

TATA69 Föreläsningar

Adnan Avdagic
Linköpings Universitet
forelasningar@avdagic.net

10 maj 2017



Innehåll

2	Föreläsning II	1
2.1	Gränsvärden för flervarre	1
2.1.1	Exempel 1	1
2.1.2	Exempel 2	1
2.1.3	Definition	2
2.1.4	Exempel 3	3
2.2	Oändlighet i envarre och flervarre	4
2.2.1	Definition	4
2.2.2	Exempel 4	5
2.3	3-variabler mot origo	5
2.3.1	Exempel 5	5
2.4	Rymdpolära koordinater	6
2.4.1	Cylindriska koordinater	7
3	Föreläsning III	8
3.1	Partiella derivator	8
3.1.1	Exempel 1	8
3.1.2	Definition	8
3.1.3	Exempel 2	9
3.1.4	Andraderivator	9
3.1.5	Sats	9
3.1.6	Exempel 3	10
3.1.7	Exempel 4	10
3.2	Differentierbarhet	11
3.2.1	Definition	11
3.2.2	Sats	11
3.2.3	Linjär avbildning	12
3.2.4	Exempel 5	12
4	Föreläsning IV	13
4.1	Kedjeregeln	13
4.1.1	Exempel 1	15
4.1.2	Linjärt variabelbyte	15
4.1.3	Byte till polära koordinater	15
4.1.4	Exempel 2	16
5	Föreläsning V	17
5.1	Gradienter	17
5.1.1	Definition	17
5.1.2	Hur tolkar man gradienter i 2D & 3D?	17
5.2	Nivåytor i 3D	19
5.2.1	Exempel 1	19
5.2.2	Exempel 2	19
5.2.3	Definition	19
5.2.4	Sats	20
5.2.5	Exempel 3	20
5.2.6	Exempel 4	20
5.2.7	Allmänt	20

6	Föreläsning VI	21
6.1	Lokala max och min	21
6.1.1	Definition	21
6.1.2	Hur hittas lokala max & min?	21
6.1.3	Sats	21
6.2	Avgör om max, min eller sadelpunkt (\bar{a} stationär)?	22
6.2.1	Fyra fall fås	23
6.2.2	Två metoder för att avgöra Q:s karaktär:	24
6.2.3	Exempel	25
7	Föreläsning VII	26
7.1	Kurvor & ytor i \mathbb{R}^3 på parameterform	26
7.1.1	Exempel 1 [Plan på parameterform]	26
7.1.2	Exempel 2	26
7.2	Funktionen $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$	27
7.2.1	Exempel 3	27
7.2.2	Exempel 4	27
7.2.3	Exempel 5	27
7.3	Linjärisering av $\bar{f}(\bar{x})$	28
7.4	Area/volym-skalning	28
7.4.1	Exempel	30
7.4.2	Invers	30
7.4.3	Exempel	30
8	Föreläsning VIII	31
8.1	Implicita funktioner	31
8.1.1	Exempel 1	31
8.1.2	Exempel 2	31
8.1.3	Exempel 3	32
8.2	Implicita funktionssatsen	32
8.2.1	Exempel 4	33
8.3	3 variabler, 1 funktion	33
8.3.1	Exempel 5	34
8.4	3 variabler, 2 funktioner	34
8.4.1	Exempel 6	34
9	Föreläsning IX	35
9.1	Dubbelintegraler	35
9.1.1	Exempel	35
9.1.2	Skiva i y -led	36
9.2	Översikt, definition av dubbelintegraler	37
9.2.1	Steg 1	37
9.2.2	Steg 2	38
9.2.3	Steg 3	38
9.2.4	Exempel	39
9.2.5	Exempel	39
9.3	Definition	40
9.3.1	Exempel	40

10 Föreläsning X	41
10.1 Variabelbyte i dubbelintegraler - Sats	41
10.1.1 Bevisidé	41
10.1.2 Exempel	41
10.1.3 På en elipsskiva	42
10.2 Trippelintegraler	43
10.2.1 Exempel	43
10.3 Integrationsordningar	44
11 Föreläsning XI	47
12 Appendix	

2 Föreläsning II

2.1 Gränsvärden för flervari

2.1.1 Exempel 1

$$f(x, y) = \frac{\sin(x^4 + y^2)}{x^4 + y^2}, \text{ ej definierad i origo} \quad (2.1)$$

Vad händer då (x, y) närmar sig $(0, 0)$?

$$\lim_{x, y \rightarrow 0, 0} \frac{\sin(x^4 + y^2)}{x^4 + y^2}$$

//sätt $t = x^4 + y^2$, $t \rightarrow 0$ då $(x, y) \rightarrow (0, 0)$ //

då fås $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin t}{t} = 1$, (standard gränsvärde)

2.1.2 Exempel 2

$$f(x, y) = \frac{x^3 + xy}{x^2 + y^2}, \text{ ej definierad i origo} \quad (2.2)$$

Gå mot origo via x-axeln (där $y = 0$)

$$f(x, 0) = \frac{x^3 + 0 * x}{x^2 + 0^2} = \frac{x^3}{x^2} = x \rightarrow 0 \text{ då } x \rightarrow 0$$

Gå mot origo via y-axeln (där $x = 0$)

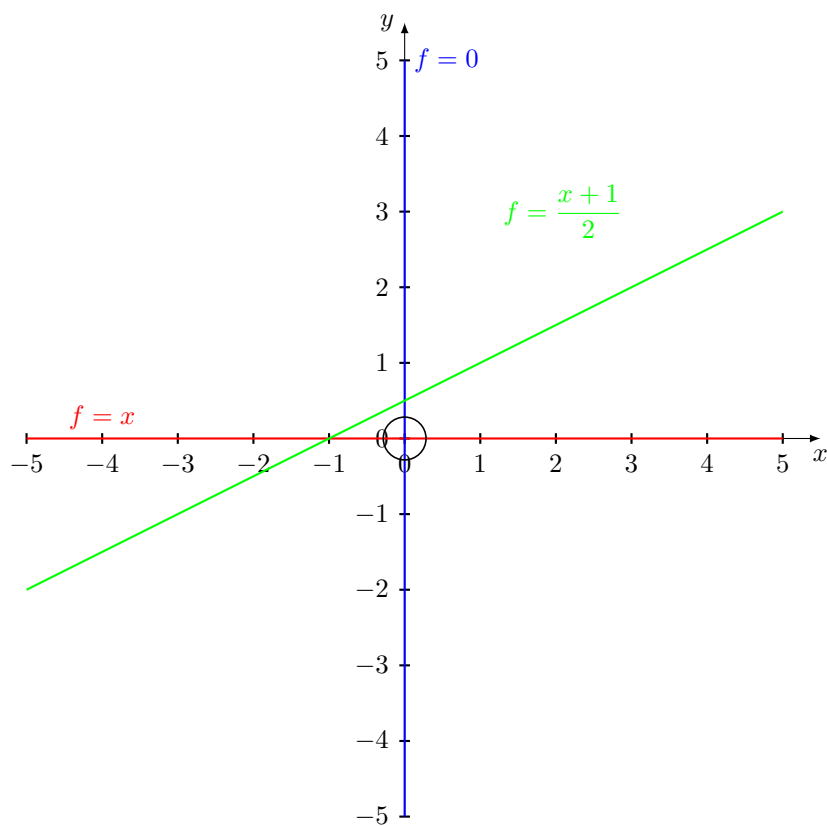
$$f(0, y) = \frac{0^3 + 0 * y}{0^2 + y^2} = \frac{0}{y^2} = 0 \rightarrow 0 \text{ då } y \rightarrow 0$$

Gå mot origo längs $y = x$

$$f(x, x) = \frac{x^3 + x * x}{x^2 + x^2} = \frac{x + 1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \text{ då } x \rightarrow 0$$

Olika värden från olika riktningar

Innanför varje liten cirkel kring origo har f värden nära 0 och nära $\frac{1}{2}$. Vi säger därför att gränsvärde ej existerar. Se [1 on the following page](#)



Figur 1: Graf i 2D

2.1.3 Definition

Funktionen \bar{f} av typ $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ har gränsvärdet $\bar{b} \in \mathbb{R}^m$ då $\bar{x} \rightarrow \bar{a} \in \mathbb{R}^n$ om $\forall \epsilon > 0 \quad \exists \delta > 0$ så att $|\bar{f}(\bar{x}) - \bar{b}| < \epsilon$ om $0 < |\bar{x} - \bar{a}| < \delta$ och $\bar{x} \in D_{\bar{f}}$. Skrivs

$$\lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{a}} \bar{f}(\bar{x}) = \bar{b}$$

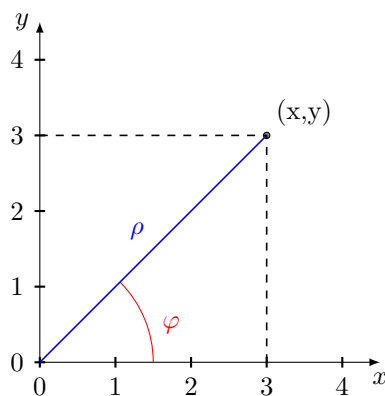
2.1.4 Exempel 3

$$f(x, y) = \frac{x^3}{x^2 + y^2}, \text{ ej definierad i origo} \quad (2.3)$$

$$0 \leq |f(x, y)| = \frac{|x^3|}{x^2 + y^2} = |x| \frac{x^2}{x^2 + y^2} \leq |x| \rightarrow 0 \text{ då } (x, y) \rightarrow (0, 0) \\ \Rightarrow f(x, y) \rightarrow (0, 0) \text{ då } (x, y) \rightarrow (0, 0)$$

Vanliga räkneregler för gränsvärden (summa, produkt, instängning) gäller också för flervarregränsvärden Undersökning/beräkning av gränsvärden

- Om test av värden längs olika riktningar eller olika kurvor ger olika resultat så saknas gränsvärde, se (2.2)
- Sådana test kan INTE visa att gränsvärde existerar, andra metoder behövs, som (2.1) eller (2.3), eller polära koordinater



Figur 2: Graf för polära koordinater

$$\left. \begin{aligned} x &= \rho \cos(\varphi) \\ y &= \rho \sin(\varphi) \end{aligned} \right\} \\ \rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \rho > 0 \\ \tan \varphi = \frac{y}{x}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

Viktigt för gränsvärden: $(x, y) \rightarrow (0, 0) \iff \rho \rightarrow 0$

Exempel (2.2) med polära koordinater

$$\begin{aligned} \lim_{(x,y) \rightarrow 0} \frac{x^3 + xy}{x^2 + y^2} &\stackrel{\text{pol.koord}}{=} \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\rho^3 \cos^3(\varphi) + \rho^2 \cos(\varphi) \sin(\varphi)}{\rho^2} = \\ &= \lim_{\rho \rightarrow 0} \left(\overbrace{\rho \cos^3(\varphi)}^{\rightarrow 0} + \underbrace{\cos(\varphi) \sin(\varphi)}_{\text{vinkelberoende}} \right) \Rightarrow \text{gränsvärde existerar ej} \end{aligned}$$

Exempel (2.3) med polära koordinater

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{x^3}{x^2 + y^2} \stackrel{\text{pol.koord}}{=} \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\rho^3 \cos^3(\varphi)}{\rho^2} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \overbrace{\rho}^{\rightarrow 0} \underbrace{\cos^3(\varphi)}_{\text{begränsad}} = 0$$

