

Analysis I für Studierende der Ingenieurwissenschaften

Ingenuin Gasser
Department Mathematik
Universität Hamburg

Technische Universität Hamburg–Harburg
Wintersemester 2008/2009

1

3.2 Konvergenzkriterien für reelle Folgen

Definition: Eine reelle Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ heißt

monoton wachsend $:\Leftrightarrow \forall n < m : a_n \leq a_m$
streng monoton wachsend $:\Leftrightarrow \forall n < m : a_n < a_m$
nach oben beschränkt $:\Leftrightarrow \exists C \in \mathbb{R} : \forall n : a_n \leq C$

Analog: monoton fallend, streng monoton fallend, nach unten beschränkt

Satz: Eine monoton wachsende, nach oben beschränkte reelle Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist konvergent mit Grenzwert

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sup\{a_n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

2

Satz: Eine monoton wachsende, nach oben beschränkte reelle Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist konvergent mit Grenzwert

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sup\{a_n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

Beweis: Folge ist nach oben beschränkt $\Rightarrow \{a_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ besitzt Supremum

$$s := \sup\{a_n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

Sei $\varepsilon > 0$ gegeben. Dann existiert ein $N = N(\varepsilon)$ mit

$$s - \varepsilon < a_N \leq s$$

Die Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist monoton wachsend, also folgt

$$s - \varepsilon < a_N \leq a_n \leq s \quad \forall n \geq N$$

d.h.

$$|s - a_n| < \varepsilon \quad \forall n \geq N(\varepsilon)$$

3

Folgerung: Prinzip der Intervallschachtelung

Sind $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}, (b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ reelle Folgen mit

- a) $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ monoton wachsend
- b) $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ monoton fallend
- c) $\forall n \in \mathbb{N} : a_n \leq b_n$

so sind **beide Folgen konvergent**.

Gilt überdies

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - b_n) = 0$$

so haben $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ und $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ denselben Grenzwert, i.e.

$$\xi = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$$

Zusätzlich gelten die Fehlerabschätzungen

$$|a_n - \xi| \leq |b_n - a_n| \quad |b_n - \xi| \leq |b_n - a_n|$$

4

Beispiel: Arithmetisch–geometrisches Mittel

Definiere für $0 < a < b$ rekursiv zwei Folgen (a_n) und (b_n) mittels

$$\begin{aligned} a_0 &:= a & b_0 &:= b \\ a_{n+1} &:= \sqrt{a_n b_n} & b_{n+1} &:= \frac{a_n + b_n}{2} \end{aligned}$$

Folgen (a_n) und (b_n) bilden Intervallschachtelung und es gilt

$$(b_{n+1} - a_{n+1}) \leq \frac{1}{2}(b_n - a_n)$$

Der gemeinsame Grenzwert von (a_n) und (b_n)

$$\text{agm}(a, b) := \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$$

heißt

Arithmetisch–geometrisches Mittel

5

Bernoullische Ungleichung:

$$\forall x \geq -1, n \in \mathbb{N} : (1 + x)^n \geq 1 + nx$$

Gleichheit gilt nur bei $n = 1$ oder $x = 0$

Beispiel: Geometrische Folge $a_n := q^n$ mit $q \in \mathbb{R}$.

$$q > 1 : \lim_{n \rightarrow \infty} q^n = +\infty \quad (q^n = (1 + (q - 1))^n \geq 1 + n(q - 1))$$

$$q = 1 : \lim_{n \rightarrow \infty} q^n = 1$$

$$0 < q < 1 : \lim_{n \rightarrow \infty} q^n = 0 \quad (q^n = \frac{1}{(1 + (1/q - 1))^n} \leq \frac{1}{1 + n(1/q - 1)})$$

$$-1 < q \leq 0 : \lim_{n \rightarrow \infty} q^n = 0 \quad (|q^n| = |q|^n)$$

$$q = -1 : (q^n) \text{ beschränkt, aber nicht konvergent} \quad (q^n \in \{-1, 1\})$$

$$q < -1 : (q^n) \text{ divergent, kein uneigentlicher Grenzwert}$$

6

Satz: Seien $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ und $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergente reelle Folgen. Dann gelten

$$\text{a) } \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_n) = \left(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \right) \cdot \left(\lim_{n \rightarrow \infty} b_n \right)$$

$$\text{b) } \forall n : b_n \neq 0 \wedge \lim_{n \rightarrow \infty} b_n \neq 0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n}{\lim_{n \rightarrow \infty} b_n}$$

$$\text{c) } \forall n : a_n \geq 0 \wedge m \in \mathbb{N} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[m]{a_n} = \sqrt[m]{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n}$$

