

## Lösungen Serie 11

---

1. Die allgemeine Lösung von  $y' = ay$  ist  $y(x) = e^{ax}$ .

- (a) richtig  
✓ (b) falsch

$y(x) = e^{ax}$  ist eine spezielle Lösung von  $y' = ay$ . Für  $c \in \mathbb{R}$  beliebig ist aber auch  $y(x) = ce^{ax}$  eine Lösung. Die allgemeine Lösung von  $y' = ay$  lautet daher nicht  $y(x) = e^{ax}$ , sondern  $y(x) = ce^{ax}$ .

2. Sind  $y_1$  und  $y_2$  Lösungen von  $y''(x) = a(x)y(x) + b(x)y'(x)$ , so ist auch jede Linearkombination von  $y_1$  und  $y_2$  eine Lösung.

- ✓ (a) richtig  
(b) falsch

Wenn  $y_1$  und  $y_2$  Lösungen von  $y''(x) = a(x)y(x) + b(x)y'(x)$  sind, gilt

$$y_i''(x) = a(x)y_i(x) + b(x)y_i'(x)$$

für  $i = 1, 2$ . Daher folgt für eine beliebige Linearkombination  $z = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2$  von  $y_1$  und  $y_2$

$$\begin{aligned} z''(x) &= \lambda_1 y_1''(x) + \lambda_2 y_2''(x) \\ &= \lambda_1 (a(x)y_1(x) + b(x)y_1'(x)) + \lambda_2 (a(x)y_2(x) + b(x)y_2'(x)) \\ &= a(x)(\lambda_1 y_1(x) + \lambda_2 y_2(x)) + b(x)(\lambda_1 y_1'(x) + \lambda_2 y_2'(x)) \\ &= a(x)z(x) + b(x)z'(x). \end{aligned}$$

Eine solche Linearkombination ist also auch eine Lösung.

*Bemerkung:* Daraus folgt insbesondere, dass die Lösungen von  $y''(x) = a(x)y(x) + b(x)y'(x)$  einen Vektorraum bilden.

**3.**  $\sin(\omega x)$  und  $\cos(\omega x)$  sind Lösungen von  $y'' + \omega^2 y = 0$ .

✓ (a) richtig

(b) falsch

Es gilt

$$(\sin(\omega x))'' = (\omega \cos(\omega x))' = -\omega^2 \sin(\omega x)$$

und

$$(\cos(\omega x))'' = (-\omega \sin(\omega x))' = -\omega^2 \cos(\omega x).$$

Daher sind  $\sin(\omega x)$  und  $\cos(\omega x)$  Lösungen von  $y'' + \omega^2 y = 0$ .

**4.**  $a \sinh(\omega x) + b \cosh(\omega x)$  ist die allgemeine Lösung von  $y'' - \omega^2 y = 0$ .

✓ (a) richtig

(b) falsch

Es gilt

$$(\sinh(\omega x))'' = (\omega \cosh(\omega x))' = \omega^2 \sinh(\omega x)$$

und

$$(\cosh(\omega x))'' = (\omega \sinh(\omega x))' = \omega^2 \cosh(\omega x).$$

Daher sind  $\sinh(\omega x)$  und  $\cosh(\omega x)$  Lösungen von  $y'' - \omega^2 y = 0$ . Da diese beiden Funktionen linear unabhängig sind und  $y'' - \omega^2 y = 0$  eine lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung ist, müssen diese Funktionen den Lösungsraum von  $y'' - \omega^2 y = 0$  aufspannen. Die allgemeine Lösung lautet also tatsächlich

$$y(x) = a \sinh(\omega x) + b \cosh(\omega x).$$

5.  $ae^{\omega x} + be^{-\omega x}$  ist die allgemeine Lösung von  $y'' - \omega^2 y = 0$ .

- ✓ (a) richtig  
(b) falsch

Es gilt

$$(e^{\omega x})'' = (\omega e^{\omega x})' = \omega^2 e^{\omega x}$$

und

$$(e^{-\omega x})'' = (-\omega e^{-\omega x})' = \omega^2 e^{-\omega x}$$

Daher sind  $e^{\omega x}$  und  $e^{-\omega x}$  Lösungen von  $y'' - \omega^2 y = 0$ . Da diese beiden Funktionen linear unabhängig sind und  $y'' - \omega^2 y = 0$  eine lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung ist, müssen diese Funktionen den Lösungsraum von  $y'' - \omega^2 y = 0$  aufspannen. Die allgemeine Lösung lautet also tatsächlich

$$y(x) = ae^{\omega x} + be^{-\omega x}.$$

*Bemerkung:* Mit  $a = \frac{1}{2}$ ,  $b = -\frac{1}{2}$  bzw.  $a = b = \frac{1}{2}$  erhält man die Lösungen  $\sinh(\omega x)$  und  $\cosh(\omega x)$ , die wir in der vorherigen Frage gefunden haben (und ebenfalls den gesamten Lösungsraum aufspannen).

