# Samenvatting Analyse op de Lijn

Jonas van der Schaaf

13 februari 2020

## Inhoudsopgave

# 1 Metrieken

**Wat is een metrische ruimte?** Zij $S$ een verzameling en een metriek $d\colon S \times S \to \mathbb{R}_{\geq 0}$ een functie met de volgende eigenschappen:

i. Voor alle $x, y \in S$ geldt dat $d(x, y) = 0$ dan en slechts dan als geldt dat $x = y$.

ii. Voor alle $x, y \in S$ geldt dat $d(x, y) = d(y, x)$.

iii. Voor alle $x, y, z \in S$ geldt dat $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$. Dit is de driehoeksongelijkheid.

Als aan al deze eigenschappen volgaan wordt noemen we het paar $(S, d)$ een metrische ruimte.

## 1.1 Verschillende metrieken op $\mathbb{R}^k$

Het is mogelijk om op dezelfde verzameling verschillende metrieken te definiëren. Hier zijn een paar belangrijke:

**Euclidische metriek** Gegeven twee vectoren[1] $x, y \in \mathbb{R}^k$, is de Euclidische metriek op $\mathbb{R}^k$ de functie:

$$d_2\colon \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^k \to \mathbb{R}_{\geq 0}\colon (x, y) \mapsto \sqrt{\sum_{i=1}^{k} (x_i - y_i)^2}.$$

Deze functie voldoet aan alle drie de eigenschappen van een metriek. Als de metriek van een ruimte $\mathbb{R}^k$ niet vermeld wordt, wordt bedoeld dat de gebruikte metriek de Euclidische metriek is. Deze ruimte wordt ook wel de $k$-dimensionale Euclidische ruimte genoemd.

**Manhattan-metriek** Gegeven twee vectoren $x, y \in \mathbb{R}^k$, is de Manhattan-metriek op $\mathbb{R}^k$ de functie:

$$d_1\colon \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^k\colon (x, y) \mapsto \sum_{i=1}^{k} |x_i - y_i|$$

Convergentie volgens de Manhattan-metriek is equivalent aan convergentie volgens de Euclidische metriek. Het bewijs is te vinden in appendix A.

**Discrete metriek** Gegeven twee vectoren $x, y \in \mathbb{R}^k$, is de Discrete metriek op $\mathbb{R}^k$ de functie:

$$d\colon \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^k\colon (x, y) \mapsto \begin{cases} 1, & x = y \\ 0, & x \neq y \end{cases}$$

## 1.2 Rijtjes in metrieken

**Convergentie** Zij $\left(s^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ een rij[2] in een metrische ruimte $(S, d)$. Voor deze rij geldt dat dat deze convergeert naar een $s \in S$ als

$$\lim_{n\to\infty} d\left(s^{(n)}, s\right) = 0.$$

**Cauchy rijtjes** Voor een rij $\left(s^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ in een metrische ruimte $(S, d)$ geldt dat $s_n$ Cauchy is als voor elke $\epsilon > 0$ er een $N$ bestaat zodat voor alle $m, n > N$ geldt dat $d\left(s^{(m)}, s^{(n)}\right) < \epsilon$.

Een metrische ruimte is *volledig* als geldt dat elke Cauchy rij convergeert naar een element in de ruimte.

[1] Voor een vector $x \in \mathbb{R}^k$ geldt dat $x = (x_1, \ldots, x_k)$.

[2] Voor een rij in $\mathbb{R}^k$ wordt het $n^e$ element aangeduid met een superscript $n$ (geen macht), omdat het subscript $i$ wordt gebruikt voor het $i^e$ coördinaat.

**Convergentie, Cauchy en Coördinaten** Zij $\left(x^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ een rij in $\mathbb{R}^k$ dan convergeert deze alleen dan en slechts dan als voor alle $j \in \{1, \ldots, k\}$ geldt dat de rij $x_j^{(n)}$ ook convergeert in $\mathbb{R}$.

Zij $\left(x^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ een rij in $\mathbb{R}^k$. Deze is Cauchy dan en slechts dan als elke rij $(x_j^{(n)})$ een Cauchy rij is.

**Begrensdheid** Voor een verzameling $S \subseteq \mathbb{R}^k$ geldt dat deze begrensd is als er een $M > 0$ is zodat voor elke $x \in S$ geldt dat $\max\{|x_j| : j = 1, \ldots, k\} \leq M$.

Voor een rij $\left(x^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ geldt dat $(x^{(n)})$ begrensd is als geldt dat de verzameling $\{x^{(n)} : n \in \mathbb{N}_0\}$ begrensd is.

## 1.3 Volledigheid

**Volledigheid van $\mathbb{R}^k$** De $k$-dimensionale Euclidische ruimte $\mathbb{R}^k$ is volledig, dus elke Cauchy rij $\left(x^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ convergeert naar een element $x \in \mathbb{R}^k$.

**Bolzano-Weierstrass stelling in $\mathbb{R}^k$** Zij $\left(x^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ een begrensde rij in $\mathbb{R}^k$. Dan geldt dat $x^{(n)}$ een convergerende deelrij heeft.