2.2 Oändlighet i envarre och flervarre**Envarre**

x kan gå mot $\pm\infty$

Flervarre

bara en ∞ nämligen $|\bar{x}| \rightarrow \infty$

2D polära

$$|\bar{x}| \rightarrow \infty \iff \rho \rightarrow \infty$$

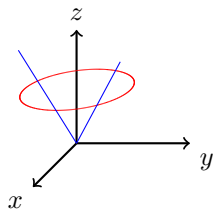
2.2.1 Definition

$$\bar{f}(\bar{x}) \rightarrow \bar{b} \text{ då } |\bar{x}| \rightarrow \infty \text{ om } \forall \epsilon > 0 \quad \exists \omega \text{ så att } |\bar{f}(\bar{x}) - \bar{b}| < \epsilon \text{ om } |\bar{x}| > \omega$$

2.2.2 Exempel 4

$$\lim_{(x,y) \rightarrow \infty} \frac{y}{x^2 + y^2} \stackrel{\text{pol.koord}}{=} \lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{\rho \sin(\varphi)}{\rho^2} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \overbrace{\frac{1}{\rho}}^{\rightarrow 0} \underbrace{\sin(\varphi)}_{\text{Begränsad}} = 0 \quad (2.4)$$

OBS! 2-variabelfunktioner som uttryckta i polärkoordinater inte beror på φ har rotationssymmetriska grafer kring z-axeln



Figur 3: Exempel på rotationssymmetri

$$z = \sqrt{x^2 + y^2} = \rho$$

2.3 3-variabler mot origo

2.3.1 Exempel 5

$$\lim_{(x,y,z) \rightarrow (0,0,0)} \frac{xyz}{x^2 + y^2 + 2z^2} = ??? \quad (2.5)$$

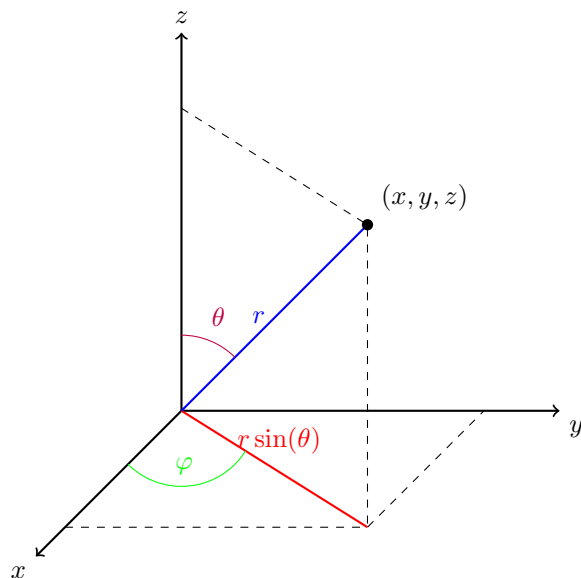
$$0 \leq \left| \frac{xyz}{x^2 + y^2 + 2z^2} \right| = \frac{|x||y||z|}{x^2 + y^2 + 2z^2} \leq \frac{|x||y||z|}{x^2 + y^2 + z^2} \leq$$

$$\begin{aligned} |x| &\leq \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ // \quad |y| &\leq \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ |z| &\leq \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{aligned} //$$

$$\leq \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{x^2 + y^2 + z^2} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \rightarrow 0 \text{ då } (x, y, z) \rightarrow (0, 0, 0)$$

$$\Rightarrow \lim_{(x,y,z) \rightarrow (0,0,0)} \frac{xyz}{x^2 + y^2 + 2z^2} = 0$$

2.4 Rymdpolära koordinater



Figur 4: Rymdpolära koordinater

$$\begin{cases} x &= r \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ y &= r \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ z &= r \cos(\theta) \end{cases}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, r > 0$$

$$0 \leq \theta \leq \pi$$

$$r \sin(\theta) = \rho$$

För gränsvärden där $(x, y, z) \rightarrow (0, 0, 0) \iff r \rightarrow 0$

Exempel (2.5) med rympolära koordinater

$$\begin{aligned}
& \lim_{(x,y,z) \rightarrow (0,0,0)} \frac{xyz}{x^2 + y^2 + 2z^2} \stackrel{\text{rympol.koord}}{=} \\
&= \lim_{r \rightarrow 0} \frac{r^3 \sin^2(\theta) \cos(\theta) \sin(\varphi) \cos(\varphi)}{r^2 + r^2 \cos^2(\theta)} = \\
&= \lim_{r \rightarrow 0} \underbrace{\overbrace{r}^{\rightarrow 0}} \frac{\sin^2(\theta) \cos(\theta) \sin(\varphi) \cos(\varphi)}{\underbrace{1 + \cos^2(\theta)}_{\text{begränsad, nämnare} \geq 1 \text{ ingen risk för } /0}} =
\end{aligned}$$

2.4.1 Cylindriska koordinater

Polära koordinater i (x,y) och vanliga i z

$$\begin{cases} x &= r \cos(\varphi) \\ y &= r \sin(\varphi) \\ z &= z \end{cases}$$

3 Föreläsning III

3.1 Partiella derivator

3.1.1 Exempel 1

$$f(x, y) = x^2y + x \sin(y) \quad (3.1)$$

Hur förändras f om bara x varieras? Vi vill derivera f m.a.p x och hålla y konstant. Skrivs:

$$\underbrace{f'_x(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x}(x, y)}_{\text{båda skrivsätten används}} = 2xy + \sin(y)$$

Motsvarande då bara y varieras

$$f'_y(x, y) = \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = x^2 + x \cos(y)$$

3.1.2 Definition

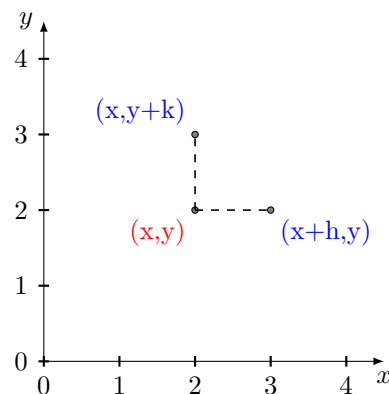
Partiella derivatan av $f(x, y)$ m.a.p x i punkten (x, y) är

$$f'_x(x, y) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h, y) - f(x, y)}{h}$$

Om gränsvärde existerar!

Motsvarande för y :

$$f'_y(x, y) = \lim_{k \rightarrow 0} \frac{f(x, y+k) - f(x, y)}{k}$$



Figur 5: Grafisk visning av hur f ändras i x - & y -riktningen

3.1.3 Exempel 2

3 variabler

$$f(x, y, z) = x^3 y^2 z + z^2 e^y \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} f'_x(x, y, z) = 3x^2 y^2 z \\ f'_y(x, y, z) = 2x^3 y z + z^2 e^y \\ f'_z(x, y, z) = x^3 y^2 + 2z e^y \end{cases}$$

3.1.4 Andraderivator

$$f''_{xx} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)$$

$$f''_{xy} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)$$

Exempel (3.1) andra derivator

$$f''_{xx} = 2y$$

$$\left. \begin{aligned} f''_{xy} &= 2x + \cos(y) \\ f''_{yx} &= 2x + \cos(y) \end{aligned} \right\} \text{lika, ingen slump}$$

$$f''_{yy} = -x \sin(y)$$

Skriv $f \in C^r$ om f 's alla r :te-derivator är kontinuerlig.**3.1.5 Sats**

$$f \in C^2 \Rightarrow f''_{xy} = f''_{yx}$$

motsvarande för ≥ 3 varianter $f(x, y)$ har 4 andraderivator varav 3 olika $f(x, y, z)$ har 9 andraderivator varav 6 olika

3.1.6 Exempel 3

Bestäm alla $f(x, y, z)$ som uppfyller

$$\begin{aligned} f'_x &= p(x, y, z) = 3x^2yz & (1) \\ f'_y &= q(x, y, z) = x^3z + 2ye^z & (2) \\ f'_z &= r(x, y, z) = x^3y + y^2e^z & (3) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Systematisk lösning

$$(1) \Rightarrow f(x, y, z) = x^3yz + \overbrace{g(y, z)}^{\text{godtycklig}} \\ \text{2-variabel } f$$

Derivera detta m.a.p y

$$\Rightarrow x^3z + g'_y(y, z) = x^3z + 2ye^z \Rightarrow$$

$$\Rightarrow g'_y(y, z) = 2ye^z \Rightarrow$$

$$\Rightarrow g(y, z) = y^2e^z + \overbrace{h(z)}^{\text{godtycklig}} \Rightarrow \\ \text{envarre } f$$

$$\Rightarrow f(x, y, z) = x^3yz + y^2e^z + h(z)$$

Derivera detta m.a.p z

$$\Rightarrow x^3y + y^2e^z + h'(z) = x^3y + y^2e^z \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h'(z) = 0 \Rightarrow h(z) = C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Svar: } f(x, y, z) = x^3yz + y^2e^z + C, C \text{ är en godtycklig konstant}$$

Man kan visa att systemet (1) - (3) är lösbart

$$\Longleftrightarrow$$

$$p'_y = q'_x$$

$$p'_z = r'_x$$

$$q'_z = r'_y$$

3.1.7 Exempel 4

$$f'_x = xy$$

$$f'_y = x^2$$

olösbart ty

$$f''_{xy} = x \neq f''_{yx} = 2x$$

3.2 Differentierbarhet

Envarre

Om $f'_a = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad \exists$ (dvs f deriverbar i a) så finns talet $f'_a = A$ sådant att $\frac{f(a+h) - f(a)}{h} - A = \frac{1}{h}(f(a+h) - f(a) - Ah) = \rho(h) \rightarrow 0$

Vi vet att $f \in C^1 \Rightarrow f$ deriverbar $\Rightarrow f$ kontinuerlig

Flervarre

3.2.1 Definition

$f(x, y)$ är differentierbar i (a, b) om \exists tal A, B så att

$$\frac{1}{\sqrt{h^2 + k^2}}(f(a+h, b+k) - f(a, b) - Ah - Bk) = \rho(h, k) \rightarrow 0 \text{ då } (h, k) \rightarrow (0, 0)$$

så deriverbar = differentierbar för envarre För ≥ 2 variabler gäller

3.2.2 Sats

$$f \in C^1 \stackrel{(1)}{\Rightarrow} f \text{ differentierbar} \begin{cases} \stackrel{(2)}{\Rightarrow} f \text{ partiellt deriverbar} \stackrel{(4)}{\nRightarrow} f \text{ kontinuerlig} \\ \stackrel{(3)}{\Rightarrow} f \text{ kontinuerlig} \stackrel{(5)}{\nRightarrow} f \text{ partiellt deriverbar} \end{cases}$$

Förklaring av pilar

1. s.56-57 i boken

$$2. f'_x(a, b) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h, b) - f(a, b)}{h} \stackrel{f \text{ diff.bar med } k=0}{=} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{Ah + B \cdot 0 + \sqrt{h^2 + 0^2} \rho(h, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} A + \underbrace{\frac{\sqrt{h^2}}{h}}_{\pm 1 \text{ begränsad}} \underbrace{\frac{\rho(h, 0)}{h}}_{\rightarrow 0} = A \quad \exists$$

$$3. f(a+h, b+k) = f(a, b) + \underbrace{Ah}_{\rightarrow 0} + \underbrace{Bk}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\sqrt{h^2 + k^2}}_{\rightarrow 0} \underbrace{\rho(h, k)}_{\rightarrow 0} \rightarrow f(a, b) \text{ då } (h, k) \rightarrow (0, 0) \Rightarrow f \text{ kontinuerlig}$$

4. Motexempel finns i boken s.51

5. Motexempel $f(x, y) = |x|$ i $(0, 0)$, kontinuerlig men $f'_x(x, y) \nexists$

3.2.3 Linjär avbildning

Den linjära avbildningen $df_{(a,b)}$ av typ $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, som definieras av $df_{(a,b)}(h, k) = Ah + Bk = f'_x(a, b)h + f'_y(a, b)k$, kallas differentialen av f i (a, b) ofta skrivs variablerna $h = dx$ & $k = dy$ så $df_{(a,b)}(dx, dy) = f'_x(a, b)dx + f'_y(a, b)dy$ eller kort $df = f'_x dx + f'_y dy$

Exempel (3.1) omskrivet

$$f(x, y) = x^2y + x \sin(y) \Rightarrow df = (2xy + \sin(y)) dx + (x^2 + x \cos(y)) dy$$

Feluppskattning med df

Om $\overline{\Delta x} = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) \in \mathbb{R}^n$ och f är differentierbar fås $f(\overline{x} + \overline{\Delta x}) - f(\overline{x}) = f'_{x_1} \Delta x_1 + \dots + f'_{x_n} \Delta x_n + \underbrace{\rho(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) \sqrt{(\Delta x_1)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2}}_{\text{Restterm}} \approx df(\overline{\Delta x})$

3.2.4 Exempel 5

Bestäm rörelseenergin och uppskatta felet för massan $m = 1.0 \pm 0.1 \text{ kg}$ med hastigheten $v = 4.0 \pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$.

