

MVE045 - Matematisk Analys

Max ”Krysset” Hagman

September 12, 2022

Contents

1 Mängder och delmängder	2
2 Intervall	4
3 Komplexa tal	7
4 Funktioner	8
4.1 Funktioner och funktionsgrafer	8
4.2 Kompositioner	8
5 Polynom och rationella funktioner	10
5.1 Polynomdivision	10
6 Grundläggande trigonometri	12
7 Talföljder och gränsvärden	14
7.1 Kontinuitet	17
8 Derivatan	23
8.1 Räkneregler och standard derivator	26

Chapter 1

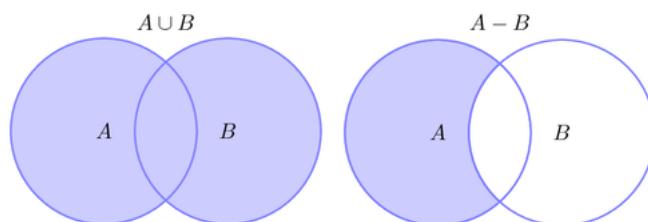
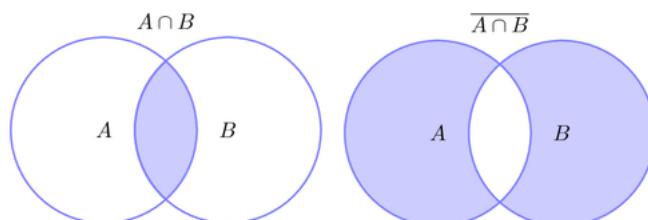
Mängder och delmängder

Mängder och delmängder är ett fundamentalt område inom matematik, alltså är det väldigt viktigt att kunna detta!

En mängd är en samling väldefinierade objekt. Dessa objekt brukar kallas för element.

En mängd A bestående av elementen a_1, a_2, \dots, a_n skrivs som $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$. Om A och B är två olika mängder så betecknar $A \cup B$ alla element som tillhör A eller B . $A \cap B$ alla element som tillhör A och B . Konstruktionen $A \cup B$ kallas för unionen av A och B och $A \cap B$ kallas för snyttet.

Ett vanligt sätt att visualisera mängder är att genom så kallade venndiagram:



Ett par saker till

- $\emptyset = \{\}$, den tomma mängden
- A^c alla element som inte finns i A (kallas komplementet)
-

Talmängder är mängder vars element är tal. Några viktiga talmängder som är grundläggande i matematik är:

- $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ de naturliga talen
- $\mathbb{Z} = \{\dots, -2-, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ heltalen
- $\mathbb{Q} = \{\text{Alla talen på formen } \frac{p}{q}\}$, där $p, q \in \mathbb{Z}, q \neq 0$
- $\mathbb{R} = \{\text{Alla decimaltal}\}$ de reella talen
- $\mathbb{C} = \{\text{alla tal } a + ib\}$, de komplexa talen

Inom matematisk analys är mängderna \mathbb{R} och \mathbb{C} speciellt i fokus.

Chapter 2

Intervall

Ett intervall är en delmängd av \mathbb{R} som innehåller minst två tal och alla tal mellan två av sina element.

Mer konkret:



Figure 2.1: $\{x \in \mathbb{R} : a < x < b\}$ skrivs (a, b)



Figure 2.2: $\{x \in \mathbb{R} : a \leq x \leq b\}$ skrivs $[a,]$



Figure 2.3: $\{x \in \mathbb{R} : a \leq x < b\}$ skrivs $[a,)$

Ex Lös olikheten $\frac{x}{2} \geq 1 + \frac{4}{x}$ och uttryck svaret som ett intervall eller en union av flera intervall.

Lösning Måste försöka skriva om olikheten till faktorisering!

$$\frac{x}{2} \geq 1 + \frac{4}{x} \Leftrightarrow \frac{4+x}{x} \Leftrightarrow \frac{x}{2} - \frac{4+x}{x} \geq 0 \Leftrightarrow \frac{x^2 - 2x - 8}{2x} \geq 0$$

Hitta nollställena till $x^2 - 2x - 8$ genom kvadratkomplettering!

$$x^2 - 2x - 8 = 0 \Leftrightarrow x^2 - 2 \cdot 1 \cdot x + 1 - 1 - 8 = 0 \Leftrightarrow (x-1)^2 - 9 = 0 \Leftrightarrow x = 1 \pm \sqrt{9} = 1 \pm 3 \Leftrightarrow x = 4 \text{ eller } x = -2$$

Kan nu skriva om $\frac{x^2 - 2x - 8}{2x} \geq 0$ som $\frac{(x-4)(x+2)}{2x} \geq 0$. Härifrån kan man använda metoden med teckenstudium:

	-2	0	4
$\frac{1}{2}x$	-	+	+
$x - 4$	-	-	0
$x + 2$	-	+	+
Tot	-	0	+

Ser att $\frac{x^2 - 2x - 8}{2x} \geq 0$ uppfylls i intervallen $[-2, 0]$ och $[4, \infty)$ och kan skriva lösningen som $[-2, 0] \cup [4, \infty)$.

Absolutbelopp Absolutbelopp av ett tal $x \in \mathbb{R}$ definieras som:

$$|x| = \begin{cases} x, & \text{om } x \geq 0 \\ -x, & \text{om } x \leq 0 \end{cases}$$

Följande tolkning gäller: Givet ett tal $a \in \mathbb{R}$ så gäller för alla $x \in \mathbb{R}$ att $|x - a| =$ avståndet mellan x och a .

Vidare gäller också, givet ett fixt tal $D \geq 0$, att $|x - a| = D \Leftrightarrow$ mängden av alla $x \in \mathbb{R}$ vars avst. till a är $= D$, dvs $|x - a| = D \Leftrightarrow$

$<$	$<$	$a - D < x < a + D$
$x \in \mathbb{R}$ vars avst. till a är $= D$, dvs $ x - a = D \Leftrightarrow$	$x = a - D$	
$>$	$>$	$x < a - D, x > a + D$

Ex (P1.41)

Lös olikheten $|x + 1| > |x - 3|$ genom att tolka avs som ett avst. på talaxeln.

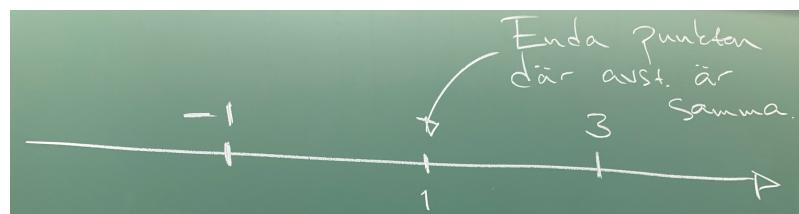
Lösning

$|x + 1| = |x - (-1)|$ = "avst mellan x och (-1) "

$|x - 3|$ = "avst. mellan x och 3 "

Så "avst. mellan x och (-1) " $>$ "avst. mellan x och 3 "

Till höger om 1 så kommer x alltid att vara längre från (-1) än 3 .