# 2 Open en gesloten verzamelingen

## 2.1 Open verzamelingen

**Bollen** Zij $(S, d)$[3] een metrische ruimte. Dan geeft de functie

$$B : S \times \mathbb{R}_{>0} \to \mathcal{P}(S) : (s_0, r) \mapsto \{s \in S : d(s_0, s) < r\}$$

een bol met straal $r$ en middelpunt $s_0$.

**Inwendige punten** Zij $E \subseteq S$, dan geldt dat een punt $s_0 \in E$ inwendig is als geldt dat er een $r > 0$ is zodat

$$B(s_0, r) \subseteq E.$$

Voor de verzameling $E$ geldt dan dat $E^\circ := \{s \in E : s \text{ is inwendig}\}$. De verzameling $E^\circ$ heet dan het inwendige van $E$.

**Open verzamelingen** Een verzameling $E \subseteq S$ heet open als geldt dat $E = E^\circ$.

**Stellingen over open verzamelingen** De volgende stellingen over open verzamelingen zijn waar:

- De verzameling $S$ is open in $S$
- De lege verzameling $\varnothing$ is open in $S$
- De vereniging van open verzamelingen is open[4].
- De doorsnede van *eindig* veel open verzameling is een open verzameling.

[3] In de rest van deze samenvatting wordt in elke definitie geïmpliceerd dat $(S, d)$ een metrische ruimte is zonder dat het er explicitiet bij wordt gezegd.

[4] Dit geldt ook als je oneindig veel verzamelingen neemt.

# A Equivalentie van convergentie in de Manhattan- en Euclidische metriek

*Bewijs.* Stel een rij $\left(x^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ convergeert in $(\mathbb{R}^k, d_2)$ naar $x \in \mathbb{R}^k$. Dan geldt dat er voor elke $\epsilon > 0$ er een $N$ is zodat voor alle $n > N$ geldt dat $d_2(x^{(n)}, x) < \epsilon$. Laat nu $\epsilon > 0$ en kies voor $N$ het getal zodat voor alle $n > N$ geldt dat $d_2\left(x^{(n)}, x\right) < \frac{\epsilon}{k}$.

We weten dat voor alle $a, b \in \mathbb{R}^k$ geldt dat

$$|a_i - b_i| \leq \sqrt{\sum_{j=0}^{k}(a_j - b_j)^2}$$

Door dan aan beide kanten te sommeren over $i$ krijgen we

$$\begin{aligned}
d_1(a,b) &= \sum_{i=1}^{k} |a_i - b_i| \\
&\leq \sum_{i=1}^{k} \sqrt{\sum_{j=0}^{k}(a_j - b_j)^2} \\
&= k \cdot \sqrt{\sum_{j=0}^{k}(a_j - b_j)^2} \\
&= k \cdot d_2(a,b)
\end{aligned}$$

Dus geldt voor alle $a, b \in \mathbb{R}^k$ dat $d_1(a,b) \leq k \cdot d_2(a,b)$.

Maar we hebben $N$ zo gekozen dat voor alle $n > N$ geldt dat $d_2(x^{(n)}, x) < \frac{\epsilon}{2}$. Dus geldt ook dat $d_1(x^{(n)}, x) \leq k \cdot d_2(x^{(n)}, x) < \epsilon$. Dus voor elke $\epsilon > 0$ is er een $N$ zodat voor alle $n > N$ geldt dat $d_1(x^{(n)}, x) < \epsilon$. Dus als een rij convergeert in $\mathbb{R}^k, d_2$, dan convergeert deze ook in $(\mathbb{R}^k, d_1)$.

Stel dat een rij $\left(x^{(n)}\right)_{n=1}^{\infty}$ convergeert in $\mathbb{R}^k, d_1$. Dan geldt dat er voor elke $\epsilon > 0$ er een $N$ is zodat voor alle $n > N$ geldt dat $d_2(x^{(n)}, x) < \epsilon$. Laat $\epsilon > 0$ en kies $N$ zodat voor alle $n > N$ geldt dat $d_1(x^{(k)}, x) < \epsilon$.

Beschouw nu vervolgens voor $a, b \in \mathbb{R}^k$ de afstand volgens de Manhattan-metriek en volgens de Euclidische metriek. Hiervoor geldt dat

$$\begin{aligned}
\left(d_2(a,b)\right)^2 &= \sum_{i=1}^{k}(a_i - b_i)^2 \\
&\leq \left(\sum_{i=1}^{k}(a_i - b_i)\right)^2 \\
&= \left(d_1(a,b)\right)^2
\end{aligned}$$

, dus dan geldt ook dat $d_2(a,b) \leq d_1(a,b)$ voor alle $a, b \in \mathbb{R}^k$.

Daaruit kunnen we dan opmaken dat voor alle $n > N$ geldt dat $d_2(x^{(n)}, x) \leq d_1(x^{(n)}, x) < \epsilon$. Dus geldt dat voor elke $\epsilon > 0$ dat er een $N$ is zodat voor alle $n > N$ geldt dat $d_2(x^{(n)}, x) < \epsilon$. Dus als $x^{(n)}$ convergeert naar $x$ in $\mathbb{R}^k, d_1$, dan ook in $\mathbb{R}^k, d_2$.

Nu hebben we dus aangetoond dat convergentie in $\mathbb{R}^k, d_2, d_2$ convergentie in $\mathbb{R}^k, d_1$ impliceert en andersom, en dus zijn de twee begrippen equivalent. $\square$