6. Lösen Sie folgendes Ausgleichsproblem mit der  $QR$ -Zerlegung:

$$\begin{aligned} 4x_1 + x_2 - 9 &= r_1 \\ 7x_1 + x_2 - 12 &= r_2 \\ 4x_1 + 4x_2 - 15 &= r_3. \end{aligned}$$

Um Ihnen aufwändige Rechnungen zu ersparen, geben wir  $Q$  an:

$$Q = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 4 & -1 & 8 \\ 7 & -4 & -4 \\ 4 & 8 & -1 \end{pmatrix}.$$

- Verifizieren Sie, dass  $Q$  orthogonal ist.
- Geben Sie zuerst  $A$  und  $c$  an, und bestimmen Sie dann  $R$  und  $d = Q^\top c$ .
- Lösen Sie das Ausgleichsproblem.
- Bestimmen Sie die Länge des minimalen Residuenvektors  $r$ .

**Lösung:** *Bemerkung:* Die Lösung zu dieser Aufgabe gibt es auch als Youtube-Video: [Link](#).

- Wir rechnen nach, dass  $Q^\top Q = I_3$  gilt:

$$Q^\top Q = \frac{1}{81} \begin{pmatrix} 4 & 7 & 4 \\ -1 & -4 & 8 \\ 8 & -4 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & -1 & 8 \\ 7 & -4 & -4 \\ 4 & 8 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{81} \begin{pmatrix} 81 & 0 & 0 \\ 0 & 81 & 0 \\ 0 & 0 & 81 \end{pmatrix} = I_3.$$

Daher ist  $Q$  invertierbar und es gilt  $Q^{-1} = Q^\top$ . Somit ist  $Q$  orthogonal.

- Das Problem ist in der Form  $Ax - c = r$  gegeben mit

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 7 & 1 \\ 4 & 4 \end{pmatrix}, \quad c = \begin{pmatrix} 9 \\ 12 \\ 15 \end{pmatrix}.$$

Wegen  $A = QR$  gilt  $R = Q^{-1}A = Q^\top A$ , also

$$R = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 4 & 7 & 4 \\ -1 & -4 & 8 \\ 8 & -4 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 7 & 1 \\ 4 & 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Weiter gilt

$$d = Q^\top c = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 4 & 7 & 4 \\ -1 & -4 & 8 \\ 8 & -4 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 9 \\ 12 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 \\ 7 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

- Nach Multiplikation mit  $Q^\top$  ist das Ausgleichsproblem in der Form  $Rx - d = s$  gegeben, wobei  $s := Q^\top r$  genau dann minimal ist, wenn  $r$  minimal ist. Die Lösung dieses Problems ist das eindeutige  $x$  mit  $R_0 x = d_0$ , wobei  $R_0$  bzw.

$d_0$  die obersten zwei Zeilen von  $R$  bzw.  $d$  bezeichnen. Die Lösung  $x$  erfüllt daher

$$\begin{aligned}9x_1 + 3x_2 &= 20, \\3x_2 &= 7,\end{aligned}$$

d.h.  $x_2 = \frac{7}{3}$  und  $x_1 = \frac{1}{9}(20 - 3x_2) = \frac{13}{9}$ . Es gilt also

$$x = \begin{pmatrix} \frac{13}{9} \\ \frac{7}{3} \end{pmatrix}.$$

d) Weil  $Q$  orthogonal ist, gilt  $\|r\| = \|Q^\top r\| = \|s\|$ , somit ist die Länge des minimalen Residuenvektors  $r$  durch

$$\|r\| = \|s\| = \|Rx - d\| = \|d_1\| = 1$$

gegeben, wobei  $d_1$  den untersten Eintrag von  $d$  bezeichnet.

7. Gegeben sei das Differentialgleichungssystem 1. Ordnung  $\dot{y} = Ay$ , wobei

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

- a) Bestimmen Sie die allgemeine Lösung.  
 b) Bestimmen Sie die spezielle Lösung zu den Anfangsbedingungen

$$y(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

- c) Bestimmen Sie alle Anfangsbedingungen  $y_1(0), y_2(0), y_3(0)$ , für welche die zugehörigen Lösungen  $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$  gegen Null streben für  $t \rightarrow +\infty$ .