Chapter 3

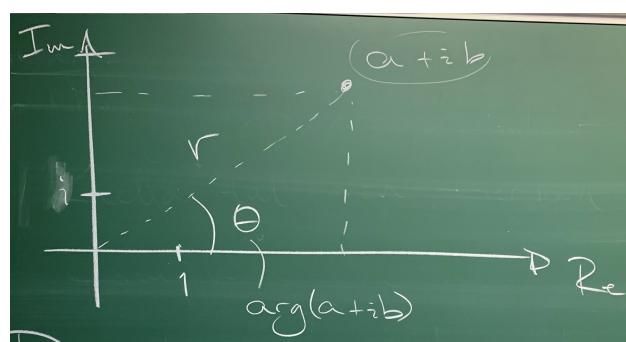
Komplexa tal

Ett komplexa tal $z \in \mathbb{C}$ kan alltid skrivas på formen $z = a + i \cdot b$ där

- a kallas för realdelen av z $Re(z)$
- b kallas för imaginärdelen av z $Im(z)$

Den imaginära enheten i löser definitionsmässigt ekv. $x^2 + 1 = 0$, dvs $i = \sqrt{-1}$. Rent visuellt kan man betrakta ett komplexa tal $a + ib$ som en punkt i det komplexa talplanet.

Det gäller att $r^2 = |a + ib|^2 = a^2 + b^2$. Givet r och argumentet θ kan alla komplexa tal skrivas $z = r(\cos(\theta) + i \cdot \sin(\theta))$



Chapter 4

Funktioner

4.1 Funktioner och funktionsgrafer

En funktion beskriver sambandet mellan in- och ut-data och kan bidra till ökad förståelse av hur olika processer hänger ihop. Klassisk machine learning handlar mycket om att just hitta bra funktioner för att relatera in- och ut-data (supervised learning).

I envariabelanalys studeras funktioner som relaterar ett tal till ett annat. Kan tänkas som en ”regel” f som avbildar ett givet tal x till ett annat tal y .

Alla de värdena som är tillåtna att mata in i f kallas för funktionens definitionsängd och betecknas $D(f)$. Mängden av alla y -värden som funktionen kan leverera kallas för värdemängden och skrivs $R(f)$ (range).

Ex Funktionen $f(x) = \frac{1}{x^2 - 1}$ har $D(f) = (-\infty, -1) \cup (-1, 1) \cup (1, \infty)$.

En funktionsgraf (eller bara en graf) givet en funktion f utgörs av alla punkter $(x, y) = (x, f(x))$. Några viktiga concept:

- En funktion sägs vara jämn om $f(-x) = f(x)$ då $(x \in D(f))$.
Betyder att f är symmetrisk m.a.p. y-axeln.
- En funktion sägs vara udda om $f(-x) = -f(x)$.
Betyder att f är antispegelsymmetrisk m.a.p. y-axeln.
- En funktion är injektiv om det för varje par $x_1, x_2 \in D(f)$ gäller att om $f(x_1) = f(x_2)$ så är $x_1 = x_2$.
- En funktion f som avbildar en mängd tal \mathbf{x} på en annan mängd \mathbf{y} , dvs $f : \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y}$ sägs vara surjektiv om $\mathbf{y} = R(f)$.

4.2 Kompositioner

En vanlig konstruktion är att kombinera två separata funktioner till en ny genom komposition. Kan göras på två sätt:

1. $f \circ g(x) := f(g(x))$

$$2. \ g \circ f(x) := g(f(x))$$

Notera att $f \circ g \neq g \circ f$ i allmänhet!

Chapter 5

Polynom och rationella funktioner

Ett polynom är en funktion som kan skrivas som: $P(x) = a_1 \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + ax + a_0$ där $a_n, \dots, a_0 \in \mathbb{R}$ kallas för polynomets koefficienter och talet n (positivt heltal) kallas för polynomets grad. En rationell funktion $R(x)$ är en funktion som kan skrivas som en kvot på två polynom $P(x)$ och $Q(x)$, dvs $R(x) = \frac{P(x)}{Q(x)}$. Definitionsängden $D(R)$ begränsas enbart av nollställena till $Q(x)$, dvs. $D(R) = \mathbb{R} \setminus \{x \in \mathbb{R} : Q(x) = 0\}$.

5.1 Polynomdivision

Rationella tal kan alltid skrivas som en heltalsdel + rest:

$$\frac{29}{6} = \frac{4 \cdot 6 + 5}{6} = \frac{4 \cdot 6}{6} + \frac{5}{6} = 4 + \frac{5}{6}$$

Motsv. funkar även för rationella funktioner och metoden för att hita ”heltalsdelen” och ”resten” kalla polynomdivision.

Ex (P6.18) Uttryck $\frac{x^4+x^2}{x^3+x^2+1}$ som summan av ett polynom och en rationell funktion.

Lösning

The image shows a handwritten polynomial division on a chalkboard. The divisor is $x - 1$. The dividend is $x^4 + x^2$. The quotient is $x^3 + x^2 + 1$. The remainder is $2x^2 - x + 1$.

Eftersom polynomet $2x^2 - x + 1$ har lägre grad än nämnaren $x^3 + x^2 + 1$ tar divisionsalgo. slut. Vi har fått att $\frac{x^4+x^2}{x^3+x^2+1} = (x - 1) + \frac{2x^2-x+1}{x^3+x^2+1} \square$.

Enligt Aritmetikens fundamentalsats så kan alla positiva heltal alltid skrivas som en unik faktorisering av primtal, t.ex $120 = 2^3 \cdot 3 \cdot 5$. Liknande resultat finns för polynom! Algebraens fundementsats säger att varje polynom av grad n har exakt n st. nollställen (ev. komplexa och räknade med multiplicitet). Vidare gäller också faktorsatsen:

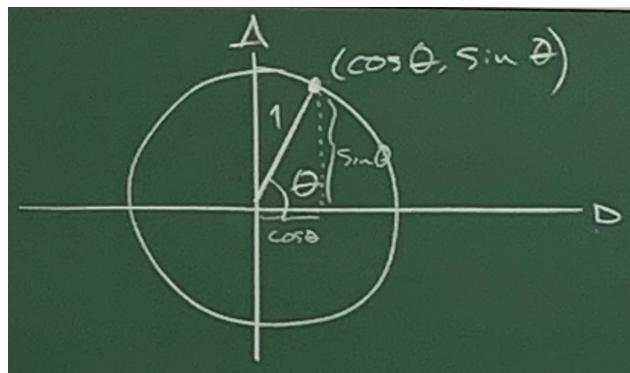
Sats Talet r är en rot (dvs ett nollställe) till ett polynom P av grad minst 1 om och endast om $(x - r)$ är en faktor av $P(x)$.

Eftersom alla polynom P av grad ≥ 1 har precis n st. nollställen säg r_1, \dots, r_n kan man alltid faktorisera ett polynom som $P(x) = (x - r_1) \cdot (x - r_2) \cdot \dots \cdot (x - r_n)$.

Chapter 6

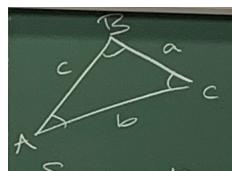
Grundläggande trigonometri

De trigonometriska funktionerna $\cos \theta$ och $\sin \theta$ def. som x - respektive y -koordinaten på den punkt på enhetscirkeln som motsvaras av vinkeln θ . Pythagoras sats ger omedelbart att $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$, även kallat trigonometriska ettan.



Vinkeln θ mäts oftast i radianer men kan också mätas i grader. Det gäller att π radianer motsvarar 180° grader.

Utifrån sin och cos definieras vidare funktionen tangens som $\tan \theta := \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$. Två trigonometriska samband som är viktiga är sinus- och cosinus-satsen:

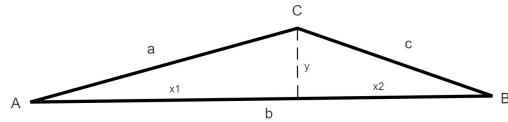


$$\text{Sinussatsen} \quad \frac{\sin A}{a} = \frac{\sin B}{b} = \frac{\sin C}{c}$$

$$\text{Cosinussatsen} \quad a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$$

Ex (P6.53) Visa att arean på en godtycklig triangel ABC kan beräknas som $\frac{1}{2}bc \cdot \sin A = \frac{1}{2}ab \cdot \sin C = \frac{1}{2}ac \cdot \sin B$.