Formel för rörelseenergi: $E = \frac{mv^2}{2} \text{ J}$

Utan fel: $E = \frac{1 * 1.4^2}{2} = 8.0 \text{ J}$

Fel:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E(m + \Delta m, v + \Delta v) - E(m, v) \approx dE(\Delta m, \Delta v) = \\ &= \frac{\partial E}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial E}{\partial v} \Delta v = \underbrace{\frac{v^2}{2}}_{\frac{4^2}{2}} \Delta m + \underbrace{mv}_{1*4} \Delta v = 8\Delta m + 4\Delta v \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \text{maxfel} \leq 8|\Delta m| + 4|\Delta v| = 8 * 0.1 + 4 * 0.2 = 1.6 \text{ J} \Rightarrow E = 8.0 \pm 1.6 \text{ J}$$

4 Föreläsning IV

4.1 Kedjeregeln

Envarre

Exempel

$$\frac{d}{dx} e^{x^2} = e^{x^2} 2x$$

Allmänt

$$f(g(x)) = \underbrace{f'(g(x))}_{\text{yttre}} \underbrace{g'(x)}_{\text{inre}}$$

Generalisering till flervarre

$$\underbrace{f(g(x))}_{\text{envarre}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \stackrel{(1)}{\Rightarrow} f(g(\bar{x})) \\ \stackrel{(2)}{\Rightarrow} f(\bar{g}(x)) \end{array} \right\} \stackrel{(3)}{\Rightarrow} f(\bar{g}(\bar{x})) \Rightarrow \bar{f}(\bar{g}(\bar{x}))$$

Förklaring av pilar

1. Exempel 1

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} e^{x^2 y} &= e^{x^2 y} * \underbrace{2xy}_{\text{inre m.a.p } x} \\ \frac{\partial}{\partial y} e^{x^2 y} &= e^{x^2 y} * \underbrace{x^2}_{\text{inre m.a.p } y} \end{aligned}$$

Allmänt

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} f(g(x, y)) = f'(g(x, y)) g'_x(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} f(g(x, y)) = f'(g(x, y)) g'_y(x, y) \end{array} \right.$$

Motsvarande för ≥ 3 variabler

Exempel 2

Visa att $xh'_x - 2yh'_y = 0 \quad \forall$ 2 variabel funktioner $h(x, y)$ på formen $h(x, y) = f(x^2 y)$ där f är en envariabelfunktion. Lösning:

$$xh'_x - 2yh'_y = x f'(x^2 y) 2xy - 2y f'(x^2 y) x^2 = 0 \quad \forall f$$

2.

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dx}(f(\bar{g}(x))) &= \frac{d}{dx}(f(g_1(x), g_2(x))) \stackrel{\text{def av } \frac{d}{dx}}{=} \\
&= \lim_{l \rightarrow 0} \frac{f(\overbrace{g_1(x+l)}^{s+h}, \overbrace{g_2(x+l)}^{t+k}) - f(\overbrace{g_1(x)}^s, \overbrace{g_2(x)}^t)}{l} \stackrel{\text{diff. bar}}{=} \\
&= \lim_{l \rightarrow 0} \frac{f'_s(s, t)h + f'_t(s, t)k + \sqrt{h^2 + k^2} \rho(h, k)}{l} = \\
&= \left/ \begin{array}{l} h = g_1(x+l) - g_1(x) \rightarrow 0 \text{ då } l \rightarrow 0 \text{ om } g_1 \text{ är kontinuerlig} \\ k = g_2(x+l) - g_2(x) \rightarrow 0 \text{ då } l \rightarrow 0 \text{ om } g_2 \text{ är kontinuerlig} \end{array} \right/ = \\
&= \lim_{l \rightarrow 0} \left(f'_s(s, t) \frac{\overbrace{g_1(x+l) - g_1(x)}^{\rightarrow g'_1(x)}}{l} + f'_t(s, t) \frac{\overbrace{g_2(x+l) - g_2(x)}^{\rightarrow g'_2(x)}}{l} \pm \sqrt{\underbrace{\left(\frac{h}{l}\right)^2 + \left(\frac{k}{l}\right)^2}_{\rightarrow (g'_1(x))^2 + (g'_2(x))^2 \text{ begränsad}}} \overbrace{\rho(h, k)}^{\rightarrow 0} \right) = \\
&= f'_s(s, t)g'_1(x) + f'_t(s, t)g'_2(x) \\
&\text{eller } \frac{df}{dx} = f'_s s'_x + f'_t t'_x
\end{aligned}$$

3. Fås av 1 & 2

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x} f(\overbrace{g_1(x, y)}^s, \overbrace{g_2(x, y)}^t) &= f'_s s'_x + f'_t t'_x \\
\frac{\partial}{\partial y} f(g_1(x, y), g_2(x, y)) &= f'_s s'_y + f'_t t'_y
\end{aligned}$$

Matrisform

$$\underbrace{\begin{pmatrix} f'_x & f'_y \end{pmatrix}}_{\text{derivator av } f(x, y)} = \underbrace{\begin{pmatrix} f'_s & f'_t \end{pmatrix}}_{\text{derivator av } f(s, t)} \begin{pmatrix} s'_x & s'_y \\ t'_x & t'_y \end{pmatrix}$$

Motsvarande för ≥ 3 variabler

4.1.1 Exempel 1

Lös den partiella differentialekvationen

$$f'_x - f'_y = y - x \quad (4.1)$$

med bivillkoret

$$f(x, 0) = x^2 \quad (4.2)$$

$$\text{Ledning: inför nya variabler } \begin{cases} s = x + y \\ t = xy \end{cases}$$

$$\text{Kedjeregeln } \begin{cases} f'_s s'_x + f'_t t'_x = f'_s * 1 + f'_t y \\ f'_s s'_y + f'_t t'_y = f'_s * 1 + f'_t x \end{cases} \text{ sätt in i (4.1)}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (f'_s + f'_t y) - (f'_s + f'_t x) &= y - x \Rightarrow f'_t * (y - x) = y - x, \text{ ska gälla alla } (x, y) \\ \Rightarrow f'_t = 1 \Rightarrow f_t &= t + \underbrace{g(s)}_{\text{godtycklig}} \Rightarrow \underline{f(x, y) = xy + g(x, y)} \text{ [alla lösningar på (4.1)]} \end{aligned}$$

Bivillkoret (4.2) ger oss $f(x, 0) = x * 0 + g(x) = x^2 \Rightarrow g(x + 0) = x^2 \Rightarrow$
 Lösningen blir $f(x, y) = xy + (x + y)^2$

4.1.2 Linjärt variabelbyte

$$\begin{cases} s = ax + by \\ t = cx + dy \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} X_{\underline{f}} & T^{-1} & X_{\underline{e}} \end{matrix}$$

Matris för kedjeregeln

$$\begin{pmatrix} s'_x & s'_y \\ t'_x & t'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = T^{-1} !$$

4.1.3 Byte till polära koordinater

$$\begin{cases} x = \rho \cos(\varphi) \\ t = \rho \sin(\varphi) \end{cases} \text{ Enklast med } \rho \text{ \& } \varphi \text{ derivator i vänsterled i kedjeregeln}$$

$$\begin{cases} f'_\rho = f'_x x'_\rho + f'_y y'_\rho = f'_x \cos(\varphi) + f'_y \sin(\varphi) \\ f'_\varphi = f'_x x'_\varphi + f'_y y'_\varphi = f'_x (-\rho \sin(\varphi)) + f'_y \rho \cos(\varphi) \end{cases}$$

Matrisform

$$\begin{pmatrix} f'_\rho & f'_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f'_x & f'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_\rho & x'_\varphi \\ y'_\rho & y'_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f'_x & f'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\rho \sin(\varphi) & \rho \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$

4.1.4 Exempel 2

Bestäm alla $f(x, y)$ som uppfyller

$$xf''_{xy} - yf''_{yy} - f'_y = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{Ledning: inför } \begin{cases} u = x \\ v = xy \end{cases}$$

Översätt ekvationen till u & v . Kedjeregeln

$$\begin{cases} f'_x = f'_u u'_x + f'_v v'_x = f'_u + yf'_v \\ f'_y = f'_u u'_y + f'_v v'_y = xf'_v \end{cases}$$

Operator skrivsätt

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial u} + y \frac{\partial}{\partial v} \\ \frac{\partial}{\partial y} = x \frac{\partial}{\partial v} \end{cases} \quad \begin{cases} ()'_x = ()'_u + ()'_v \\ ()'_y = x ()'_v \end{cases}$$

$$f''_{yy} = (f'_y)'_y = (xf'_v)'_y = x(f'_v)'_y = x * x(f'_v)'_v = x^2 f''_{vv}$$

$$f''_{xy} = (f'_x)'_y = (f'_u + yf'_v)'_y = (f'_u)'_y + f'_v + y(f'_v)'_y = xf''_{uv} + f'_v + yx f''_{vv}$$

Sätt in i (4.2) \Rightarrow

$$x(xf''_{uv} + f'_v + yx f''_{vv}) - y(x^2 f''_{vv}) - xf'_v = 0$$

$$x^2 f''_{uv} + xf'_v + yx^2 f''_{vv} - yx^2 f''_{vv} - xf'_v = 0$$

$$\Rightarrow x^2 f''_{uv} = 0, \quad \forall(x, y) \Rightarrow f''_{uv} = 0 \iff (f'_u)'_v$$

$$\Rightarrow f'_u = g(u), \text{ godtycklig funktion } g(u)$$

$$\Rightarrow f = G(u) + h(v), \text{ godtycklig funktion } h(v)$$

Svar: $f(x, y) = G(x) + h(xy)$, $g = G'$ & h godtyckliga funktioner

5 Föreläsning V

5.1 Gradienter

5.1.1 Definition

Gradienten av $f(x, y)$ är vektorn $\nabla f = \text{grad } f = (f'_x, f'_y)$

För $g(x, y, z)$ är $\nabla g = (g'_x, g'_y, g'_z)$ och motsvarande för ≥ 4 variabler

Hessianen av $f(x, y)$ resp $g(x, y, z)$ är matrisen

$$Hf = \begin{pmatrix} f''_{xx} & f''_{xy} \\ f''_{yx} & f''_{yy} \end{pmatrix}$$

$$\text{resp } Hg = \begin{pmatrix} g''_{xx} & g''_{xy} & g''_{xz} \\ g''_{yx} & g''_{yy} & g''_{yz} \\ g''_{zx} & g''_{zy} & g''_{zz} \end{pmatrix}$$

symmetriska om $f, g \in C^2$,

mer om H i samband med max/min-problem. [6.2 on page 22](#)

