

Hausaufgabe 7

Aufgabe 1

a)

Die Folge der Partialsummen lässt sich wie folgt darstellen:

$$(s_n)_{n \in \mathbb{N}} := \sum_{k=1}^n a_k$$

b)

Wir zeigen, dass die Folge s_n der Partialsummen monoton steigt. Man betrachte $s_{n+1} - s_n$:

$$s_{n+1} - s_n = \left(\sum_{k=1}^{n+1} a_k \right) - \left(\sum_{k=1}^n a_k \right) = a_{n+1} + \left(\sum_{k=1}^n a_k \right) - \left(\sum_{k=1}^n a_k \right) = a_{n+1}$$

Wir wissen weiterhin, dass $a_k \geq 0$ für alle $k \in \mathbb{N}$. Beweis (Induktion):

(IA) $k = 1$. Es gilt

$$\frac{3^1}{5^1 + 1} = \frac{3}{6} \geq 0$$

Also gilt die Aussage für $k = 1$.

(IS) Die Behauptung gelte für ein $k \in \mathbb{N}$. $k \mapsto k + 1$:

$$\frac{3^{k+1}}{5^{k+1} + 1} = \frac{3^k \cdot 3}{5^k \cdot 5 + 1} = \frac{3}{5} \cdot \frac{3^k}{5^k + \frac{1}{5}} \geq \frac{3}{5} \cdot \frac{3^k}{5^k + 1}$$

Wir wissen, dass $\frac{3^k}{5^k + 1} \geq 0$, also folgt auch $\frac{3}{5} \cdot \frac{3^k}{5^k + 1} \geq 0$. Insgesamt gilt also die Behauptung auch für $k + 1$.

Damit ist a_k stets größer 0 und es folgt $s_{n+1} - s_n = a_{n+1} \geq 0$. Also ist s_n monoton wachsend.

c)

Es gilt:

$$\forall k \in \mathbb{N}: a_k = \frac{3^k}{5^k + 1} \leq \frac{3^k}{5^k} = \left(\frac{3}{5} \right)^k$$

d)

Da $\frac{3}{5} \neq 1$ lässt sich die geometrische Summenformel (II Satz 3.5) wie folgt einsetzen:

$$\forall n \in \mathbb{N}: s_n = \sum_{k=1}^n a_k \leq \sum_{k=1}^n \left(\frac{3}{5} \right)^k = \frac{1 - \left(\frac{3}{5} \right)^{n+1}}{1 - \frac{3}{5}}$$

Sei also $(c_n)_{n \in \mathbb{N}} := \sum_{k=1}^n \left(\frac{3}{5} \right)^k$. Durch $\forall k \in \mathbb{N}: a_k \geq 0$ folgt $|a_k| = a_k$.

Weiterhin gilt $\forall k \in \mathbb{N}: a_k = |a_k| \leq c_k$. Da $\frac{3}{5} < 1$ gilt, konvergiert c_k nach Satz 3.5 (geometrische Reihe), und es folgt nach dem Minorantenkriterium (3.17), dass auch a_k konvergiert.

Aufgabe 2

Wir wenden Partialbruchzerlegung auf den gegebenen Bruch an:

$$\frac{1}{(2k+1)(2k+5)} = \frac{a}{(2k+1)} + \frac{b}{(2k+5)} \iff 1 = a(2k+5) + b(2k+1)$$

Nun stellen wir nach k um:

$$1 = a(2k+5) + b(2k+1) = 2ak + 5a + 2bk + b = k(2a+2b) + (5a+b)$$

Somit haben wir nach Koeffizientenvergleich zwei Gleichungen: $\text{II} := (2a+2b=0)$ und $\text{III} := (5a+b=1)$. Wir lösen dies durch addieren der Gleichungen:

$$\text{II} + \text{III} \cdot (-2) \implies 2a - 10a + 2b - 2b = 0 - 2 \iff -8a = -2 \iff a = \frac{1}{4}$$

Nun lässt sich $a = \frac{1}{4}$ in die andere Gleichung einsetzen:

$$5 \cdot \frac{1}{4} + b = 1 \iff b = -\frac{1}{4}$$

Also gilt nach Prinzip der Partialbruchzerlegung nun

$$\frac{1}{(2k+1)(2k+5)} = \frac{1}{4(2k+1)} - \frac{1}{4(2k+5)}$$

Ebenso gilt also

$$\sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)(2k+5)} = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+1)} - \frac{1}{4(2k+5)} = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+1)} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)}$$

Durch Indizesverschiebung erhalten wir

$$\sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+1)} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)}$$

Dies entspricht einer teleskopischen Summe, also folgt:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)} &= \sum_{k=0}^1 \frac{1}{4(2k+5)} + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{4(2k+5)} \\ &= \sum_{k=0}^1 \frac{1}{4(2k+5)} = \frac{1}{4 \cdot 5} + \frac{1}{4 \cdot 7} = \frac{1}{20} + \frac{1}{28} = \frac{3}{35} \end{aligned}$$