Lösning Area = $\frac{x_1 \cdot y}{2} + \frac{x_2 \cdot y}{2} = \frac{x_1 \cdot y + x_2 \cdot y}{2}$. Men $\sin A = \frac{y}{c} \Rightarrow y = c \cdot \sin A \Rightarrow$
 $Area = \frac{x_1 \cdot c \sin A + x_2 \cdot c \sin A}{2} = \frac{(x_1 + x_2) \cdot c \cdot \sin A}{2} = \{x_1 + x_2 = b\} = \frac{1}{2}bc \sin A$. De andra formulerna följer analogt. \square



Chapter 7

Talföljder och gränsvärden

Studium av talföljder är ett av matematikens mest klassiska områden. Vi har exempelvis:

- Fibonacci-talföljden, $0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, \dots$, återfinns i olika sammanhang i naturen.
- Primalssekvensen, $2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, \dots$, finns formel för att beskriva sekvensen?
(olöst)

Ska försöka formalisera begreppen i synnerhet för oändligt långa talföljder.

Låt $\{a_1, a_2, a_3, \dots\} = \{a_n\}, n \in \mathbb{N}$ vara en godtycklig talföljd. Man säger att $\{a_n\}$ är:

- Begränsad ovan-/underifrån om det finns ett tal L sådant att $a_n \leq L/a_n \geq L \forall n = 1, 2, 3, \dots$
- Begränsad om den är begränsad både ovan- och underifrån.
- Positiv/Negativ om $a_n \geq 0/a_n \leq 0, \forall n = 1, 2, \dots$
- Växande/Avtagande om $a_{n+1} \geq a_n/a_{n+1} \leq a_n, \forall n = 1, 2, 3, \dots$
- Monoton om talföljden är antingen växande eller avtagande
- Alternerande om $a_{n+1} \cdot a_n < 0, \forall n = 1, 2, 3, \dots$

Ett viktigt begrepp för talföljder (och funktioner) är konvergens, dvs. om talföljden ”stannar av” och håller sig oförändrad om man bara kollar tillräckligt långt in i följen (dvs. n stort). Måste försöka precisera vad detta betyder ren matematiskt.

Definition Konvergent talföld

Man säger att en talföld a_n konvergerar mot $L \in \mathbb{R}$ och skriver $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L$, om det för varje positivt tal $\varepsilon > 0$ existerar ett positivt heltalet N så att det för alla $n \geq N$ gäller att $|a_n - L| \leq \varepsilon$.

Intuitivt $\{a_n\}$ konvergerar mot L om alla tal tillräckligt långt in i följen ligger godtyckligt nära talet L . Av detta följer ”enkelt” att:

- om $\{a_n\}$ konvergerar så är den begränsad.
- om $\{a_n\}$ är begränsad ovanifrån och växande så är $\{a_n\}$ konvergent. Motsvarande för begränsad underifrån och avtagande.

Bra räknelagar:

- $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n}{\lim_{n \rightarrow \infty} b_n}$, om $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n \neq 0$
- om $a_n \leq b_n \leq c_n$ och $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = L \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = L$.

Ex (9.1.25) Bestäm om möjligt det tal L som $a_n = \sqrt{n^2 + n} - \sqrt{n^2 - 1}$ konvergerar mot då $n \rightarrow \infty$

Lösning Det gäller att

$$\begin{aligned} \sqrt{n^2 - n} - \sqrt{n^2 - 1} &= \sqrt{(n+1) \cdot n} - \sqrt{(n+1)(n-1)} = \sqrt{n+1} \cdot (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) = \\ \sqrt{n+1} \cdot \frac{(\sqrt{n}\sqrt{n-1}) \cdot (\sqrt{n} + \sqrt{n-1})}{\sqrt{n} + \sqrt{n-1}} &= \sqrt{n+1} \cdot \frac{(n - (n-1))}{\sqrt{n} + \sqrt{n-1}} = \frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n} + \sqrt{n-1}} \\ \text{och } \frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n} + \sqrt{n-1}} &\leq \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{n} + \sqrt{n}} = \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n} + \sqrt{n+1}} &\leq \frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n-1} + \sqrt{n-1}} \cdot \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{n-1}} = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{2(n-1)} \leq \frac{\sqrt{n^2}}{2(n-1)} = \\ \frac{n}{2(n-1)} &= \frac{1}{2(1 - \frac{1}{n})} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \end{aligned}$$

så $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n^2 + n} - \sqrt{n^2 - 1} = \frac{1}{2} \square$

Ett av de mest kraftfulla verktygen inom matematisk analys är gränsvärden för funktioner, dvs $\lim_{x \rightarrow a} f(x), a \in \mathbb{R}$. Det ger oss derivator, integraler, differentialekvationer, ... Hur ska man definiera gränsvärdet $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$? Skulle kunna inspireras av definitionen för talföljder.

Definition (försök) Man säger att $f(x)$ konvergerar mot värdet $L \in \mathbb{R}$ då x går mot $a \in \mathbb{R}$ om det för varje talföljd $\{x_n\}$ s.a. $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ gäller att $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x) = L$.

Bättre definition i liknande riktning är dock.

Definition Man säger att $f(x)$ går mot gränsvärdet $L \in \mathbb{R}$ då x går mot $a \in \mathbb{R}$ och skriver $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$, om det för varje $\varepsilon > 0$ existerar ett annat tal $\delta > 0$ (som ev. beror av ε) s.a. om $0 < |x - a| < \delta$ så ligger x i f s definitionsmängd och $|f(x) - L| < \varepsilon$.

Ex

1. $f \rightarrow L_1$, när $x \rightarrow a_1$? Ja! Går alltid att hitta $\delta > 0$ s.a. $|f(x) - L_1| < \varepsilon$ oavsett ε .
2. $f \rightarrow L_2$, när $x \rightarrow a_1$? Omöjligt att hitta $\delta > 0$ s.a. $|f(x) - L_2| < \varepsilon$ om ε litet.

Ex (1.5.19) Använd definitionen av gränsvärde för att bevisa att

$$\lim_{x \rightarrow 1} \sqrt{x} = 1$$

Lösning Vill hitta $\delta > 0$ så att $|\sqrt{x} - 1| < \varepsilon$ så länge som $0 < |x - 1| < \delta$ (givet vilket $\varepsilon > 0$ som helst). Gäller att $|\sqrt{x} - 1| < \varepsilon \Leftrightarrow -\varepsilon < \sqrt{x} - 1 < \varepsilon \Rightarrow 1 - \varepsilon < \sqrt{x} < 1 + \varepsilon$.
Om $0 < \varepsilon < \sqrt{x} \leq 1 : 1 - \varepsilon < \sqrt{x} < 1 + \varepsilon \Rightarrow (1 - \varepsilon)^2 < x < (1 + \varepsilon)^2$ Notera att
Om $\varepsilon > 1 : 1 - \varepsilon < \sqrt{x} < 1 + \varepsilon \Rightarrow 0 < x < (1 + \varepsilon)^2$
 $(1 - \varepsilon)^2 < x < (1 + \varepsilon)^2$ alltid implicerar att $1 - \varepsilon < \sqrt{x} < 1 + \varepsilon$ dvs $|\sqrt{x} - 1| < \varepsilon$.