5.1.2 Hur tolkar man gradienter i 2D & 3D?

Kurvor i 2D

Tangenter och normaler (allmänt)

Tangentvektor $\vec{T} = (v_1, v_2)$

Normalvektor $\vec{N} = k(v_2, -v_1)$ ty ger

$$\vec{T} \bullet \vec{N} = v_1kv_2 - v_2kv_1 = 0 \Rightarrow \text{ortogonala}$$

Ekvivalent för tangentlinje i (x, y) är på tangenten \iff

$$\underbrace{(x-a, y-b)}_{\text{Parallell med } \vec{T}} \bullet \vec{N} = 0 \iff v_2x - v_1y = \underbrace{v_2a - v_1b}_{\text{Konstant}}$$

$$\text{Parameterform } \begin{cases} x = a + tv_2 \\ y = b + tv_1 \end{cases}, t \in \mathbb{R} \text{ parameter}$$

Ekvation för normallinjen: (x, y) är på normalen \iff

$$\underbrace{(x-a, y-b)}_{\text{Parallell med } \vec{N}} \times (v_1, v_2) = 0 \iff v_1x + v_2y = \underbrace{v_1a + v_2b}_{\text{Konstant}}$$

$$\text{Parameterform } \begin{cases} x = a + tv_1 \\ y = b - tv_2 \end{cases}, t \in \mathbb{R}$$

1. Kurvor på parameterform

Ex

$$\begin{cases} x = 1 - t \\ y = 2 + t \end{cases} \iff (x, y) = (1, 2) + t(-1, 1) \quad [\text{rät linje}]$$

Ex

$$\bar{r}(t) = (x(t), y(t)) = (\cos t, \sin t) \quad [\text{enhetscirkeln}]$$

Två punkter på kurvan $\bar{r}(t)$ & $\bar{r}(t + \Delta t)$

$$\begin{aligned} \text{Låt } \Delta t \rightarrow 0 \Rightarrow \bar{T}(t) = r'(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\bar{r}(t + \Delta t) - \bar{r}}{\Delta t} = (x'(t), y'(t)) \\ &= \text{ger tangentvektorn till kurvan, exempelvis har enhetscirkeln} \end{aligned}$$

$$\bar{T}(t) = (x'(t), y'(t)) = (-\sin t, \cos t)$$

2. Nivåkurvor $f(x, y) = C$ Om $f(x, y) = C$ parametreras med t som $(x(t), y(t))$ ger kedjeregeln

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{d}{dt} \overbrace{f(x(t), y(t))}^{\text{konstant} = C} = f'_x x'(t) + f'_y y'(t) = \underbrace{(f'_x, f'_y)}_{\nabla f} \bullet \underbrace{(x'(t), y'(t))}_{\bar{T}} \\ &\Rightarrow \nabla f \text{ är normalvektor till nivåkurvan} \end{aligned}$$

Ex

$$\text{Enhetscirkeln } [f(x, y) = x^2 + y^2 = 1] \text{ har } \nabla f = (2x, 2y) = 2(x, y)$$

3. Grafer

 $y = h(x)$ kan föras på

- parameterform: $t = x$ ger $(x, y) = (t, h(t))$
 $\Rightarrow \bar{T} = (x', y') = (1, h'(t))$
- nivåkurveform: sätt $f(x, y) = y - h(x) = 0$
 $\Rightarrow \bar{N} = \nabla f = (f'_x, f'_y) = (-h'(x), 1)$

5.2 Nivåtor i 3D

$$g(x, y, z) = C$$

Med kedjeregeln visas på liknande sätt som för nivåkurvor att

$$\nabla g = (g'_x, g'_y, g'_z) \text{ är } \bar{N} \text{ till nivåytan}$$

5.2.1 Exempel 1

Enhetssfären $g(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 = 1$ har $\bar{N} = \nabla g = (2x, 2y, 2z)$

I punkten $P : \left(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right)$ är $\bar{N} = \left(2 * \frac{2}{3}, 2 * \frac{1}{3}, 2 * \frac{2}{3}\right)$ och tangentplanet i P är

$$\left(x - \frac{2}{3}, y - \frac{1}{3}, z - \frac{2}{3}\right) \cdot \bar{N} = 0 \iff 2x + y + 2z = 3$$

En graf $z = f(x, y)$ kan skrivas som nivåytan $g(x, y, z) = f(x, y) - z = 0$
 $\Rightarrow \bar{N}$ är $\nabla g = (g'_x, g'_y, g'_z) = (f'_x, f'_y, -1)$

5.2.2 Exempel 2

$$z = f(x, y) = x^2 + y^2$$

$$f'_x = 2x$$

$$f'_y = 2y$$

har i punkten $(1, 2, 5)$

$$\bar{N} = (f'_x(1, 2), f'_y(1, 2), -1) = (2, 4, -1)$$

5.2.3 Definition

Riktningsderivatan av $f(x, y)$ i punkten (a, b) och riktning $\bar{v} = (v_1, v_2)$ där

$$|\bar{v}| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 1 \text{ är}$$

$$f'_{\bar{v}}(a, b) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a + tv_1, b + tv_2) - f(a, b)}{t}$$

Mäter hur f ändras i \bar{v} :s riktning

($|\bar{v}| > 1$ behövs för att $f'_{\bar{v}}$ inte ska bero på \bar{v} :s längd) Partiella derivator är
 specialfall t.ex. $\bar{v} = \bar{e}_1 = (1, 0)$ ger $f'_{\bar{v}} = f'_x$ Motsvarande gäller för ≥ 3 variabler

5.2.4 Sats

$$f \text{ differentierbar} \Rightarrow f'_v = \nabla f \bullet \bar{v}$$

5.2.5 Exempel 3

$$\bar{v} = (1, 0) \Rightarrow f'_v = (f'_x, f'_y) \bullet (1, 0) = f'_x$$

5.2.6 Exempel 4

$$f(x, y, z) = xy^2z^3 \Rightarrow \nabla f = (f'_x, f'_y, f'_z) = (y^2z^3, 2xyz^3, 3xy^2z^2)$$

I punkten $(a, b, c) = (2, -1, 1)$ och i riktningen $\bar{v} = \frac{1}{\sqrt{5}}(1, 0, 2)$ från punkten är

$$f'_v(2, -1, 1) = \nabla f(a, b, c) \bullet \bar{v} = (1, -4, 6) \bullet \frac{1}{\sqrt{5}}(1, 0, 2) = \frac{1 * 1 - 4 * 0 + 6 * 2}{\sqrt{5}} = \frac{13}{\sqrt{5}}$$

5.2.7 Allmänt

$$f'_v = \nabla f \bullet \bar{v} = |\nabla f| \underbrace{|\bar{v}|}_{=1} \cos \alpha$$

Maximal då $\alpha = 0$, dvs då \bar{v} väljs åt samma håll som $\nabla f \Rightarrow$

∇f pekar i den riktning f växer snabbast i

$f'_v = 0$ då \bar{v} är en tangent till nivåkurvan/ytan

6 Föreläsning VI

6.1 Lokala max och min

6.1.1 Definition

$f(x, y)$ har ett lokalt minimum i (a, b) om $f(x, y) \geq f(a, b) \forall (x, y)$ i någon omgivning U av (a, b) . Om $f(x, y) \leq f(a, b)$ i $U \forall (x, y) = (a, b)$ har vi ett strängt lokalt minimum. Motsvarande för lokalt maximum och ≥ 3 variabler.

6.1.2 Hur hittas lokala max & min?

Om $z = f(x, y)$ har lokalt min i (a, b) & L parallell med x -axeln ($y = b = \text{konstant på } L$) så har på L envaribelfunktionen $g(x) = f(x, b)$ ett lokalt min i $x = a \Rightarrow g'(a) = 0$ men $g'(a) = f'_x(a, b)$ (enligt def av derivator). Samma i y -led.

6.1.3 Sats

Om $f(x, y) \in C^1$ har ett lokalt max eller min i (a, b) så är

$$\begin{cases} f'_x(a, b) = 0 \\ f'_y(a, b) = 0 \end{cases}, \text{ dvs } \nabla f(a, b) = (0, 0)$$

Motsvarande för ≥ 3 variabler

En punkt \bar{a} där $\nabla f(\bar{a}) = \bar{0}$ kallas stationär. Den kan vara lok max, min eller sadelpunkt.

6.2 Avgör om max, min eller sadelpunkt (\bar{a} stationär)?

Envarre: teckentabell eller tecken på $f'(a)$

Flervarre: tecken på $Hf(\bar{a})$, motiveras från Taylors formel

Envariabel - maclaurin:

$$g(t) = g(0) + g'(0)t + t^2 \frac{g''(0)}{2} + \dots + t^{(p)} \frac{g^{(p)}(0)}{p!} + \underbrace{\mathcal{R}_p}_{rest} \left(\ast \right) \quad (6.1)$$

Givet $f(x, y)$, sätt $g(t) = f(a + th, b + tk)$, a, h, b, k konstanta
Kedjeregeln:

$$\begin{aligned} g'(t) &= f'_x \ast x'_t + f'_y \ast y'_t = f'_x \ast h + f'_y \ast k = \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right) f = (h, k) \nabla f \\ \Rightarrow g''(t) &= \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right)^2 f = h^2 \ast f''_{xx} + 2hk \ast f''_{xy} + k^2 \ast f''_{yy} = \\ &= (h, k) \underbrace{\begin{pmatrix} f''_{xx} & f''_{yx} \\ f''_{xy} & f''_{yy} \end{pmatrix}}_{Hf} \begin{pmatrix} h \\ k \end{pmatrix} \left[f''_{xy} = f''_{yx} \text{ om } f \in C^2 \right] \\ g^{(p)}(t) &= \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right)^{(p)} f \end{aligned} \quad (6.2)$$

$t = 0 \Rightarrow (x, y) = (a, b) \& g(0) = f(a, b)$

$t = 1 \Rightarrow (a + h, b + k) \& g(1) = f(a + h, b + k)$ in i 6.1 \Rightarrow Taylors formel för $f(x, y) \in C^{p+1}$

$$\begin{aligned} f(a + h, b + k) &= f(a, b) + (h, k) \ast \nabla f(a, b) + \frac{1}{2} (h, k) (Hf)(a, b) \begin{pmatrix} h \\ k \end{pmatrix} + \dots \\ &+ \frac{1}{p!} \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \right)^p \ast f(a, b) + \mathcal{R}_p, \text{ där man kan visa } \mathcal{R}_p = \mathcal{O} \left(\sqrt{h^2 + k^2}^{p+1} \right) \end{aligned}$$

För $p = 2$ och n variabler, $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n)$, $\bar{h} = (h_1, \dots, h_n)$ ($\Rightarrow h^{-1}$ kolonn)

$$\text{fås } f(\bar{a} + \bar{h}) = f(\bar{a}) + \bar{h} \ast \nabla f(\bar{a}) + \underbrace{\frac{1}{2} \bar{h} (Hf)(\bar{a}) \bar{h}^{-1}}_{Q(h)} + \mathcal{O}(|h^3|)$$

$Q(\bar{h})$ är en kvadratisk form (lin.alg). I 2 variabler, se (6.2), i 3 variabler:

$$Q(h, k, l) = h^2 f''_{xx} + k^2 f''_{yy} + l^2 f''_{zz} + 2hk f''_{xy} + 2hl f''_{xz} + 2kl f''_{yz}$$

I stationär punkt $\bar{a} \left(\nabla f(\bar{a}) = \bar{0} \right)$

$$f(\bar{a} + \bar{h}) = f(\bar{a}) + \frac{1}{2}Q(\bar{h}) + \mathcal{O}(|h^3|) \approx f(\bar{a}) + \frac{1}{2}Q(\bar{h}) \text{ om } |\bar{h}| \text{ liten}$$

$\Rightarrow Q(\bar{h})$ avgör f 's utseende nära stationär punkt.