**Lösung:**

- a) Wir bestimmen zuerst die Eigenwerte von  $A$  (Entwicklung nach der ersten Zeile):

$$\begin{aligned} \det(A - \lambda I_3) &= \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 0 \\ 1 & 1-\lambda & 1 \\ 0 & 1 & -\lambda \end{vmatrix} = -\lambda(-\lambda(1-\lambda) - 1) - 1(-\lambda) \\ &= -\lambda(\lambda^2 - \lambda - 2) = -\lambda(\lambda + 1)(\lambda - 2) \stackrel{!}{=} 0. \end{aligned}$$

Die Eigenwerte von  $A$  sind also durch  $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 2$  gegeben.

Die Eigenvektoren zum Eigenwert  $\lambda_1 = -1$  sind gegeben durch

$$\left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Also ist zum Beispiel  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$  eine Basis von  $E_{-1}$ .

Die Eigenvektoren zum Eigenwert  $\lambda_2 = 0$  sind gegeben durch

$$\left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Also ist zum Beispiel  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$  eine Basis von  $E_0$ .

Die Eigenvektoren zum Eigenwert  $\lambda_3 = 2$  sind gegeben durch

$$\left( \begin{array}{ccc|c} -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Also ist zum Beispiel  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$  eine Basis von  $E_2$ .

Für die Transformationsmatrix

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

gilt somit

$$D := T^{-1}AT = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

Nach der Transformation  $y(t) = Tx(t)$  ist das Differentialgleichungssystem durch

$$\dot{x} = Dx(t),$$

also

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1, \\ \dot{x}_2 &= 0, \\ \dot{x}_3 &= 2x_3 \end{aligned}$$

gegeben. Das transformierte System hat die allgemeine Lösung

$$\begin{aligned} x_1(t) &= c_1 e^{-t}, \\ x_2(t) &= c_2, \\ x_3(t) &= c_3 e^{2t}. \end{aligned}$$

Die allgemeine Lösung des ursprünglichen Systems ist also durch

$$\begin{aligned} y(t) &= Tx(t) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 e^{-t} \\ c_2 \\ c_3 e^{2t} \end{pmatrix} \\ &= c_1 e^{-t} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + c_3 e^{2t} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

gegeben.

- b) Die Anfangsbedingungen  $y(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$  eingesetzt in die allgemeine Lösung ergeben das lineare Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = c_1 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + c_3 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

für  $c_1, c_2, c_3$ . Dieses lösen wir mit dem Gaussverfahren:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \end{array} \right] \xrightarrow{(E)_1} \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 3 & 3 \\ 0 & -2 & 0 & -1 \end{array} \right] \xrightarrow{(E)_2} \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 3 & 2.5 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow c_3 = \frac{5}{6}, c_2 = \frac{1}{2}, c_1 = 1 - \frac{1}{2} - \frac{5}{6} = -\frac{2}{6} = -\frac{1}{3}.$$

Somit ist die spezielle Lösung zu diesen Anfangsbedingungen durch

$$y(t) = -\frac{1}{3}e^{-t} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \frac{5}{6}e^{2t} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

gegeben.

- c) Für  $t \rightarrow \infty$  gilt  $c_1e^{-t} \rightarrow 0$  und  $c_3e^{2t}$  strebt gegen  $+\infty$  oder  $-\infty$ , ausser wenn  $c_3 = 0$  ist. Somit sind die Grenzwerte von  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$  für  $t \rightarrow \infty$  nur für  $c_3 = 0$  endlich und in diesem Fall gilt

$$y(t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} c_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

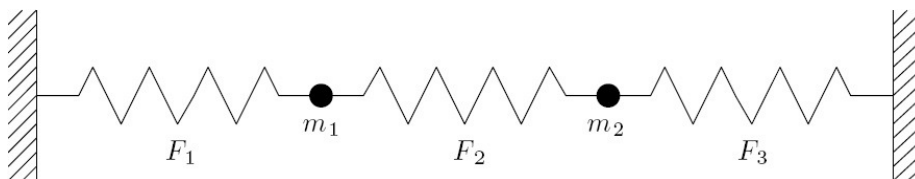
Die zugehörigen Lösungen  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$  streben also für  $c_2 = c_3 = 0$  und  $c_1$  beliebig gegen Null. Dies ist genau für die Anfangsbedingungen

$$y(0) = c_1 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

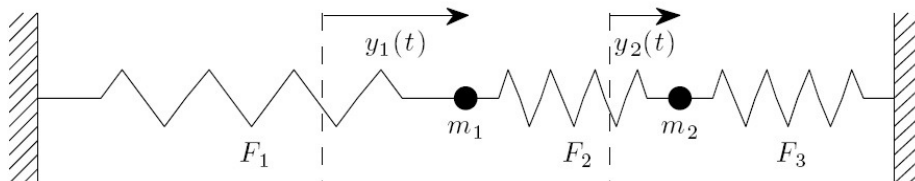
mit  $c_1 \in \mathbb{R}$  beliebig der Fall.