$$(1 - \varepsilon)^2 < x < (1 + \varepsilon)^2 \Leftrightarrow 1 - 2\varepsilon + \varepsilon^2 < x < 1 + 2\varepsilon + \varepsilon^2 \Leftrightarrow -\varepsilon(2 - \varepsilon) < x - 1 < \varepsilon(2 + \varepsilon)$$

så

$$-\varepsilon(2 - \varepsilon) < x - 1 < \varepsilon(2 + \varepsilon) \Rightarrow -\varepsilon(2 - \varepsilon) < x - 1 < \varepsilon(2 + \varepsilon)$$

om $\varepsilon < 2$. Välj därför $\delta = \varepsilon \cdot (2 - \varepsilon)$ om $\varepsilon < 2$. För $\varepsilon \leq 2$, välj t.ex $\delta = 1$ eftersom $|x - 1| < 1 \Rightarrow -1 < \sqrt{x} - 1 < 0 \Rightarrow -2 < \sqrt{x} - 1 < 2 \Rightarrow |\sqrt{x} - 1| < 2 \leq \varepsilon \square$

7.1 Kontinuitet

Matematisk analys handlar om studier av funktioner (och ekvationer) definierade på \mathbb{R} eller \mathbb{C} .

Frågeställningar och intuition för ämnet hämtas ofta från fysik/teknik där funktioner bär på någon form av information.

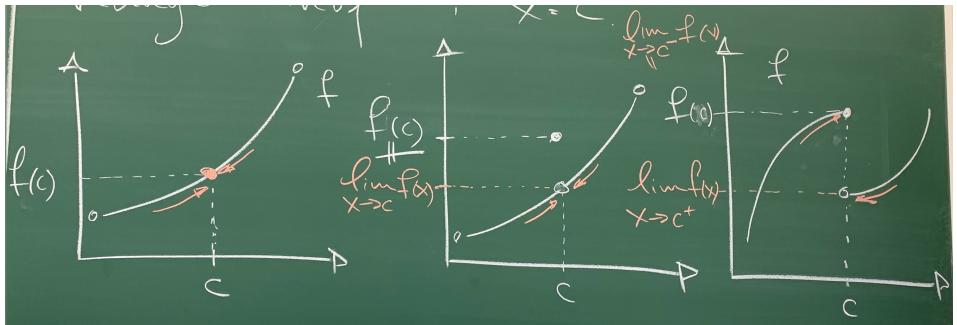
Vår definition av funktion är att det är "en regel" som avbildar ett tal x i en given definitionsmängd $D(f)$ till ett annat tal y i en värdemängd. Gruppen av sådana regler är enorm, dvs. det finns ett uppräkneligt antal möjliga funktioner, och de flesta av dom skulle inte vara användbara för modellering av verkliga system.

Ex $f(x) = \begin{cases} 1, & \text{om } x \in \mathbb{Q} \\ 0, & \text{om } x \notin \mathbb{Q} \end{cases}$ (Dirichlet-funktionen)



Om man drar en funktion slumpmässigt från mängden av alla funktioner så skulle man nästan säkert dra något i stil med dirichlet funktionen. Måste därför hitta vettig begränsad klass av funktioner för att kunna hitta meningsfulla matematiska resultat. En sådan klass är de kontinuerliga funktionerna.

Definition (Kontinuerlig funktion) Man säger att en funktion f är kontinuerlig i punkten $x = c$ (som antas vara en mindre punkt i $D(f)$) om $\lim_{x \rightarrow c} f(x) = f(c)$. Om antingen $\lim_{x \rightarrow c} f(x)$ inte existerar eller existerar men inte är lika med $f(c)$ säger man att f är diskontinuerlig i $x = c$. Vad betyder detta? Jo, det betyder att "funktionen hänger ihop" i $x = c$.

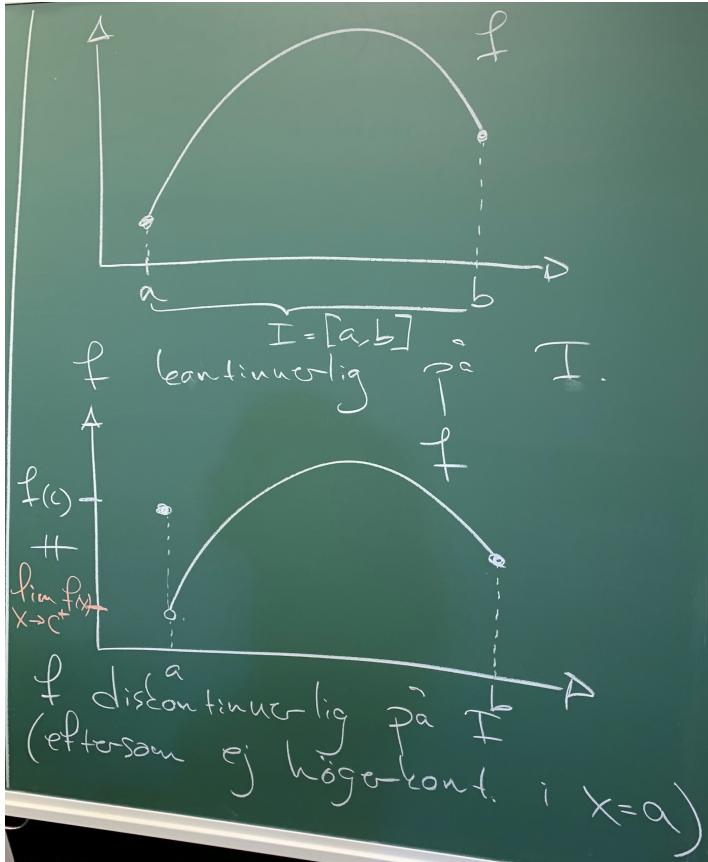


Man säger att en funktion f är kontinuerlig på ett helt interval I om f är kontinuerlig i varje punkt $x \in I$.

Hur hanterar man ändpunkterna i I ? Till exempel om $I = [a, b]$, vad ska gälla för $x \rightarrow a$ och $x = b$? Jo, f ska vara högerkontinuerlig i $x = a$ och vänsterkontinuerlig i $x = b$.

- Man säger att en funktion f är vänsterkontinuerlig i en punkt $x = c$ om $\lim_{x \rightarrow c^-} f(x) = f(c)$.
- Man säger att en funktion f är högerkontinuerlig i en punkt $x = c$ om $\lim_{x \rightarrow c^+} f(x) = f(c)$.

Så, f benämns som kontinuerlig i randpunkter till ett interval (till exempel a och b för $[a, b]$) om den är höger- respektive vänsterkontinuerlig.



Ex (1.4.9) Beskriv var i sin definitionsmängd som följande funktion är kontinuerlig, vänster- respektive högerkontinuerlig och diskontinuerlig.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x^2}, & \text{om } x \neq 0 \\ 0, & \text{om } x = 0 \end{cases}$$

Lösning Försök att skissa funktionen.

- funktionen $\frac{1}{x^2}$ är alltid positiv
- Om x är stort (antingen positivt eller negativt) så är $\frac{1}{x^2} \approx 0^+$
- Om x är nära 0 (antingen positivt eller negativt) så är $\frac{1}{x^2} \approx +\infty$
- Uppenbart tt $\frac{1}{x^2}$ är växande på $(-\infty, 0)$ och avtagande på $(0, \infty)$.