Om t.ex. $Q(\bar{h}) = 0 \forall \bar{h} \neq 0$ är $f(\bar{a} + \bar{h}) = f(\bar{a}) \Rightarrow$ strängt lokalt min i \bar{a}

6.2.1 Fyra fall fås

1. Q positivt definit \Rightarrow strängt lokalt min

$$Q(\bar{h}) > 0 \quad \forall \bar{h} \neq 0$$

2. Q negativt definit \Rightarrow strängt lokalt max

$$Q(\bar{h}) < 0 \quad \forall \bar{h} \neq 0$$

3. Q indefinit \Rightarrow sadelpunkt

$$Q(\bar{h}) > 0, \text{ för vissa } \bar{h} \text{ \& } < 0 \text{ för andra}$$

4. Q positivt semidefinit (motsv. neg semidefinit) Ingen slutsats om max, min eller sadelpunkt kan dras

$$Q(\bar{h}) \geq 0 \quad \forall \bar{h} \text{ men } \exists \bar{h} \neq 0 \text{ med } Q(\bar{h}) = 0$$

6.2.2 Två metoder för att avgöra Q:s karaktär:

1. Digonalisering. Spektralsatsen $\Rightarrow Hf = TDT^{-1}$, $T^{-1} = T^T$

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}, \lambda_j \text{ egenvärden till } Hf$$

$$Q = \bar{h} * (Hf) * \bar{h}^{-1} = \underbrace{\bar{h}T}_{\hat{\bar{h}}} D \underbrace{T^T h^{-1}}_{\hat{\bar{h}}^T} = \hat{\bar{h}} D \hat{\bar{h}}^T = \lambda_1 \hat{h}_1^2 + \lambda_2 \hat{h}_2^2 + \dots + \lambda_n \hat{h}_n^2$$

De fyra fallen

(a)

$$\lambda_j > 0, \quad \forall j \text{ pos.def}$$

(b)

$$\lambda_j < 0, \quad \forall j \text{ neg.def}$$

(c)

$$\exists \lambda_j > 0 \ \& \ \exists \lambda_k < 0 \text{ indef}$$

(d)

$$\lambda_j \geq 0, \quad \forall j \quad \exists \lambda_k = 0 \text{ pos.semidef}$$

Exempel

$$Q(h, k, l) = h^2 + 2k^2 + 2l^2 + 2hk - 2hl + 2kl = \begin{pmatrix} h & k & l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 2 & 1 \\ -1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

$$\det(Hf - \lambda I) = 0 \Rightarrow \dots \Rightarrow \lambda_1 = 3, \lambda_{2,3} = 1 \pm \sqrt{2}$$

$$\Rightarrow Q = \begin{pmatrix} \hat{h} & \hat{k} & \hat{l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & & \\ & 1 + \sqrt{2} & \\ & & 1 - \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{h} \\ \hat{k} \\ \hat{l} \end{pmatrix} = 3\hat{h}^2 + (1 + \sqrt{2})\hat{k}^2 + (1 - \sqrt{2})\hat{l}^2$$

$\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$, $\lambda_3 < 0 \Rightarrow$ indefinit (egenvektorer behövs ej för att avgöra karaktär)

2. Kvadratkomplettering

$$(a + b + c)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2ac + 2bc$$

(6.3):

$$\begin{aligned} Q &= \overbrace{h^2 + 2hk - 2hl}^{\text{in i en parentes}} + 2k^2 + 2l^2 + 2kl = \\ &= (h + k - l)^2 + \underbrace{k^2 + 4kl}_{\text{in i en parentes}} + l^2 = \\ &= \pm(h + k - l)^2 \pm (k + 2l)^2 \pm 3l^2 \end{aligned}$$

tecken +, +, -, samma som på λ_1 , λ_2 , $\lambda_3 \Rightarrow$ indefinit

De fyra fallen

- (a) Bara + \Rightarrow pos.def
- (b) Bara - \Rightarrow neg.def
- (c) + & - (&/eller 0) \Rightarrow indef
- (d) + & 0 (färre + än antalet variabler) \Rightarrow pos.semidef

6.2.3 Exempel

Hitta alla stationära punkter till $f(x, y) = x^3 + 6xy + 3y^2 - 9x$ och avgör om de är max, min eller sadelpunkter.

$$\text{Stationära punkter: } \begin{cases} f'_x = 3x^2 + 6y - 9 = 0 & [1] \\ f'_y = 6x + 6y = 0 & [2] \end{cases}$$

$$[2] \Rightarrow y = -x \text{ in i } [1] \Rightarrow 3x^2 - 6x - 9 = 0 \Rightarrow \underbrace{x = 3}_{y = -3} \text{ eller } \underbrace{x = 1}_{y = 1}$$

Två stationära punkter: $(3, -3)$ & $(-1, 1)$ max/min?

$$f''_{xx} = 6x \quad f''_{xy} = 6 \quad f''_{yy} = 6$$

$$I(3, -3) : Q = \begin{pmatrix} h & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 18 & 6 \\ 6 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ k \end{pmatrix} \Rightarrow \dots \Rightarrow \lambda_{1,2} = 12 \pm \sqrt{62} > 0 \Rightarrow \text{pos.def} \Rightarrow \text{lok.min}$$

$$I(-1, 1) : Q = \begin{pmatrix} h & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -6 & 6 \\ 6 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ k \end{pmatrix} \Rightarrow \lambda_1 = 6\sqrt{2} > 0 \text{ \& } \lambda_2 = -6\sqrt{2} < 0 \Rightarrow \text{indef} \Rightarrow \text{sadelpunkt}$$

Svar: $(3, -3)$ är lokalt minimum & $(-1, 1)$ är en sadelpunkt

7 Föreläsning VII

7.1 Kurvor & ytor i \mathbb{R}^3 på parameterform

Funktioner av typen $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ kallas kurvor i \mathbb{R}^m . För $m = 3$ är

$\bar{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$ en kurva i rummet, variabeln t kallas parametern

Tangentvektorn är $\bar{r}'(t) = (x'(t), y'(t), z'(t))$ (som i 2D). Funktioner av typen $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ beskriver ytor i rummet på parameterform

$\bar{r}(s, t) = (x(s, t), y(s, t), z(s, t))$, s, t parametrar

7.1.1 Exempel 1 [Plan på parameterform]

$$\bar{r}(s, t) = (1 + s + t, 2 - s, 3t) = \underbrace{(1, 2, 0)}_{\text{en punkt i planet}} + \overbrace{s(1, -1, 0) + t(1, 0, 3)}^{\text{vektorer parallella med planet}} \quad (7.1)$$

$\frac{\partial \bar{r}}{\partial s}$ och $\frac{\partial \bar{r}}{\partial t}$ är tangentvektorer till ytan, och spänner upp tangentplanet vars normal $\bar{N} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial s} * \frac{\partial \bar{r}}{\partial t}$. För planet i (7.1) är $\frac{\partial \bar{r}}{\partial s} = (1, -1, 0)$ & $\frac{\partial \bar{r}}{\partial t} = (1, 0, 3)$

7.1.2 Exempel 2

Enhetssfären $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ kan skrivas med rympolära vinklar θ & φ som parametrar

$$\bar{r}(\theta, \varphi) = (x(\theta, \varphi), y(\theta, \varphi), z(\theta, \varphi)) = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$$

Vi får

$$\begin{aligned} \bar{N} = \bar{r}'_{\theta} \times \bar{r}'_{\varphi} &= \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi \\ -\sin \theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -\sin \theta \sin \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} -\sin^2 \theta \cos \varphi \\ -\sin^2 \theta \sin \varphi \\ -\cos \theta \sin \theta \end{pmatrix} = -\sin \theta \bar{r}(\theta, \varphi) \end{aligned}$$

7.2 Funktionen $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$

För $\bar{f}(\bar{x}) = (f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$ av typ $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ definieras funktionalmatrisen (Jacobi-matrisen)

$$\bar{f}'(\bar{x}) = \frac{\partial(f_1, \dots, f_m)}{\partial(x_1, \dots, x_n)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}, \text{ m} \times \text{n matris}$$

7.2.1 Exempel 3

$$\bar{f}(\bar{x}) = (f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)) = (x_1 + x_2, x_1 x_2) \Rightarrow \frac{\partial(f_1, f_2)}{\partial(x_1, x_2)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ x_2 & x_1 \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

7.2.2 Exempel 4

Variabelbyte $(x, y) = (\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)$ till polärakoordinater har matris

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(\rho, \varphi)} = \begin{pmatrix} x'_\rho & x'_\varphi \\ y'_\rho & y'_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\rho \sin \varphi \\ \sin \varphi & \rho \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

7.2.3 Exempel 5

En linjär avbildning $\bar{f}(\bar{x}) = \overbrace{\text{konstant m} \times \text{n matris}}^A \underbrace{\bar{x}}_{\text{kolon}}$ har $\bar{f}'(\bar{x}) = A$

OBS! För $m = 1$ ($\bar{f} = f$) fås specialfallet $\bar{f}'(\bar{x}) = (f'_{x_1}, \dots, f'_{x_n}) = \nabla f$

Tidigare kedjeregeln för varje $f_j(\bar{g}(\bar{x}))$ i $\bar{f}(\bar{g}(\bar{x})) = (\bar{f} \bullet \bar{g})(\bar{x}) \Rightarrow$
den mest allmänna kedjeregeln kan skrivas

$$\underbrace{(\bar{f} \bullet \bar{g})'(\bar{x})}_{m \times n} = \underbrace{\bar{f}'(\bar{g}(\bar{x}))}_{m \times p} \underbrace{\bar{g}'(\bar{x})}_{p \times n} \text{ Matris multiplikation}$$

$$\bar{x} \in \mathbb{R}^n \quad \bar{g}(\bar{x}) \in \mathbb{R}^p \quad \bar{f}(\bar{g}(\bar{x})) \in \mathbb{R}^m$$

För $m = n$ har $\bar{f}(\bar{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ funktionaldeterminant (Jacobi-determinant)

$$\det(\bar{f}'(\bar{x})) = \frac{d(f_1, \dots, f_n)}{d(x_1, \dots, x_n)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{vmatrix}$$

I (7.2) är $\frac{d(f_1, f_2)}{d(x_1, x_2)} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ x_2 & x_1 \end{vmatrix} = x_1 - x_2$ och i (7.3)

$$\frac{d(x, y)}{d(\rho, \varphi)} = \rho \cos^2 \varphi + \rho \sin^2 \varphi = \rho$$

7.3 Linjärisering av $\bar{f}(\bar{x})$

Antag $m = n = 2$ och skriv $\bar{f}(x, y) = \begin{pmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{pmatrix}$ som kolonn

