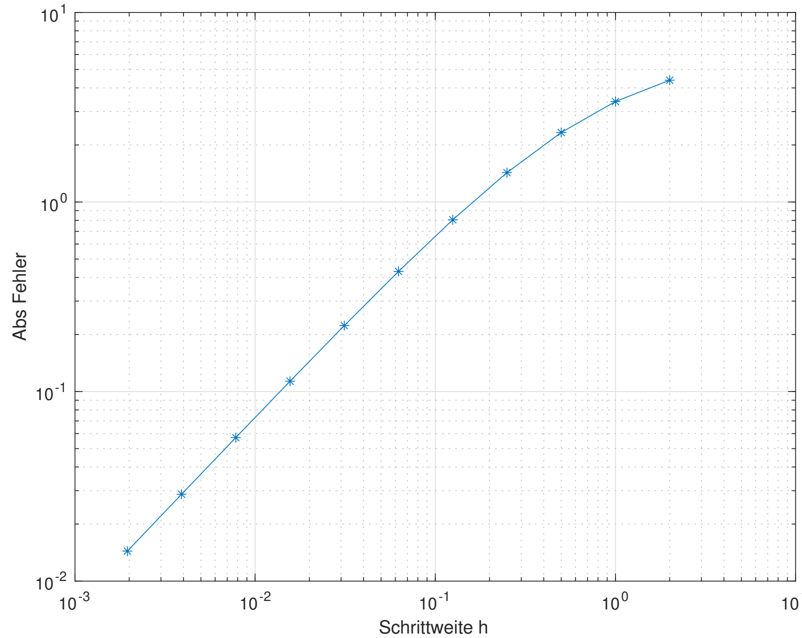

Abbildung 2 – `loglog`-Plot des absoluten Fehlers als Funktion der Schrittweite.

2. **a)** Wir setzen

$$\mathbf{z}(t) = \begin{pmatrix} z_0(t) \\ z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \dddot{y}(t) \end{pmatrix},$$

und erhalten

$$\frac{d\mathbf{z}}{dt}(t) = \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \\ \cos(z_2(t)) + z_1(t)e^{-5t} \end{pmatrix},$$

mit Anfangswert

$$\mathbf{z}(t_0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

b) Wir schreiben

$$\mathbf{z}(t) = \begin{pmatrix} y(t) \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{pmatrix},$$

Siehe nächstes Blatt!

und erhalten

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \begin{pmatrix} -z_1(t) + \cos(z_2(t))e^{-z_2(t)} \\ 1 \end{pmatrix},$$

mit Anfangswert

$$\mathbf{z}(0) = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

c) Wir schreiben

$$\tilde{\mathbf{z}}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{z}(t) \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{z}}_1(t) \\ \tilde{z}_2(t) \end{pmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{z}}_1(t) := \begin{pmatrix} \tilde{z}_{1,0}(t) \\ \tilde{z}_{1,1}(t) \\ \tilde{z}_{1,2}(t) \\ \tilde{z}_{1,3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_0(t) \\ z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \end{pmatrix},$$

und erhalten

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{\tilde{\mathbf{z}}}_1(t) \\ \\ \dot{\tilde{z}}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{z}_{1,1}(t) \\ \tilde{z}_{1,2}(t) \\ \tilde{z}_{1,3}(t) \\ \cos(\tilde{z}_{1,2}(t)) + \tilde{z}_{1,1}(t)e^{-5\tilde{z}_2(t)} \\ 1 \end{pmatrix},$$

mit Anfangswert

$$\tilde{\mathbf{z}}(t_0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -1 \\ 0 \\ t_0 \end{pmatrix}.$$

3. a) Sei $I := \dot{Q}$. Das äquivalente System von Differentialgleichungen erster Ordnung lautet

$$\begin{pmatrix} \dot{Q} \\ \dot{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ (E - Q/C - RI)/L \end{pmatrix}.$$

mit Anfangswerten

$$Q(t_0) = Q_0, \quad I(t_0) = I_0.$$

b) Siehe `expEulerRLC.m`. For the given settings, we observe that with time step size $\Delta t = 10^{-2}$ the explicit Euler method is unstable, because Δt has the same order of magnitude as of the time period of the forcing function E is $2\pi/100 \approx 0.06$. Therefore, when we decrease the time step size to 10^{-3}, the method becomes stable. For $\Delta t = 10^{-4}$ and even smaller time step sizes, the approximation accuracy increases.

Bitte wenden!

4. Die exakte Lösung des AWPs ist gegeben durch $\mathbf{y}(t) = e^{\mathbf{A}t}\,\mathbf{y}_0$.

Behauptung: $\mathbf{y}_k(t) = \left(\sum_{j=0}^{k} \frac{(\mathbf{A}t)^j}{j!}\right)\mathbf{y}_0$ für alle $k \in \mathbb{N}$. Beweis durch vollständige Induktion: Für $k = 1$ haben wir

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_1(t) &= \mathbf{y}_0 + \int_0^t \mathbf{A}\mathbf{y}_0 dt \\
&= (\mathbf{I} + \mathbf{A}t)\mathbf{y}_0 \\
&= \left(\sum_{j=0}^{1} \frac{(\mathbf{A}t)^j}{j!}\right)\mathbf{y}_0.
\end{aligned}$$

Für $k = 2$ haben wir

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_2(t) &= \mathbf{y}_0 + \int_0^t \mathbf{A}\mathbf{y}_1(s) dt \\
&= \mathbf{y}_0 + \int_0^t \mathbf{A}(\mathbf{I} + \mathbf{A}s)\mathbf{y}_0 dt \\
&= \left(\mathbf{I} + \mathbf{A}t + \frac{(\mathbf{A}t)^2}{2}\right)\mathbf{y}_0 \\
&= \left(\sum_{j=0}^{2} \frac{(\mathbf{A}t)^j}{j!}\right)\mathbf{y}_0.
\end{aligned}$$

Gehen wir davon aus, dass die Aussage für k bereits bewiesen ist. Dann für $k+1$ erhalten wir

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_{k+1}(t) &= \mathbf{y}_0 + \int_0^t \mathbf{A}\mathbf{y}_k(s) ds \\
&= \mathbf{y}_0 + \left(\sum_{j=0}^{k} \frac{\mathbf{A}^{j+1}}{j!} \int_0^t s^j ds\right)\mathbf{y}_0 \\
&= \mathbf{y}_0 + \left(\sum_{j=0}^{k} \frac{(\mathbf{A}t)^{j+1}}{(j+1)!}\right)\mathbf{y}_0 \\
&= \left(\sum_{j=0}^{k+1} \frac{(\mathbf{A}t)^j}{j!}\right)\mathbf{y}_0.
\end{aligned}$$

Da $e^{\mathbf{A}t} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\mathbf{A}t)^j}{j!}$, erhalten wir dass

$$\lim_{k\to\infty} \mathbf{y}_{k+1}(t) = e^{\mathbf{A}t}\mathbf{y}_0 = \mathbf{y}(t).$$