Alltså, f är kontinuerlig för alla $x \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ eftersom $\lim_{x \rightarrow a} \frac{1}{x^2} = \frac{1}{a^2} = f(x)$ för alla $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$. I $x = 0$ är f diskontinuerlig eftersom $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} = +\infty$ och $f(0) = 0$ och $0 \neq \infty \square$

Ex (1.4.16) Hur ska man definiera funktionen $f(x) = \frac{x^2 - 2}{x^4 - 4}$ i punkten $x = \sqrt{2}$ för att den ska bli kontinuerlig där?

Lösning Vad händer i $x = \sqrt{2}$?

$$f(\sqrt{2}) = \frac{\sqrt{2}^2 - 2}{\sqrt{2}^4 - 4} = \frac{2 - 2}{4 - 4} = \frac{0}{0} ???$$

Vill studera gränsvärdet $\lim_{x \rightarrow \sqrt{2}} f(x)$.

$$f(x) = \frac{\sqrt{2}^2 - 2}{\sqrt{2}^4 - 4} = \frac{x^2 - 2}{(x^2 - 2)(x^2 + 2)} = \frac{1}{x^2 + 2} \xrightarrow{x \rightarrow \sqrt{2}} \frac{1}{4}$$

Vi ser att f kan naturligt definieras i punkten $x = \sqrt{2}$ även om det inte var uppenbart från början. Genom att sätta $f(\sqrt{2}) = \frac{1}{4}$ så blir funktionen kontinuerlig i $x = \sqrt{2}$, dvs. $f(x) = \begin{cases} \frac{x^2 - 2}{x^4 - 4}, & \text{om } x \neq \sqrt{2} \\ \frac{1}{4}, & \text{om } x = \sqrt{2} \end{cases} \square$

Ex (1.5.3) Beräkna gränsvärdet

$$\lim_{x \rightarrow 3} \frac{|5 - 2x| - |x - 2|}{|x - 5| - |3x - 7|}$$

Lösning Måste reda ut hur det olika absolutbeloppen beter sig i en omgivning av $x = 3$.

$$|5 - 2x| = \begin{cases} 5 - 2x & \text{om } 5 - 2x \geq 0 \Leftrightarrow x \leq \frac{5}{2} = 2,5 \\ -(5 - 2x) & \text{om } 5 - 2x < 0 \Leftrightarrow x > 2,5 \end{cases}$$

$$|x - 2| = \begin{cases} x - 2 & \text{om } x - 2 \geq 0 \Leftrightarrow x \geq 2 \\ -(x - 2) & \text{om } x - 2 < 0 \Leftrightarrow x < 2 \end{cases}$$

$$|x - 5| = \begin{cases} x - 5 & \text{om } x - 5 \geq 0 \Leftrightarrow x \geq 5 \\ -(x - 5) & \text{om } x - 5 < 0 \Leftrightarrow x < 5 \end{cases}$$

$$|3x - 7| = \begin{cases} 3x - 7 & \text{om } 3x - 7 \geq 0 \Leftrightarrow x \geq \frac{7}{3} \approx 2,33 \\ -(3x - 7) & \text{om } 3x - 7 < 0 \Leftrightarrow x < 2,33 \end{cases}$$

Vi kan alltså skriva gränsvärdet som:

$$\lim_{x \rightarrow 3} \frac{2x - 5 - x + 2}{5 - x - 3x + 7} = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{x - 3}{-4x + 12} = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{x - 3}{-4(x - 3)} = \frac{1}{4} \square$$

Är alla kontinuerliga funktioner ”välnartade” och alltid lämpliga för att beskriva något slags verklighet?

Nej.

- Finns massa verkliga situationer som kräver diskontinuerliga funktioner för att kunna beskrivas.
- finns väldigt ”konstiga” kontinuerliga funktioner.

Lite grundläggande egenskaper för kontinuerliga funktioner.

Om f och g är två kontinuerliga funktioner i $c \in \mathbb{R}$ så gäller att:

- $f + g$, $f - g$ och $f \cdot g$ är kontinuerliga i $x = c$ och $\frac{f}{g}$, $\frac{g}{f}$ om $g(c) \neq 0$
- $k \cdot f$ är kontinuerlig i $x = c$ för alla konstanter $k \in \mathbb{R}$.
- $(f)^{\frac{1}{n}}$ är kontinuerlig i $x = c, n \in \mathbb{N}$ (givet att $f(c) \geq 0$ om n är jämnt)

vad gäller om man vill kompononera ihop kontinuerliga funktioner?

Sats (Komposition av kont. funktioner)

Om $f \circ g := f(g(x))$ är definierad på ett interval som innehåller $x = C$ och f är kontinuerlig i $x = L$ och $\lim_{x \rightarrow c} g(x) = L$ så gäller att:

$$\lim_{x \rightarrow c} f(g(x)) = f(L) = f(\lim_{x \rightarrow c} g(x))$$

Speciellt om g är kontinuerlig i $x = c$ (dvs. $\lim_{x \rightarrow c} g(x) = g(c)$) så är kompositionen $f \circ g$ också kontinuerlig i $x = c$.

Bevis Vill bevisa att om f är kontinuerlig i $x = L$ och $\lim_{x \rightarrow c} g(x) = L$ så är $\lim_{x \rightarrow c} f(g(x)) = f(L)$ (Resten följer per automatik).

Använd definitionen av grändsvärde!

Vet att f är kontinuerlig i $y = L$, dvs. $\lim_{y \rightarrow L} f(y) = f(L)$ vilket definitsmässigt betyder att det för varje $\varepsilon > 0$ finns ett tal $\gamma > 0$ s.a. om $|y - L| < \gamma$ så är $|f(y) - f(L)| < \varepsilon$.

Vidare, eftersom $\lim_{x \rightarrow c} g(x) = L$ så finns det ett tal $\delta > 0$ sådant att om $|x - c| < \delta$ så är $|g(x) - L| < \gamma$ för vilket $\gamma > 0$ som helst. I vårt fall är vi intresserade av fallet där $y = g(x)$ och av tidigare gäller således att om bara $0 < |x - c| < \varepsilon$ så kommer $|f(g(x)) - f(L)| < \varepsilon$ oavsett hur vi väljer $\varepsilon > 0$.

Men detta betyder att $\lim_{x \rightarrow c} f(g(x)) = f(L)$ och vi har därmed visat att $\lim_{x \rightarrow c} f(g(x)) = f(L) = f(\lim_{x \rightarrow c} g(x))$ och speciellt att $f \circ g$ är kontinuerlig i $x = c$ om g är kontinuerlig i $x = c$. \square

Vi förstätter med lite allmänna egenskaper för kontinuerliga funktioner.

Sats (kontinuerliga funktioner är begränsade) (tentat)

Om f är kontinuerlig på intervallet $[a, b]$ så är f begränsad över samma intervall.

För att bevisa detta ska vi använda Bolzano-Weierstrass sats.

Sats (Bolzano-Weierstrass) (tenta)

Låt $\{a_n\}$ vara en oändlig och begränsad talföljd. Då finns en delföljd av $\{a_n\}$ som är konvergent!

Intuition: Givet att $\{a_n\}$ är begränsad så kan man alltid plocka ihop en ny talföljd med element tagna i ordning från $\{a_n\}$, säg $\{a_{n_k}\}$, så att denna följd konvergerar.

Bevis (kontinuerliga funktioner är begränsade)

Använder ett så kallad ”motsägelsebevis”, dvs. antag att satsen inte stämmer och visar att detta leder till något orimligt eller omöjligt.