Insgesamt folgt also

$$\sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)(2k+5)} = \frac{3}{35} \quad \text{und ausserdem} \quad \left| \frac{1}{(2k+1)(2k+5)} \right| = \frac{1}{(2k+1)(2k+5)}$$

Also konvergiert die Reihe absolut und damit auch generell

$$(s_n)_{n \geq 2} := \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)(2k+5)} \quad \text{mit} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \frac{3}{35}$$

Aufgabe 3

a)

Sei $(a_k)_{k \in \mathbb{N}} := (-1)^{k-1} \frac{2^k}{k^k}$. Wir betrachten

$$\begin{aligned} \left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right| &= \left| \frac{\left(\frac{(-1)^k \cdot 2^{k+1}}{(k+1)^{k+1}} \right)}{\left(\frac{(-1)^{k-1} \cdot 2^k}{k^k} \right)} \right| = \frac{\left(\frac{2^{k+1}}{(k+1)^{k+1}} \right)}{\left(\frac{2^k}{k^k} \right)} = \frac{2^{k+1} \cdot k^k}{(k+1)^{k+1} \cdot 2^k} = \frac{2k^k}{(k+1)^{k+1}} \\ &= \frac{2}{k+1} \cdot \left(\frac{k}{k+1} \right)^k \stackrel{k \geq 0}{=} \frac{2}{k+1} \cdot \frac{1}{\left(\frac{k+1}{k} \right)^k} = \frac{2}{k+1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{k} \right)^k} \end{aligned}$$

Wir wissen aus Hausaufgabe 5, dass

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{k} \right)^k = e^x \quad \text{also auch} \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{k} \right)^k} = \frac{1}{e}$$

Somit lassen sich die Grenzwertsätze wie folgt anwenden:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right| = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2}{k+1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{k} \right)^k} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2}{k+1} \cdot \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{k} \right)^k} = 0 \cdot \frac{1}{e} = 0$$

Damit gilt nun $\lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right| < 1$ und nach dem Quotientenkriterium konvergiert die gegebene Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ absolut. Offensichtlich konvergiert die Reihe dann auch (3.14).

b)

Wir wissen nach Skript, dass $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} = \frac{1}{\sqrt{n}}$ eine monoton fallende und reelle Nullfolge ist.

Nach dem Leibniz-Kriterium (Satz 3.12) folgt dann, dass $\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k a_k = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\sqrt{k}}$ konvergiert.

Weiterhin gilt

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{(-1)^k}{\sqrt{k}} \right| = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{k}}$$

Hinzukommend gilt

$$\forall k \geq 1: \sqrt{k} \leq k \iff \frac{1}{\sqrt{k}} \geq \frac{1}{k}$$

Somit lässt sich durch das Majorantenkriterium (Satz 3.17) folgendes schließen:

Sei $\sum_{k=1}^{\infty} (d_k)_{k \in \mathbb{N}} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}$ die harmonische Reihe. Wir wissen nach Satz 3.6, dass diese bestimmt gegen ∞ divergiert. Weiterhin gilt:

$$\forall k \in \mathbb{N}: |a_k| = \frac{1}{\sqrt{k}} \geq \frac{1}{k} = d_k \geq 0$$

Somit divergiert die Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{(-1)^k}{\sqrt{k}} \right|$ ebenfalls. Also ist die Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\sqrt{k}}$ konvergent, aber nicht absolut konvergent.

c)

Es sei $(a_k)_{k \in \mathbb{N}} := \frac{k^2}{2^k}$. Es gilt:

$$\left| \frac{a^{k+1}}{a_k} \right| = \left| \frac{(k+1)^2}{\frac{2^{k+1}}{\frac{k^2}{2^k}}} \right| = \left| \frac{(k+1)^2 \cdot 2^k}{2^{k+1} \cdot k^2} \right| = \frac{(k+1)^2}{2 \cdot k^2} = \frac{k^2 + 2k + 1}{2k^2} = \frac{1 + \frac{2}{k} + \frac{1}{k^2}}{2}$$

Wir betrachten nun $\lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right| = \frac{1 + \frac{2}{k} + \frac{1}{k^2}}{2}$. Da 1 und 2 Konstanten sind und $x_k = \frac{2}{k}$ und $y_k = \frac{1}{k^2}$ Nullfolgen sind (Bsp. 1.11), lassen sich die Limitenregeln wie folgt anwenden:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{k} + \frac{1}{k^2}}{2} = \frac{\lim_{k \rightarrow \infty} 1 + \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2}{k} + \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k^2}}{\lim_{k \rightarrow \infty} 2} = \frac{\lim_{k \rightarrow \infty} 1 + 0 + 0}{2} = \frac{1 + 0 + 0}{2} = \frac{1}{2}$$