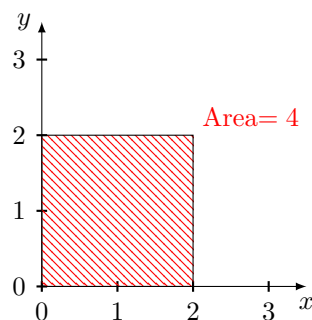
Taylor's formel för u & v kring punkten (a, b) ger

$$\begin{aligned} \left/ \begin{array}{l} a+h=x, h=x-a \\ b+k=y, k=y-b \end{array} \right/ \bar{f}(x, y) &= \begin{pmatrix} u(a, b) + u'_x(a, b)(x-a) + u'_y(a, b)(y-b) + rest \\ v(a, b) + v'_x(a, b)(x-a) + v'_y(a, b)(y-b) + rest \end{pmatrix} \approx \\ &\approx \begin{pmatrix} u(a, b) \\ v(a, b) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u'_x(a, b) & u'_y(a, b) \\ v'_x(a, b) & v'_y(a, b) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x-a \\ y-b \end{pmatrix} = \bar{f}(a, b) + f'(a, b) \begin{pmatrix} x-a \\ y-b \end{pmatrix} = \\ &= \underbrace{\overbrace{f'(a, b)}^A \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}}^{\bar{x}}}_{\text{linjär avbildning}} + \underbrace{\bar{f}(a, b) - f'(a, b) \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}}_{=\bar{C} \text{ konstant vektor}} = A\bar{x} + \bar{C} \end{aligned}$$

linjärisering av \bar{f} , gäller nära (a, b) . Motsvarande gäller godtyckliga m, n

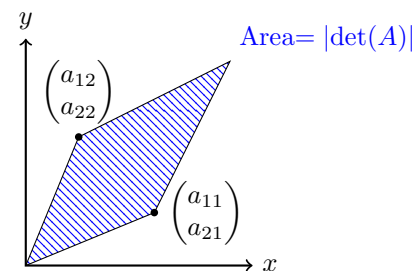
7.4 Area/volym-skalning

2D:



Figur 6: Areal innan skalning

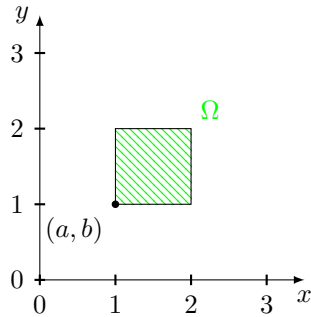
Linjär avbildning $\bar{f}(\bar{x}) = A\bar{x}$



Figur 7: Areal efter skalning

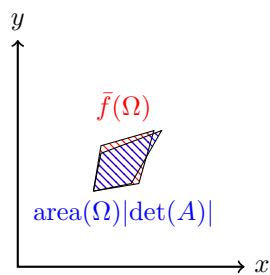
3D: $|\det(A)| = \text{volym av parallelepiped med } A\text{'s kolonner som kanter}$
 $|\det(A)|$ ger area/volym-skalning i 2D/3D

Godtycklig funktion \bar{f}



Figur 8: Areal innan skalning

Linjär avbildning, \bar{f} $\begin{matrix} [röd] \\ [blå] \end{matrix}$
 $A\bar{x} + \bar{C}$



Figur 9: Areal efter skalning ($+\bar{C}$ påverkar ej arean)

Ω liten $\Rightarrow \bar{f} \approx A\bar{x} + \bar{C}$ i $\Omega \Rightarrow$ area av $\bar{f}(\Omega) \approx$ arean av $(A\bar{x} + \bar{C})(\Omega)$
 Vi hade $A = \bar{f}'(a, b)$ funktionaldeterminanten i (a, b) $|\det(\bar{f}'(\bar{a}))|$ ger lokal
 area/volym-skalning i 2D/3D nära \bar{a}

7.4.1 Exempel

Variabelbyte till polärakoordinater har $\frac{d(x,y)}{d(\rho,\varphi)} = \rho \geq 0$ (se 7.2.3 on page 27)

Variabelbyte till rymdpolära koordinater i 3D ger

$$\frac{d(x,y,z)}{d(r,\theta,\varphi)} = \begin{vmatrix} x'_r & x'_\theta & x'_\varphi \\ y'_r & y'_\theta & y'_\varphi \\ z'_r & z'_\theta & z'_\varphi \end{vmatrix} = \dots = r^2 \sin \theta \geq 0 \text{ (ty } 0 \leq \theta \leq \pi)$$

7.4.2 Invers

LinAlg Om $\bar{u} = \bar{f}(\bar{x}) = A\bar{x}$ linjär av typ $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ (A en $n \times n$ matris, \bar{u}, \bar{x} kolonner) och $\det(\bar{f}') = \det(A) \neq 0 \Rightarrow \exists$ invers $\bar{x} = A^{-1}\bar{u} = \bar{f}^{-1}(\bar{u})$ med

$$\det(\bar{f}'^{-1}) = \det(A^{-1}) = \frac{1}{\det(A)} = \frac{1}{\det(\bar{f}')}$$

För allmänna olinjära $\bar{f}(\bar{x})$ kan man bevisa inversa funktionssatsen

Bevis. $f \in C^1$ av typ $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ och $\det(f'(\bar{a})) \neq 0 \Rightarrow \exists$ omgivningar Ω_1, Ω_2 av \bar{a} respektive $\bar{f}(\bar{a})$ så att $\bar{f}: \Omega_1 \rightarrow \Omega_2$ är bijektiv och därmed inverterbar med invers \bar{f}^{-1} . Även $\bar{f}^{-1} \in C^1$ och $\det((\bar{f}^{-1})') = \frac{1}{\det(\bar{f}')}$ \square

OBS!

1. Säger inget om hur \bar{f}^{-1} hittas bara att en finns
2. Gäller bara små Ω_1, Ω_2 i allmänhet
3. Invers kan finnas kring \bar{a} även om $\det(\bar{f}'(\bar{a})) = 0$ men är då ej C^1 (från envarren)

7.4.3 Exempel

$$\bar{f}(x,y) = \begin{pmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xy \\ e^x + 2y \end{pmatrix} \in C^1 \text{ ej globalt inverterbar}$$

$$\exists \bar{a} \neq \bar{b} \text{ med } \bar{f}(\bar{a}) = \bar{f}(\bar{b})$$

$$\text{Kring t.ex. } (a,b) = (1,0) \text{ blir } \det(\bar{f}^{-1}(1,0)) = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ e & 2 \end{vmatrix} = -e \neq 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \exists \text{ invers } \bar{f}^{-1}(u,v) = \begin{pmatrix} x(u,v) \\ y(u,v) \end{pmatrix} \text{ lokalt kring } \bar{f}(1,0)$$

men vi kan inte uttryckligen hitta $\begin{cases} x = \dots \\ y = \dots \end{cases}$

8 Föreläsning VIII

8.1 Implicita funktioner

Givet ett uttryck $F(x, y) = C$ (en ekvation eller en nivåyta), under vilka krav kan y lösas ut som en funktion av x ?

Betyder att till varje x måste det svara precis ett y

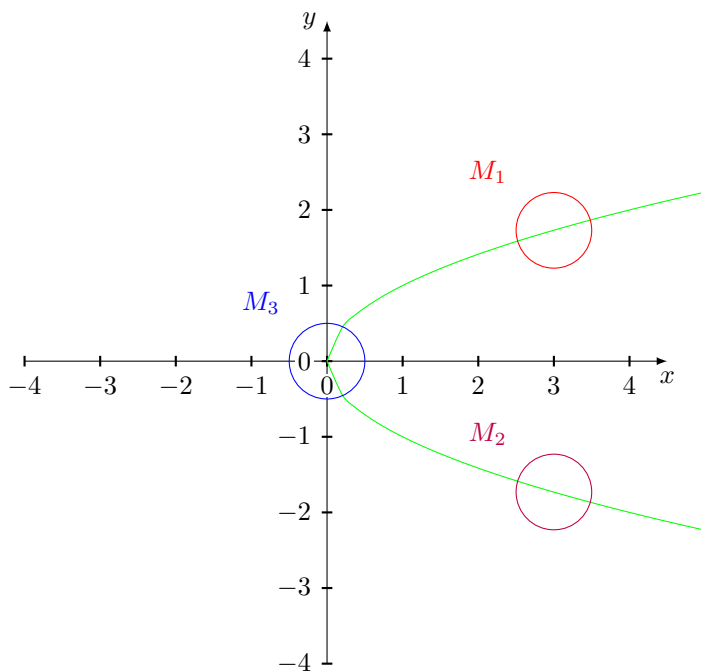
8.1.1 Exempel 1

$$F(x, y) = 3x - y = 1 \Rightarrow y = 3x - 1 = g(x), \text{ går bra } \forall x \in \mathbb{R} \quad (8.1)$$

8.1.2 Exempel 2

$$F(x, y) = 3x - y = 0 \Rightarrow y^2 = x \Rightarrow y = \pm\sqrt{x}, x \geq 0 \quad (8.2)$$

två värden på y för varje x , inte en funktion



Figur 10: Grafisk visning av (8.2)

På t.ex M_1 är $y = \sqrt{x} = g(x)$ medan på t.ex M_2 är $y = -\sqrt{x}$

Går ej på M_3 , problem indikeras av att $\nabla F = (F'_x, F'_y) = (1, -2y)$ är parallell med x -axeln i $(0, 0) \in M_3$ (kurvan vänder i x -led där)

Alltså: $F'_y = 0$ ger problem

8.1.3 Exempel 3

$$\begin{aligned} F(x, y) &= x - y^3 = 0 \\ \nabla F &= (1, -3y^2) \end{aligned} \tag{8.3}$$

Här kan vi lösa ut

$$y = \sqrt[3]{x} = x^{\frac{1}{3}} = g(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

trots att

$$F'_y = -3y^2 = 0$$

i origo (men kurvan vänder ej). Dock är

$$g'(x) = \frac{1}{3x^{\frac{2}{3}}}$$

ej definierad i origo så $g(x)$ är ingen C^1 -funktion av x kring $x = 0$
Man kan visa

8.2 Implicita funktionssatsen

y kan lösas ut som $y = g(x)$ med $g \in C^1$ ur $F(x, y) = C$, där $F \in C^1$, lokalt kring (a, b) på kurvan om $F'_g(a, b) \neq 0$

Kommentarer

- Med lokalt menas på någon (eventuellt liten) mängd kring (a, b) på nivåkurvan. I (8.2) & (8.3) ger $(a, b) = (0, 0)$ problem, ingen g finns i (8.2) & $g \notin C^1$ i (8.3) men $F \in C^1$.
- Motsvarande gäller att x kan lösas ut som $x = h(y)$ om $F'_x(a, b) \neq 0$
- Med implicit menas att satsen bara säger att funktionen g finns, inte hur g beräknas
 $\left(\begin{array}{l} \text{men i (8.1): } g(x) = 3x - 1, \text{ i (8.2) } g(x) = \sqrt{x} \text{ på } M_1, g(x) = -\sqrt{x} \\ \text{på } M_2 \text{ och i (8.3) } g(x) = \sqrt[3]{x}, \text{ alla explicit skrivna} \end{array} \right)$

8.2.1 Exempel 4

$$F(x, y) = x^3 y^2 + y^5 \sin x + y + 2x = 2, F \in C^\infty \quad (8.4)$$

$F(1, 0) = 2 \Rightarrow (a, b) = (1, 0)$ på nivåkurvan

Vi klarar inte att lösa ut y explicit, $y = g(x) = ???$ liksom va fan femtegradare!!

$$F'_y = 2x^3 + 5y^4 \sin x + 1 \Rightarrow F'_y(1, 0) = 1 \neq 0$$

från sats: y kan lösas ut implicit som $y = g(x)$ där $g \in C^1$ lokalt kring $(1, 0)$

Trots att $g(x)$ är okänd kan vi få ut $g'(x)$ på två olika sätt

Alternativ 1 (kedjeregeln)