Antag att f är kontinuerlig på $[a, b]$ men inte begränsad ovanifrån på $[a, b]$. I så fall gäller att det för varje heltalet $k > 0$ finns ett $x_k \in [a, b]$ så att $f(x_k) > k$ (eftersom f växer obegränsat på $[a, b]$ enligt antagande). Alltså kan vi konstruera en talföljd $\{x_n\}$ där alla $x_n \in [a, b]$ och $f(x_n) > n$. Men om alla $x_n \in [a, b]$ så måste talföljden $\{x_n\}$ vara begränsad (eftersom $a \leq x_n \leq b$). Av Bolzano-Weierstrass finns därför en delföljd till $\{x_n\}$ säg $\{x_{n_k}\}$ som är konvergent. Beteckna denna delföljds gränsvärde med x , dvs $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x$. Eftersom $x \in [a, b]$ och f är kontinuerlig i x (eftersom f kontinuerlig på hela $[a, b]$ enligt förutsättning) så gäller per definition att $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(x)$. Men eftersom $f(x_n) > n$ så måste $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = \infty$. Detta motsäger att f är kontinuerlig på $[a, b]$!

Slutsats: f måste vara begränsad ovanifrån.

Liknande resonemang gäller för att visa att f även är måste vara begränsad underifrån och därmed begränsad. \square

Sats (min-max-satsen)

Låt f vara en kontinuerlig funktion på $[a, b]$ (där $|a|, |b| < \infty$). Då existerar alltid tal $p, q \in [a, b]$ sådana att för alla $x \in [a, b]$, $f(p) \leq f(x) \leq f(q)$ dvs. f har ett minimum $m = f(p)$ och ett maximum $M = f(q)$.

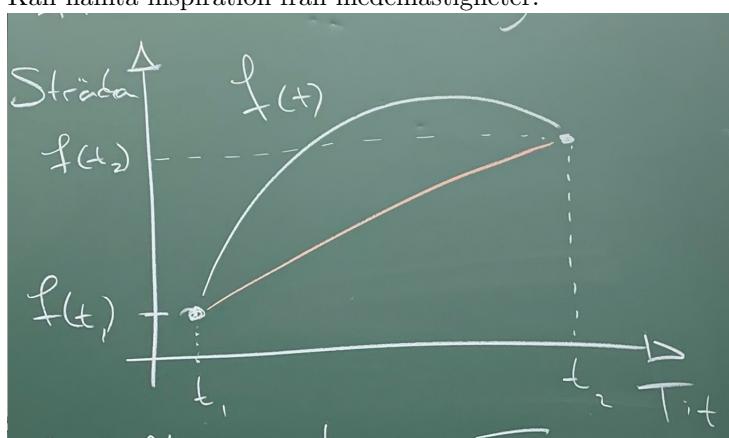
Sats (satsen om mellanliggande värden)

Låt f vara en kontinuerlig funktion på $[a, b]$ och låt s vara ett tal mellan $f(a)$ och $f(b)$. Då existerar det alltid ett tal $c \in [a, b]$ så att $f(c) = s$.

Chapter 8

Derivatan

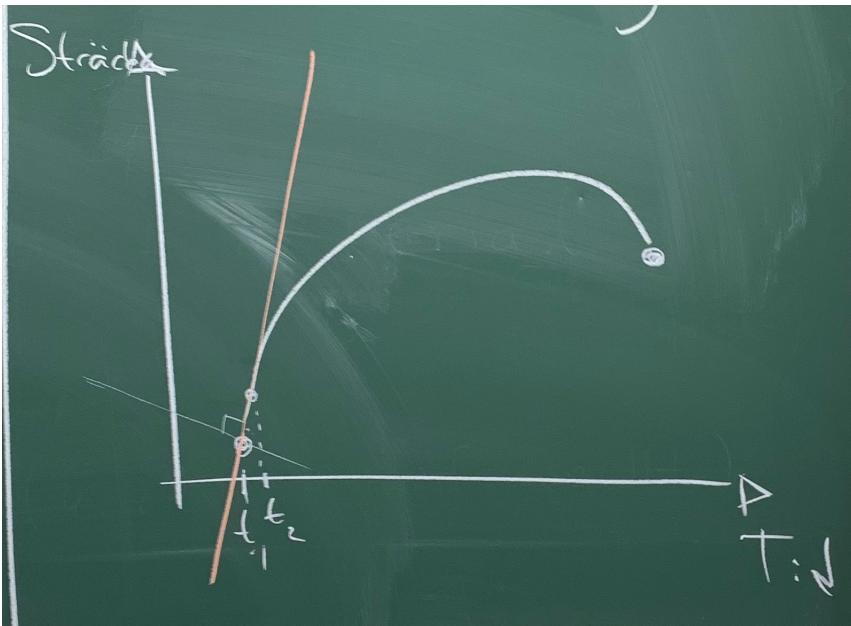
Ett av de mest fundamentalala koncepten inom matematisk analys är derivata. Handlar om hur snabbt en given funktion förändras i närheten av en punkt x . Kan hämta inspiration från medelhastigheter.



Medelhastigheten \bar{v} mellan t_1 och t_2 är $\bar{v} = \frac{f(t_2) - f(t_1)}{t_2 - t_1}$. Just \bar{v} är dessutom lutningen på den linje som går från $(t_1, f(t_1))$ till $t_2, f(t_2)$.

$$\bar{v} = \frac{y - f(t_1)}{x - t_1} \Leftrightarrow y = \bar{v}(x - t_1) + f(t_1)$$

Uppenbart att ju närmre t_2 är t_1 desto mer kan \bar{v} tolkas som den momentana hastigheten i t_1 och ”snittlinjen” övergår till att bli en tangent.



Naturligt att definiera den momentana hastigheten i en punkt x_0 för en given funktion f som

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{(x_0 + h) - x_0} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

Om detta gränsvärde existerar så kallas det för derivatan av f i $x = x_0$ och betecknas som $f'(x_0)$. Geometriskt så kan $f'(x_0)$ tolkas som tangentlinjens lutning i $x = x_0$ för grafen till f .

Precis som för gränsvärden kan man definiera höger- och vänsterderivatan som:

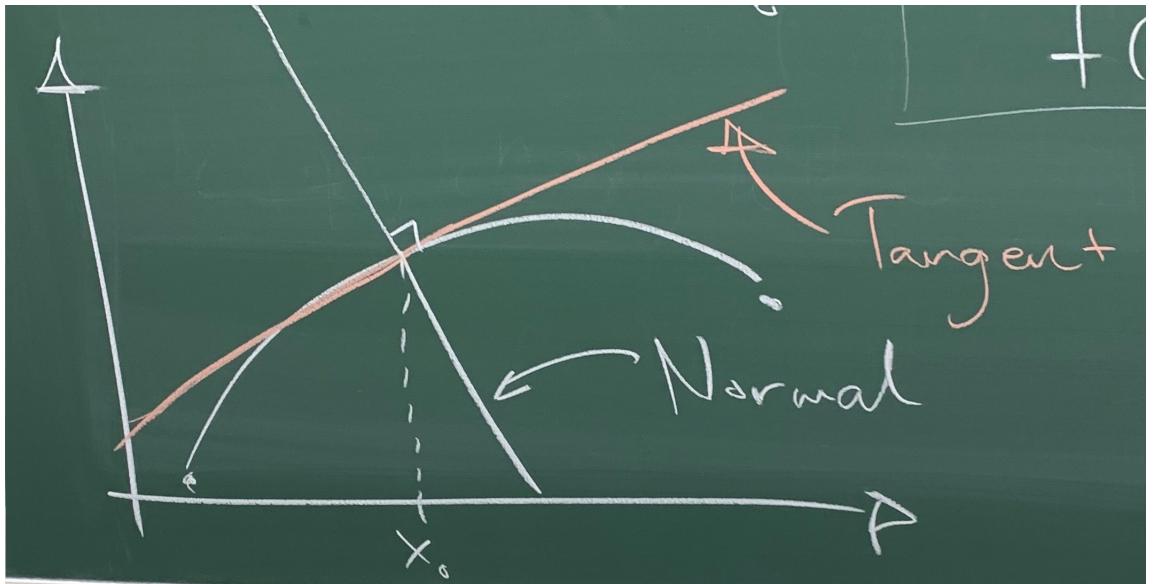
$$f'_+(x_0^+) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

$$f'_-(x_0^-) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

En funktion f sägs vara deriverbar på ett interval $[a, b]$ om den är deriverbar i varje punkt $x \in [a, b]$ och höger- respektive vänsterderiverbar i a respektive b .