Beweis: Seien $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ und $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ zwei konvergente Folgen mit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \quad \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$$

7

Teil a): Es gilt (für hinreichend große n)

$$\begin{aligned} |a_n b_n - ab| &= |a_n b_n - a_n b + a_n b - ab| \\ &\leq |a_n| \cdot |b_n - b| + |b| \cdot |a_n - a| \\ &\leq C_a \cdot |b_n - b| + |b| \cdot |a_n - a| \\ &< (C_a + |b|) \varepsilon \end{aligned}$$

Teil b): Da $b_n \neq 0$ und $b \neq 0$ existiert eine Konstante $C_b > 0$ mit

$$C_b \leq |b_n| \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Damit gilt

$$\left| \frac{1}{b_n} - \frac{1}{b} \right| = \left| \frac{b - b_n}{b_n b} \right| = \frac{1}{|b_n| \cdot |b|} \cdot |b_n - b| \leq \frac{1}{C_b \cdot |b|} \cdot \varepsilon$$

für n hinreichend groß und die Aussage in b) folgt direkt aus Teil a) (denn $1/b_n \rightarrow 1/b$)

8

Teil c): Wir setzen folgenden Satz voraus (Beweis Ansorge/Oberle):

Satz: Zu $a > 0$ und $m \in \mathbb{N}$ existiert genau eine Zahl $w > 0$ mit $w^m = a$.
Diese Zahl wird mit $w = \sqrt[m]{a}$ bezeichnet.

1. Fall: Sei (a_n) eine Nullfolge und $\varepsilon > 0$ vorgegeben

$$a_n < \varepsilon^m \quad \forall n \geq N(\varepsilon^m)$$

Daraus folgt

$$0 \leq \sqrt[m]{a_n} < \varepsilon$$

und daher $\sqrt[m]{a_n} \rightarrow 0$ für $n \rightarrow \infty$

2. Fall: Sei $a > 0$. Verwende die Identität

$$x^m - y^m = (x - y) \sum_{j=1}^m x^{m-j} y^{j-1}$$

9

Identität:

$$\begin{aligned} (x - y) \sum_{j=1}^m x^{m-j} y^{j-1} &= (x - y) \cdot (x^{m-1} y^0 + x^{m-2} y^1 + \dots + x^0 y^{m-1}) \\ &= x^m y^0 + \dots + x^0 y^{m-1} - x^{m-1} y^1 - \dots - x^0 y^m \\ &= x^m - y^m \end{aligned}$$

Setze nun $x = \sqrt[m]{a_n}$ und $y = \sqrt[m]{a}$. Dann folgt

$$\begin{aligned} \left| \sqrt[m]{a_n} - \sqrt[m]{a} \right| &= \frac{|a_n - a|}{\left| (\sqrt[m]{a_n})^{m-1} + \dots + (\sqrt[m]{a})^{m-1} \right|} \\ &\leq \frac{|a_n - a|}{(\sqrt[m]{a})^{m-1}} \\ &< C \cdot \varepsilon \end{aligned}$$

für $n \geq N(\varepsilon)$

10

Bemerkung: Die Aussagen a) und b) gelten auch für komplexe Folgen

Beispiel: Gegeben sei die Folge

$$a_n := \sqrt{n^2 + 5n + 1} - n$$

Eine Umformung ergibt:

$$a_n = \frac{(n^2 + 5n + 1) - n^2}{\sqrt{n^2 + 5n + 1} + n} = \frac{5 + \frac{1}{n}}{\sqrt{1 + \frac{5}{n} + \frac{1}{n^2}} + 1}$$

und damit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{5 + 0}{\sqrt{1 + 0 + 1}} = \frac{5}{2}$$

11

Beispiel: Wir betrachten die Folge

$$a_n := \left(1 + \frac{p}{n}\right)^n$$

Kapitalverzinsung: Anfangskapital K_0 , Jahreszinssatz p

K_1	$= K_0(1 + p)$	jährlich
K_2	$= K_0 \left(1 + \frac{p}{2}\right)^2$	halbjährlich
K_4	$= K_0 \left(1 + \frac{p}{4}\right)^4$	vierteljährlich
K_{10}	$= K_0 \left(1 + \frac{p}{10}\right)^{10}$	monatlich
K_{360}	$= K_0 \left(1 + \frac{p}{360}\right)^{360}$	täglich

Untersuche die Konvergenz der Folge a_n :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = ?$$

12

Für $p > 0$ zeigt man direkt:

- die Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist streng monoton wachsend

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} > 1$$

- die Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist nach oben beschränkt

$$\left(1 + \frac{p}{n}\right)^n \leq 4^l \quad (\text{für ein } l \geq p)$$

Damit konvergiert die Folge:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = e^p$$

Formel gilt auch für negative p .