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{d}{dx} \underbrace{F\left(x, \overbrace{g(x)}^y\right)}_{=2} = \frac{\partial F}{\partial x} \underbrace{\frac{dx}{dx}}_{=1} + \frac{\partial F}{\partial y} \underbrace{\frac{dy}{dx}}_{g'(x)} = F'_x + F'_y g'(x) \Rightarrow \\ \Rightarrow g'(x) &= -\frac{F'_x}{F'_y} = -\frac{3x^2 y^2 + y^5 \cos x + 2}{2x^3 + 5y^4 \sin x + 1} \Rightarrow g'(x) = -\frac{2}{1} = -2 \\ \nabla F &= (F'_x, F'_y) = (2, 1) \end{aligned} \quad (8.5)$$

Alternativ 2 (implicit deriving)

$y = g(x) \Rightarrow x^3 g(x)^2 + g(x)^5 \sin x + g(x) + 2x = 2 = \text{konstant } \forall x$ på intervall kring $x = 1$

Derivera $g(x) \Rightarrow$

$$3x^2 g(x)^2 + 2x^3 g(x) g'(x) + 5g(x)^4 g'(x) \sin x + g(x)^5 \cos x + g'(x) + 2 = 0 \quad (8.6)$$

Lös ut $g'(x)$, ger samma som i (8.5) Även $g''(x)$ kan beräknas genom implicit derivering av (8.6)

8.3 3 variabler, 1 funktion

Ur $F(x, y, z) = C$ ($F \in C^1$, nivåyta geometriskt) kan t.ex. z lösas ut som en C^1 -funktion av x & y , $z = g(x, y)$, lokalt kring (a, b, c) på ytan om $F'_z(a, b, c) \neq 0$ (∇F ej parallell med xy -planet)

Implicit deriving/kedjeregeln

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \underbrace{F(x, y, \overbrace{g(x, y)}^z)}_{=C} = F'_x * 1 + F'_y * 0 + F'_z g'_x \Rightarrow g'_x = -\frac{F'_x}{F'_z} \text{ pss } g'_y = -\frac{F'_y}{F'_z}$$

Motsvarande om x eller y ska lösas ut

8.3.1 Exempel 5

$$F(x, y, z) = x^2 z \cos y + e^{z+3y-x} = 2, \text{ nivåyta } F \in C^1 \quad (8.7)$$

$$F(1, 0, 1) = 1^2 * 1 \cos 0 + e^{1+0-1} = 2 \Rightarrow (1, 0, 1) \text{ på ytan}$$

$$F'_y = -x^2 z \sin y + 3e^{z+3y-x} \Rightarrow F'_y(1, 0, 1) = 3 \neq 0$$

$\Rightarrow y$ kan lösas ut som $y = g(x, z)$ ur $F(x, y, z) = 2$ kring $(1, 0, 1)$ på ytan
 $g \in C^1$ med $g(1, 1) = 0$

$$g'_x = -\frac{F'_x}{F'_y} = -\frac{2xz \cos y - e^{z+3y-x}}{-x^2 z \sin y + 3e^{z+3y-x}} \Big|_{(1,0,1)} = -\frac{2-1}{3} = -\frac{1}{3}$$

$$g'_z = -\frac{F'_z}{F'_y} = -\frac{x^2 \cos y + e^{z+3y-x}}{-x^2 z \sin y + 3e^{z+3y-x}} \Big|_{(1,0,1)} = -\frac{2}{3}$$

8.4 3 variabler, 2 funktioner

$$\text{Ekvationssystem} \begin{cases} F(x, y, z) = C_1 \\ G(x, y, z) = C_2 \end{cases}$$

är geometriskt skärningen mellan två nivåytor, dvs en kurva γ .

γ kan lokalt kring en punkt $P \in \gamma$ parametreras med t.ex.

$$x : \bar{r}(t) = \bar{r}(x) = (x, h(x), j(x)) \text{ om tangenten}$$

$\bar{T} = \nabla F \times \nabla G$ har x -komponent

$$\begin{bmatrix} F'_y & F'_z \\ G'_y & G'_z \end{bmatrix} \neq 0$$

Algebraiskt tolkat kan då $y = h(x)$ & $z = j(x)$ lösas ut ur systemet som en funktion av x (lokalt kring P)

8.4.1 Exempel 6

$$\begin{cases} F(x, y, z) = x^4 + yz = 1 & F(-1, 0, 2) = 1 \\ G(x, y, z) = x^2 e^y z = 2 & G(-1, 0, 2) = 2 \end{cases} \Rightarrow \quad (8.8)$$

$$\Rightarrow P = (-1, 0, 2) \text{ på skärningskurvan } \gamma$$

$$\nabla F = (4x^3, z, y) \stackrel{P}{=} (-4, 2, 0) \quad \& \quad \nabla G = (2xe^y z, x^2 e^y z, x^2 e^y) \stackrel{P}{=} (-4, 2, 1)$$

$\Rightarrow \bar{T} = \nabla F \times \nabla G = (2, 4, 0)$ är tangent till γ i P

x -komponent av \bar{T} är $2 \neq 0 \Rightarrow$ kring P (som har $x = -1$) kan både y & z lösas ut som C^1 funktioner $y = h(x)$ & $z = j(x)$ på γ .

Om γ skrivs $\bar{r}(x) = (x, h(x), j(x))$ är $\bar{r}'(x) = (1, h'(x), j'(x))$ vilket ger att

$$\bar{r}'(-1) = (1, h'(-1), j'(-1)) \text{ är en tangentvektor till } \gamma \text{ i } P \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{parallell med } (2, 4, 0) = 2(1, 2, 0) \Rightarrow h'(-1) = 2 \quad \& \quad j'(-1) = 0$$

OBS! z -komponent av $\bar{r} = 0 \Rightarrow z$ ingen bra parameter för γ kring P

9 Föreläsning IX

9.1 Dubbelintegraler

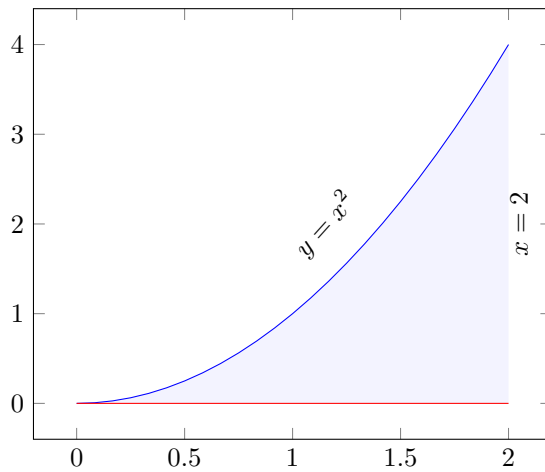
Skivformeln för volymen

Volymen av en tunn skiva ges av $dV = A(x) dx$, den hela volymen ges av

$$V = \int_a^b dV$$

9.1.1 Exempel

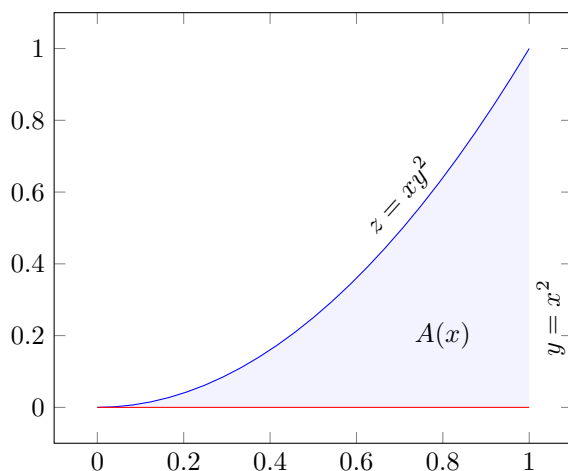
Låt D vara mängden $\begin{cases} 0 \leq x \leq 2 \\ 0 \leq y \leq x^2 \end{cases}$ D kan också skrivas $\begin{cases} 0 \leq y \leq 4 \\ \sqrt{y} \leq x \leq 2 \end{cases}$



Figur 11: $D = \{(x, y) \mid 0 \leq x \leq 2, 0 \leq y \leq x^2\}$

Låt $f(x, y) = xy^2$

Vad blir volymen mellan ytan $z = xy^2$ och xy -planet ovanför D?



Figur 12: 2D representation av en skiva

$$A(x) = \int_0^{x^2} xy^2 \, dy = x \int_0^{x^2} y^2 \, dy = x \left[\frac{y^3}{3} \right]_0^{x^2} = x \frac{x^6}{3} = \frac{x^7}{3}$$

$$\text{Volymen } V = \int_0^2 A(x) \, dx = \int_0^2 \frac{x^7}{3} \, dx = \left[\frac{x^8}{24} \right]_0^2 = \frac{256}{24} = \frac{32}{3}$$

Vi skriver dubbelintegralen av xy över D

$$V = \int_0^2 \left(\int_0^{x^2} xy^2 \, dy \right) dx = \iint_D xy^2 \, dx \, dy = \int_0^4 \left(\int_{\sqrt{y}}^2 xy^2 \, dx \right) dy$$

9.1.2 Skiva i y -led

$$A(y) = \int_{\sqrt{y}}^2 xy^2 \, dx = y^2 \int_{\sqrt{y}}^2 x \, dx = y^2 \left[\frac{x^2}{2} \right]_{\sqrt{y}}^2 = y^2 \left(2 - \frac{y}{2} \right) = 2y^2 - \frac{y^3}{2}$$

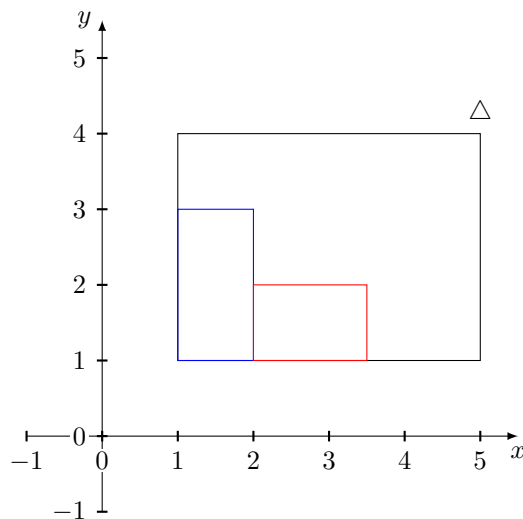
$$V = \int_0^4 A(y) \, dy = \int_0^4 \left(2 - \frac{y}{2} \right) dy = \left[\frac{2y^3}{3} - \frac{y^4}{8} \right]_0^4 = \frac{128}{3} - \frac{256}{8} = \frac{32}{3}$$

Samma svar såklart!