från derivatan kan man enkelt beräkna lutningen för normalen, dvs. den linjen som är vinkelrät mot tangenten som:

$$\text{Normalens lutning i } x_0 = -\frac{1}{f'(x_0)}$$



Ex (2.2.21)

Använd derivatans definition och beräkna $f'(x)$ givet funktionen $f(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$.

Lösning Vi måste beräkna följande gränsvärde då $h \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned}
 \frac{f(x+h) - f(x)}{h} &= \frac{1}{\sqrt{1+(x+h)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} = \frac{\frac{\sqrt{1+x^2} - \sqrt{1+(x+h)^2}}{\sqrt{1+(x+h)^2} \cdot \sqrt{1+x^2}}}{h} = \\
 &= \frac{\sqrt{1+x^2} - \sqrt{1+(x+h)^2}}{h \sqrt{1+(x+h)^2} \sqrt{1+x^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1+(x+h)^2}}{\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1+(x+h)^2}} = \\
 &= \frac{(1+x^2) - (1+(x+h)^2)}{h \sqrt{1+(x+h)^2} \sqrt{1+x^2} (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1+(x+h)^2})} = \\
 &= \frac{1+x^2 - (1+x^2+2xh+h^2)}{h \sqrt{1+(x+h)^2} \sqrt{1+x^2} (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1+(x+h)^2})} = \\
 &= \frac{-h(2x+h)}{h \sqrt{1+(x+h)^2} \sqrt{1+x^2} (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1+(x+h)^2})} = \\
 &= \frac{-2x-h}{\sqrt{1+(x+h)^2} \sqrt{1+x^2} (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1+(x+h)^2})}
 \end{aligned}$$

Då $h \rightarrow 0$ får vi:

$$-\frac{2x}{\sqrt{1+x^2} \sqrt{1+x^2} (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1+x^2})} = -\frac{2x}{2(1+x^2)^3} = \frac{x}{(1+x^2)^{\left(\frac{3}{2}\right)}}$$

8.1 Räkneregler och standard derivator

Några standard derivator:

- $f(x) = c \Rightarrow f'(x) = 0$
- $f(x) = x^r \Rightarrow f'(x) = r \cdot x^{r-1}$
- $f(x) = c \Rightarrow f'(x) = 0$

Genom derivatans definition visar att enkelt att

- $(f \pm g)'(x) = f'(x) \pm g'(x)$
- $(c \cdot f)'(x) = c \cdot f'(x)$

Två andra extremt viktiga räkneregler för derivator är produktregeln och kedjeregeln.

Produktregeln

$$(f \cdot g)'(x) = f'(x) \cdot g(x) + f(x) \cdot g'(x)$$

(Ur denna får man öven ”kvotregeln” genom att sätta $\frac{f(x)}{g(x)} = f(x) \cdot g^{-1}(x)$)

Kedjeregeln

$$(f \circ g)'(x) = f(g(x))' = f'(g(x)) \cdot g'(x)$$

Kedjeregeln ligger till grund för alla implementationer av träningssteget för neurala nätverk (typ av AI algoritm) nämligen genom så kallad ”backwards propagation”.

Intuitivt motsvarar derivatan $f'(x)$ tangentlinjens lutning för f i x . Borde betyda att f ”hänger ihop” i x , dvs att f är kontinuerlig i x ?

Sats Deriverbarhet ger kontinuitet (tent)

Om f är deriverbar i x så är f också kontinuerlig i x .

Bevis Att f är deriverbar i x betyder att gränsvärdet $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h)-f(x)}{h}$ existerar. Men det betyder att $\lim_{h \rightarrow 0} (f(x+h) - f(x)) = \lim_{h \rightarrow 0} (f(x+h) - f(x) \frac{h}{h}) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h)-f(x) \cdot h}{h} = 0$ så $\lim_{h \rightarrow 0} (f(x+h) - f(x)) = 0 \Leftrightarrow \lim_{h \rightarrow 0} f(x+h) = f(x)$. Låt $x+h=y \Rightarrow \lim_{y \rightarrow x} f(y) = f(x)$, dvs. f är kontinuerlig i x . \square

Gäller det motsatta, dvs. att om f är kontinuerlig i x så är f deriverbar i x ? Nej! Till exempel är så kallade

Browask rörelse $B(t)$ (slumpfunktion) Kontinuerlig i alla punkter men ej de-

riverbar någonstans.



Browask rörelse används bland annat inom signalbehandling och inom matematisk finans (för att modellera aktieprisutveckling).

Derivatan av trigonometriska funktioner

- $\frac{d}{dx} \sin(x) = \cos(x)$
- $\frac{d}{dx} \cos(x) = -\sin(x)$
- $\frac{d}{dx} \tan(x) = \frac{1}{\cos^2(x)} = \frac{1}{1-\sin^2(x)} = \left\{ \frac{\cos^2(x)+\sin^2(x)}{\cos^2(x)} \right\} = 1 + \tan^2(x)$

Alla dessa bygger på beviset att $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = 1$

Ex (2.4.12) Beräkna derivatan av $f(x) = (2 + |x|^3)^{\frac{1}{3}}$.

Lösning Tänk på $2 + |x|^3$ som en inre funktion och använd kedjeregeln!

$$f'(x) = \frac{1}{3} \cdot (2 + |x|^3)^{\frac{1}{3}-1} \cdot (2 + |x|^3)' = \frac{1}{3} (2 + |x|^3)^{-\frac{2}{3}} \cdot (2 + |x|^3)'$$

Vad är derivatan av $2 + |x|^3$?

$$(2 + |x|^3)' = 0 + (|x|^3)' = 3 \cdot |x|^2 \cdot (|x|)'$$

Vad är $(|x|)'$?

$$|x| = \begin{cases} x, & \text{om } x \geq 0 \\ -x, & \text{om } x < 0 \end{cases} \Rightarrow (|x|)' = \underbrace{\begin{cases} 1, & \text{om } x > 0 \\ -1, & \text{om } x < 0 \end{cases}}_{\text{sgn}(x)}$$

$= \text{sgn}(x)$ (sign function)

$$\text{så } f'(x) = \frac{1}{3} (2 + |x|^3)^{-\frac{2}{3}} \cdot 3 \cdot |x|^2 \cdot \text{sgn}(x) = \frac{x^2}{(2+|x|^3)^{\frac{2}{3}}} \cdot \text{sgn}(x), x \neq 0$$

Om en funktion f beskriver hur värdet y av någon typ av process beror av en inparameter x , dvs. $y = f(x)$ så beskriver derivatan $f'(x)$ hur snabbt eller långsamt motsvarande process förändras givet indata x . $f''(x)$ kan tolkas som förändringshastigheten av f i punkten x .