Spezialfall

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e = 2.7182\ 81828 \dots$$

(Eulersche Zahl)

13

Satz: (Cauchysches Konvergenzkriterium)

Der \mathbb{R} ist **vollständig**, d.h. jede reelle Cauchyfolge ist konvergent.

Zum Beweis verwendet man das Konzept von

Häufungspunkten

einer gegebenen Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Beispiel auf Folie

Definition: Sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge. Die Grenzwerte konvergenter Teilfolgen von $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ nennt man die **Häufungspunkte der Folge** $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Satz: (Satz von Bolzano, Weierstraß)

Jede reelle, beschränkte Folge besitzt eine konvergente Teilfolge.

14

Satz: (Cauchysches Konvergenzkriterium)

Der \mathbb{R} ist **vollständig**, d.h. jede reelle Cauchyfolge ist konvergent.

Beweisidee:

Zeige zunächst, dass jede Cauchyfolge beschränkt ist:

$$|a_n| = |a_n - a_N + a_N| < \varepsilon + |a_N|$$

Nach Bolzano, Weierstraß besitzt (a_n) einen Häufungspunkt ξ . Dann gilt

$$\begin{aligned} |a_m - \xi| &= |a_m - a_{n_k} + a_{n_k} - \xi| \\ &\leq \underbrace{|a_m - a_{n_k}|}_{\text{Cauchyfolge}} + \underbrace{|a_{n_k} - \xi|}_{\text{Häufungspunkt}} < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \end{aligned}$$

Notation:

$\liminf a_n$ = kleinster Häufungspunkt

$\limsup a_n$ = größter Häufungspunkt

15

3.3 Folgen in Vektorräumen

Abschnitt 3.2: Konvergenzkriterien für reelle Folgen $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$, $a_n \in \mathbb{R}$

Sei nun $(V, \|\cdot\|)$ ein normierter Vektorraum.

Wiederholung aus Abschnitt 3.2:

Definition: Konvergenz von Folgen

Sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in V (Vektorraum mit Norm $\|\cdot\|$)

...

3) Eine Folge (a_n) heißt **konvergent** mit **Grenzwert (Limes)** $a \in V$, falls

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall n \geq N : \|a_n - a\| < \varepsilon$$

...

Beispiel: (Unendlich-dimensionale) Funktionenräume

16

Endlich-dimensionale Vektorräume (zum Beispiel \mathbb{R}^n)

Satz: (Normäquivalenzsatz)

Je zwei Normen $\|\cdot\|$ und $\|\cdot\|'$ eines endlichdimensionalen Vektorraums V sind **äquivalent**, d.h. es gibt positive Konstanten $C_1, C_2 > 0$ mit

$$\forall v \in V \quad : \quad C_1\|v\| \leq \|v\|' \leq C_2\|v\|$$

Konvergenz und Grenzwert einer Folge sind unabhängig von der Norm.

Folgerung: Eine Folge (\mathbf{x}_m) im \mathbb{R}^n konvergiert genau dann, wenn alle n Koordinatenfolgen $(x_j^{(m)})_{m \in \mathbb{N}}, j = 1, \dots, n$ konvergieren. Der Grenzwert der Folge lässt sich komponentenweise berechnen.

Beispiel:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n}, 1 + \exp\left(\frac{1}{n}\right), \frac{n^2 + 2n + 3}{2n^2 - 1} \right)^T = \left(0, 2, \frac{1}{2} \right)^T$$

17

In endlichdimensionalen Vektorräumen gilt daher auch

- das **Cauchysche Konvergenzkriterium**

$$\exists \mathbf{a} : \mathbf{a}_m \rightarrow \mathbf{a} \quad (m \rightarrow \infty)$$

$$\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) : m, n \geq N : \|\mathbf{a}_m - \mathbf{a}_n\| < \varepsilon$$

- und der **Satz von Bolzano, Weierstraß**

Jede beschränkte Folge besitzt eine konvergente Teilfolge

Beispiel: Für $a_n := z^n, z \in \mathbb{C}$ gegeben, gilt

$$|z| > 1 \Rightarrow |a_n| = |z|^n \text{ unbeschränkt} \Rightarrow (a_n) \text{ divergent}$$

$$|z| < 1 \Rightarrow |a_n| = |z|^n \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty) \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} z^n = 0$$

18