8. Gegeben sei folgendes Massen-Feder-System in Ruhelage:



Zur Zeit  $t$ , ausgelenkt aus der Ruhelage, sieht das System wie folgt aus:



Aus dem Hookeschen Federgesetz

$$\text{Kraft einer Feder} = \text{Federkonstante} \cdot \text{Ausdehnung der Feder}$$

und dem Newtonschen Prinzip

$$\text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung} = \text{Kraft}$$

können wir das Differentialgleichungssystem 2. Ordnung

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 &= -f_1 y_1 + f_2 (y_2 - y_1) \\ m_2 \ddot{y}_2 &= -f_2 (y_2 - y_1) - f_3 y_2 \end{aligned}$$

herleiten, wobei  $f_1, f_2, f_3$  die Federkonstanten der drei Federn bezeichnen. Wir nehmen an, dass die Federkonstanten mit den Massen wie folgt zusammenhängen:  $f_1 = 3m_1, f_2 = 2m_1 = m_2, f_3 = 3m_2$ . Die Bewegung wird also durch das Differentialgleichungssystem 2. Ordnung

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 &= -5y_1 + 2y_2 \\ \ddot{y}_2 &= y_1 - 4y_2 \end{aligned}$$

beschrieben. Bestimmen Sie die Lösung dieses Systems zu den Anfangsbedingungen

$$\begin{aligned} y_1(0) &= 6, & \dot{y}_1(0) &= 0, \\ y_2(0) &= 0, & \dot{y}_2(0) &= 0. \end{aligned}$$

**Lösung:** Wir schreiben das System in der Form  $\ddot{y} = A y$  mit  $A = \begin{pmatrix} -5 & 2 \\ 1 & -4 \end{pmatrix}$  und

$$y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix}.$$

Um die allgemeine Lösung zu bestimmen, berechnen wir zuerst die Eigenwerte und Eigenvektoren von  $A$ :

$$\begin{aligned} \det(A - \lambda I_2) &= \begin{vmatrix} -5 - \lambda & 2 \\ 1 & -4 - \lambda \end{vmatrix} = (-5 - \lambda)(-4 - \lambda) - 2 = \lambda^2 + 9\lambda + 18 \\ &= (\lambda + 3)(\lambda + 6) \stackrel{!}{=} 0. \end{aligned}$$

Die Eigenwerte sind also  $\lambda_1 = -6$ ,  $\lambda_2 = -3$ .

Die Eigenvektoren zum Eigenwert  $\lambda_1 = -6$  sind gegeben durch

$$\left( \begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Also ist zum Beispiel  $\left\{ \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$  eine Basis von  $E_{-6}$ .

Die Eigenvektoren zum Eigenwert  $\lambda_2 = -3$  sind gegeben durch

$$\left( \begin{array}{cc|c} -2 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{cc|c} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Also ist zum Beispiel  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$  eine Basis von  $E_{-3}$ .

Für

$$T = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

gilt somit

$$D := T^{-1}AT = \begin{pmatrix} -6 & 0 \\ 0 & -3 \end{pmatrix}.$$

Nach der Transformation  $y(t) = Tx(t)$  haben wir also  $\ddot{x}_1 = -6x_1$ ,  $\ddot{x}_2 = -3x_2$ .

Die allgemeine Lösung für  $x$  lautet

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_1 \cos(\sqrt{6}t) + b_1 \sin(\sqrt{6}t), \\ x_2(t) &= a_2 \cos(\sqrt{3}t) + b_2 \sin(\sqrt{3}t). \end{aligned}$$

Die  $a_i$ ,  $b_i$  lassen sich mit Hilfe der Anfangsbedingungen bestimmen:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix} &= y(0) = Tx(0) = T \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2a_1 + a_2 \\ -a_1 + a_2 \end{pmatrix} \Rightarrow a_1 = a_2 = 2, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} &= \dot{y}(0) = T\dot{x}(0) = T \begin{pmatrix} \sqrt{6}b_1 \\ \sqrt{3}b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\sqrt{6}b_1 + \sqrt{3}b_2 \\ -\sqrt{6}b_1 + \sqrt{3}b_2 \end{pmatrix} \Rightarrow b_1 = b_2 = 0. \end{aligned}$$

Also folgt  $x_1(t) = 2 \cos(\sqrt{6}t)$  und  $x_2(t) = 2 \cos(\sqrt{3}t)$  und wir erhalten die spezielle Lösung

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} &= T \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \cos(\sqrt{6}t) \\ 2 \cos(\sqrt{3}t) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 4 \cos(\sqrt{6}t) + 2 \cos(\sqrt{3}t) \\ -2 \cos(\sqrt{6}t) + 2 \cos(\sqrt{3}t) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Dies kann man natürlich zur Kontrolle in das ursprüngliche Differentialgleichungssystem einsetzen.