Ex

x = "Framlednings temperatur för radiatorvatten"

$f(x)$ = "Inomhus temperatur givet framlednings temperatur x "

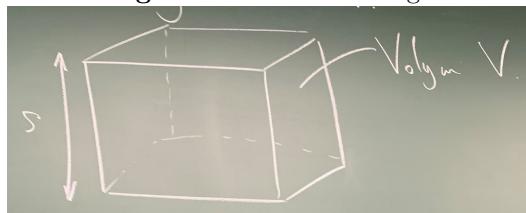
$\Rightarrow f'(x)$ = "Förändringshastighet i inomhustemperatur givet förändring i framledningstemperatur x ".

Derivator används och tolkas på liknande sätt i en mängd olika sammanhang för ekonomi/samhällsvetenskap till fysik/teknik/naturvetenskap.

Måste förstå möjligheter, begränsningar och egenskaper för f' .

Ex (2.7.20) Bestäm förändringshastigheten för sidorna av en kub som funktion av kubens volym.

Lösning Kalla kubens sidolängd för s och dess volym för V .



Vi vill hitta ett explicit uttryck för $s'(V)$. Vet att $V = s^3 \Leftrightarrow s = \sqrt[3]{V} = V^{\frac{1}{3}}$.

$$\text{Alltså är } s'(V) = \frac{1}{3} \cdot V^{\frac{1}{3}-1} = \frac{1}{3} \cdot V^{-\frac{2}{3}} \quad \square$$

Ex (2.7.29) Om det kostar en fabrikör $C(x)$ kr att tillverka x enheter av något så innebär detta en snittkostnad per enhet av $\frac{C(x)}{x}$ (Kr/enhet). Visa att det antal enheter x som minimerar snittkostnaden gör snitt- och marginalkostnad lika (dvs $C'(x)$).

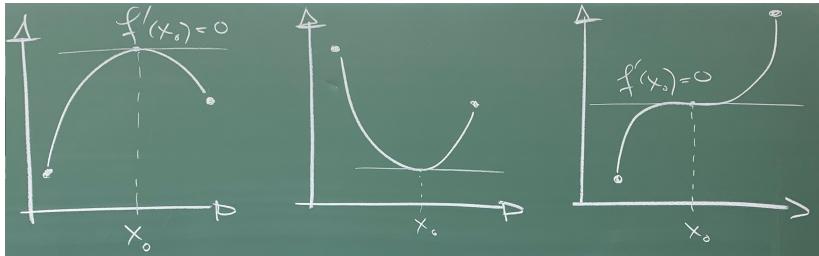
Lösning Låt $A(x)$ beteckna snittkostnad. Dvs. $A(x) = \frac{C(x)}{x}$. Då gäller att:

$$A'(x) = \frac{d}{dx} \left[\frac{C(x)}{x} \right] = \{\text{prod.reg.}\} = C'(x) \cdot x^{-1} + C(x) \cdot (-1) \cdot x^{-2} = \frac{C'(x) \cdot x - C(x)}{x^2}$$

Vi ser att

$$A'(x) = 0 \Leftrightarrow C'(x) \cdot x - C(x) = 0 \Leftrightarrow \text{marginalkost.} = C'(x) = \frac{C(x)}{x} = \text{snittkost.} \quad \square$$

Varför sattes $A'(x) = 0$ som en garant för att minimum? Rent generellt så betyder $f'(x_0) = 0$ att en given funktion f har horizontell tangent i $x = x_0$. Sådana punkter $x = x_0$ kallas för kritiska punkter och man säger att f är stationär för sådana x . Geometriskt kan detta bara betyda något av följande:



Hur visste man att $A'(x) = 0$ skulle motsvara en kritisk punkt för ett minvärde av $A(x)$? Rimligt att anta att $C(x) = K + c(x)$ där K är en konstant, fast kostand, och $c(x)$ är enhetskostnaden

- $A(x) \approx \frac{K}{x}$, om x litet \Rightarrow avtagande.
- $A(x) \approx \frac{c(x)}{x}$, om x stort \Rightarrow konstant eller växande.

$\Rightarrow A(x)$ har ett minimimum?

Smidigt att kika på högre ordning av derivator!

Givet en funktion f kan man definiera andraderivatan f'' som $'' = (f')'$. På liknande sätt definieras tredje, fjärde och högre ordnings derivator som $f^{(n)} = ((\dots(f')'\dots))'$. Andraderivatan bär precis som förstaderivatan både på teknisk- och geometrisk information om f . Om x = tid och $f(x)$ = tillryggalagd sträcka så motsvarar $f'(x)$ momentanhastighet och $f''(x)$ momentanacceleration. Geometriskt så kan $f''(x_0)$ tolkas som krökningen av grafen till f i punkten $x = x_0$. Det gäller att om

- $f''(x_0) > 0 \Rightarrow f$ konvex i x_0
- $f''(x_0) < 0 \Rightarrow f$ konkav i x_0
- $f''(x_0) = 0 \Rightarrow f$ kan vara konvex, konkav eller inget (och kan vara en så kallad inflektionspunkt.)

Speciellt gäller för stationära punkter där $f'(x_0) = 0$ att:

- $f''(x_0) > 0 \Rightarrow f$ har ett lokalt minimum i x_0
- $f''(x_0) < 0 \Rightarrow f$ har ett lokalt maximum i x_0

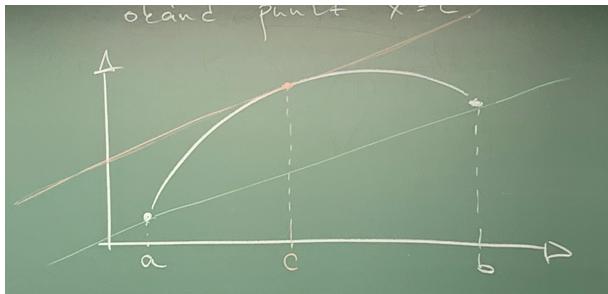
Sats (Rolle's sats)

Antag att g är konsttinuerlig på $[a, b]$ och deriverbar på (a, b) . Om $g(a) = g(b)$ så finns en punkt $c \in (a, b)$ sådan att $g'(c) = 0$.

Notera Rolles sats är ett specialfall av medelvärdessatsen för derivator.

Sats (Medelvärdessatsen för derivator) (tentativa)

Antag att f är en kontinuerlig funktion på $[a, b]$ och deriverbar på (a, b) . Då existerar minst en punkt $c \in (a, b)$ sådan att $\frac{f(b)-f(a)}{b-a} = f'(c)$.



Bevis Givet en funktion f som uppfyller villkoren för satsen så kan vi konstruera funktionen g som $g(x) = f(x) - \left(f(a) + \frac{f(b)-f(a)}{b-a} \cdot (x-a)\right)$. Uppenbart att g är kontinuerlig på $[a, b]$ och deriverbar på (a, b) då f är det. Alltså är $g(a) = g(b)$ och $g'(x) = f'(x) - 0 - \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$. Enligt Rolles sats finns då en punkt $c \in (a, b)$ så att $g'(c) = f'(c) - \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$ \square

Sats Låt J vara ett öppet interval och I vara J med eller utan ändpunkter. Om f är kontinuerlig på I och deriverbar på J gäller att:

- $f'(x) > 0, \forall x \in J \Rightarrow f$ strängt växande på I
- $f'(x) \geq 0, \forall x \in J \Rightarrow f$ växande på I
- $f'(x) \leq 0, \forall x \in J \Rightarrow f$ avtagande på I