Daher gilt das Quotientenkriterium für die gegebene Reihe:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right| = \frac{1}{2} < 1$$

und somit ist die Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} a_k = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2}{2^k}$ absolut konvergent. Offensichtlich ist die Reihe dann auch konvergent (Satz 3.16).

d)

Es sei $(a_k)_{k \in \mathbb{N}} := \frac{(-1)^k k}{k+1}$. Die Grenzwertsätze lassen sich wieder wie folgt anwenden:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |a_k| = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{k+1} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + \frac{1}{k}} = \frac{\lim_{k \rightarrow \infty} 1}{\lim_{k \rightarrow \infty} 1 + \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k}} = \frac{1}{1 + 0} = 1$$

Damit ist $|a_k|$ keine Nullfolge, und die Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} |a_k|$ kann nicht konvergieren (3.9). Damit kann die gegebene Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ nicht absolut konvergieren. Wir wissen nun, dass $\frac{k}{k+1}$ für $k \rightarrow \infty$ gegen 1 konvergiert. Es folgt, dass a_k im unendlichen zwischen $-\frac{1}{1} = -1$ und $\frac{1}{1} = 1$ alterniert, sich also wie die Folge $(-1)^k$ verhält, welche wie im Skript bewiesen (1.10) unbestimmt divergiert. Da a_k folglich keine Nullfolge sein kann, folgt, dass $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ nicht konvergiert (3.9).

e)

Die gegebene Reihe lässt sich wie folgt umformen

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\pi^k}{4^k k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\pi^k}{4^k} \cdot \frac{1}{k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\pi}{4} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\pi}{4} \right)^k}{k!}$$

Da $\frac{\pi}{4} \in \mathbb{R}$ gilt, folgt nach Satz 3.19:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\pi}{4} \right)^k}{k!} = \exp \left(\frac{\pi}{4} \right) = e^{\pi/4} \quad \text{und außerdem} \quad \sum_{k=0}^{\infty} \left| \frac{\left(\frac{\pi}{4} \right)^k}{k!} \right| = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\pi}{4} \right)^k}{k!}$$

Somit konvergiert die Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\pi^k}{4^k k!}$ absolut und damit auch generell gegen $e^{\pi/4}$.

Aufgabe 4

Da $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ absolut konvergiert, muss nach Definition auch $\sum_{k=1}^{\infty} |a_k|$ konvergieren. Nach Korollar 3.9 ist $|a_k|$ also eine Nullfolge. Also existiert ein $N \in \mathbb{N}$ sodass gilt:

$$\forall k > N: |a_k| < 1$$

Weiterhin gilt $x^2 < x$ für $|x| < 1$, also ist $|a_k|$ eine Majorante und es gibt ein $N \in \mathbb{N}$ sodass das Majorantenkriterium für a_k^2 gilt:

$$\forall k > N: |a_k^2| \leq |a_k|$$

Damit gilt nach dem Majorantenkriterium, dass die Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} a_k^2$ absolut konvergiert und damit auch konvergiert (3.16).

Aufgabe 5

$|e^x - s_n(x)|$ lässt sich wie folgt nach oben abschätzen. Wir benutzen den Satz 3.5 der geometrischen Reihe (gekennzeichnet G) und dass $x \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$ gilt (gekz. X):

$$\begin{aligned} |e^x - s_n(x)| &= \left| \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} - \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} \right| = \left| \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \right| < \left| \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{x^k}{(n+1)!} \right| \\ &= \frac{1}{(n+1)!} \left| \sum_{k=n+1}^{\infty} x^k \right| \leq \frac{1}{(n+1)!} \sum_{k=n+1}^{\infty} |x^k| \stackrel{(X)}{<} \frac{1}{(n+1)!} \sum_{k=n+1}^{\infty} \left(\frac{1}{2}\right)^k \\ &< \frac{1}{(n+1)!} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2}\right)^k \stackrel{(G)}{=} \frac{1}{(n+1)!} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = \frac{2}{(n+1)!} \end{aligned}$$

Da e^x streng monoton wachsend ist (Satz 3.21) gilt außerdem:

$$\forall x \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right): e^{-0.5} < e^x$$

Also lässt sich die gegebene Ungleichung nun wie folgt darstellen. Sei $x \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$:

$$|e^x - s_n(x)| < \frac{2}{(n+1)!} \leq \frac{e^{-1/2}}{10^{16}} < \frac{e^x}{10^{16}}$$

Durch ausprobieren von ein paar Werten für n lässt sich dies schnell eingrenzen:

$$\frac{2}{(18+1)!} < \frac{e^{-1/2}}{10^{16}} < \frac{2}{(17+1)!}$$

Also kann die Gültigkeit dieser Ungleichung für alle $n \geq 18$ gewährleistet werden.