9.2 Översikt, definition av dubbelintegraler

Att integrera en variabel i taget kallas upprepade enkelintegraler

9.2.1 Steg 1



Figur 13: Visar på en yta med mindre ytor i

Δ = axelparallell rektangel

Dela in Δ i små rektanglar $\Delta_1, \dots, \Delta_n$

En trappfunktion ϕ på $\Delta_1, \dots, \Delta_n$ är konstant på varje Δ_j : $\phi(x, y) = C_j$ på Δ_j . Då kan dubbelintegralen av ϕ över Δ definieras som volymen (med tecken)

$$\iint_{\Delta} \phi(x, y) \, dx \, dy = I(\phi) = C_1 A(\Delta_1) + \dots + C_n A(\Delta_n)$$

9.2.2 Steg 2

Om $\phi_1 \leq f \leq \phi_2$ på Δ , ϕ_1, ϕ_2 trappfunktioner, så kallas $I(\phi_1)$ en undersumma till f på Δ och $I(\phi_2)$ en översumma. f kallas integrerbar över Δ om $\forall \epsilon > 0 \exists$ sådana ϕ_1, ϕ_2 med $I(\phi_2) - I(\phi_1) < \epsilon$. Man kan bevisa att då finns ett unikt tal k så att $I(\phi_1) \leq k \leq I(\phi_2) \forall$ sådana ϕ_1, ϕ_2

k kallas dubbelintegralen av f över Δ , skrivs

$$k = \iint_{\Delta} f(x, y) \, dx \, dy$$

Kort sammanfattning:

Man visar att f kontinuerlig på $\Delta \Rightarrow f$ integrerbar över Δ

9.2.3 Steg 3

D är en godtycklig mängd, $D \subset \Delta$

Sätt $f_D = \begin{cases} f & \text{på } D \\ 0 & \text{utanför } D \end{cases}$, normalt sett ej kontinuerlig på randen av D

f är integrerbar över D om f_D är integrerbar över Δ och då definieras

$$\iint_D f(x, y) \, dx \, dy = \underbrace{\iint_{\Delta} f_D(x, y) \, dx \, dy}_{\text{definierat i 9.2.2}}$$

Man visar att $\iint_D f(x, y) \, dx \, dy \exists$ om D begränsad, f beror på D

($|f(x, y)| \leq M$ på D) och f kontinuerlig utom möjligen på en nollmängd; en mängd N som $\forall \epsilon > 0$ kan täckas över med rektanglar med total area $< \epsilon$. T.ex. kan N vara en vanlig kurva (som D 's rand).

Vanliga räknelagar gäller, t.ex.

$$\iint_D (f(x, y) + g(x, y)) \, dx \, dy = \iint_D f(x, y) \, dx \, dy + \iint_D g(x, y) \, dx \, dy$$

9.2.4 Exempel

Beräkna $I = \iint_D x \sin xy \, dx \, dy$ då $D : \begin{cases} 0 \leq x \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 \leq y \leq 1 \end{cases}$

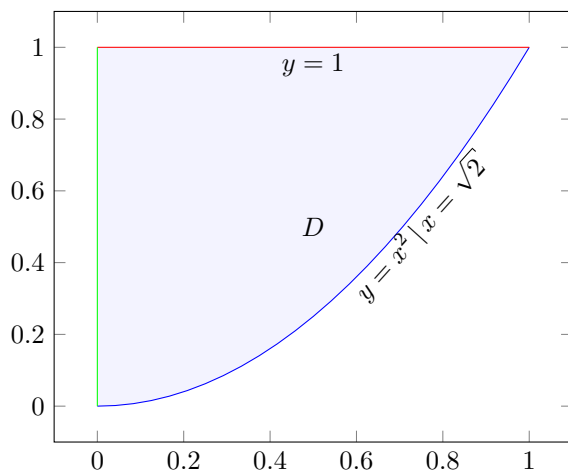
Enklast att börja med att integrera över y

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\int_{y=0}^{y=1} x \sin xy \, dy \right) dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[-\cos xy \right]_{y=0}^{y=1} dx = \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} (-\cos x + 1) dx = \left[-\sin x + x \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = -1 + \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

9.2.5 Exempel

Beräkna $I = \int_0^1 \left(\int_{x^2}^1 x e^{y^2} \, dy \right) dx$

$\int e^{y^2} dy = ???$ Enklare att börja med x



Figur 14: $D = \{(x, y) \mid 0 \leq y \leq 1, 0 \leq x \leq \sqrt{y}\}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow I &= \int_0^1 \left(\int_0^{\sqrt{y}} x e^{y^2} \, dx \right) dy = \int_0^1 e^{y^2} \left[\frac{x^2}{2} \right]_0^{\sqrt{y}} dy = \\ &= \int_0^1 e^{y^2} \frac{y}{2} dy = \frac{1}{2} \int_0^1 y e^{y^2} dy = \frac{1}{4} \left[e^{y^2} \right]_0^1 = \frac{e-1}{4} \end{aligned}$$

9.3 Definition

Arean av en mängd D i xy -planet är $\text{Area}(D) = \iint_D dx \, dy$

9.3.1 Exempel

$$\begin{aligned}
 D : \begin{cases} a \leq x \leq b \\ f(x) \leq y \leq g(x) \end{cases} \quad , \text{ ger } \text{Area}(D) &= \iint_D dx \, dy = \\
 &= \int_a^b \left(\int_{f(x)}^{g(x)} dy \right) dx = \int_a^b \left[y \right]_{f(x)}^{g(x)} dx = \\
 &= \underbrace{\int_a^b (g(x) - f(x)) dx}_{\text{bekant från envarre}}
 \end{aligned}$$

10 Föreläsning X

10.1 Variabelbyte i dubbelintegraler - Sats

Om D i xy -planet avbildas bijektivt på E i uv -planet (till varje punkt

$(x, y) \in D$ hör en punkt $(u, v) \in E$ och omvänt) med $\frac{d(x, y)}{d(u, v)} = \begin{vmatrix} x'_u & x'_v \\ y'_u & y'_v \end{vmatrix} \neq 0$

så är $\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_E f(x(u, v), y(u, v)) \left| \frac{d(x, y)}{d(u, v)} \right| du dv$

10.1.1 Bevisidé

Approximera trappfunktionen ϕ

För att integralens värde inte ska ändras måste vi multiplicera med

$$\frac{1}{\left| \frac{d(u, v)}{d(x, y)} \right|} = \frac{1}{\begin{vmatrix} u'_x & u'_y \\ v'_x & v'_y \end{vmatrix}} = \begin{vmatrix} x'_u & x'_v \\ y'_u & y'_v \end{vmatrix} = \frac{d(x, y)}{d(u, v)}$$

Jämför med envarre: $dx = \frac{dx}{dt} dt$

Belopp på determinant i flervarre för att vi alltid sätter gränser från undre till övre värde

10.1.2 Exempel

$$I = \iint_D \frac{dx dy}{5 + x^2 + y^2}, \quad D = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 \leq 3, x \leq 0, y \geq 0\}$$

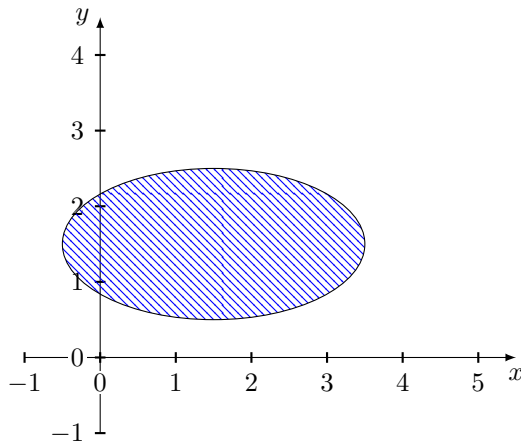
Byt till polära koordinater: $\begin{cases} x = \rho \cos \varphi \\ y = \rho \sin \varphi \end{cases} \Rightarrow D$ övergår i E

$$E : \begin{cases} 0 \leq \rho \leq \sqrt{3} \\ \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi \end{cases} \quad \frac{dx dy}{d\rho d\varphi} = \text{se 7.2.3 on page 27} = \rho$$

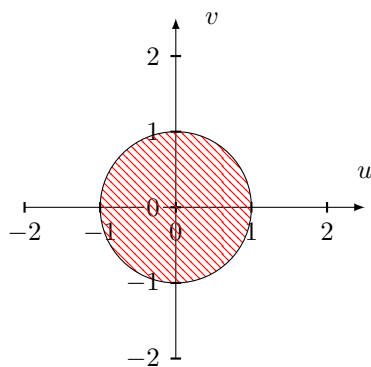
$$\begin{aligned} \Rightarrow I &= \iint_E \frac{1}{5 + \rho^2} \left| \frac{dx dy}{d\rho d\varphi} \right| d\rho d\varphi = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left(\int_0^{\sqrt{3}} \frac{\rho}{5 + \rho^2} d\rho \right) d\varphi = \\ &= \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left[\frac{1}{2} \ln 5 + \rho^2 \right]_0^{\sqrt{3}} d\varphi = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left(\frac{1}{2} \ln 8 - \frac{1}{2} \ln 5 \right) d\varphi = \\ &= \frac{1}{2} \ln \frac{8}{5} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} d\varphi = \frac{1}{2} \ln \frac{8}{5} \left[\rho \right]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} = \underline{\underline{\frac{\pi}{4} \ln \frac{8}{5}}} \end{aligned}$$

10.1.3 På en elipsskiva

$$\left(\frac{x-x_o}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_o}{b}\right)^2 \leq 1$$

Figur 15: Funktion i xy -planet

Variabelbytet $\begin{cases} u = \frac{x-x_o}{a} \\ v = \frac{y-y_o}{b} \end{cases}$, ger $u^2+v^2 \leq 1$ och $\frac{d(x,y)}{d(u,v)} = \frac{1}{\begin{pmatrix} u'_x & u'_y \\ v'_x & v'_y \end{pmatrix}} = \frac{1}{\begin{pmatrix} \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} \end{pmatrix}} = \frac{1}{\frac{1}{ab}} = ab$

Figur 16: Avbildat i uv -planet

$dx dy$ byts mot $ab du dv$, sedan kan u, v bytas mot polära $\frac{d(u,v)}{d(\rho,\varphi)} = \rho$

10.2 Trippelintegraler

$$\iiint_D f(x, y, z) \, dx \, dy \, dz$$

definieras också med över- och undersummor. Ingen rent geometrisk tolkning i 3D ty behövs 4 axlar för x, y, z och f . Fysikaliska tolkningar är att om $f(x, y, z)$ är en densitet/täthet (mass-, laddnings,...) så ger integralen det totala värdet på storheten (massa, laddning,...).

Volymen av D definieras som

$$\iiint_D dx \, dy \, dz \text{ (som area i 2D, se 9.3 on page 40)}$$

Trippelintegraler och multipelintegraler

$$\int \cdots \int_D f(x_1, \dots, x_n) \, dx_1, \dots, dx_n, \, n \geq 4$$

kan beräknas med upprepade enkelintegraler

10.2.1 Exempel

Beräkna $I = \iiint_D z \, dx \, dy \, dz$ då D ges av $\begin{cases} 0 \leq x \leq 1 \\ x \leq y \leq 1 \\ 0 \leq z \leq (y-x)^2 \end{cases}$

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 \left(\int_x^1 \left(\int_0^{(y-x)^2} z \, dz \right) dy \right) dx = \int_0^1 \left(\int_x^1 \left[\frac{z^2}{2} \right]_0^{(y-x)^2} dy \right) dx = \\ &= \int_0^1 \left(\left[\frac{(y-x)^5}{10} \right]_x^1 \right) dx = \int_0^1 \left(\frac{(1-x)^5}{10} - \frac{(x-x)^5}{10} \right) dx = \\ &= \left[-\frac{(1-x)^6}{60} \right]_0^1 = 0 - \left(-\frac{1}{60} \right) = \underline{\underline{\frac{1}{60}}} \end{aligned}$$

10.3 Integrationsordningar

Det finns 6 olika integrationsordningar, ovan [10.2.1 on the preceding page](#) tog vi $z \rightarrow y \rightarrow x$.

Med z först har vi kvar projektionen D_{xy} av D

$$z \rightarrow y \rightarrow x \text{ ger } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 1 \\ x \leq y \leq 1 \\ 0 \leq z \leq (y-x)^2 \end{array} \right\} D_{xy} \quad (10.1)$$

$$z \rightarrow x \rightarrow y \text{ ger } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq y \leq 1 \\ 0 \leq x \leq y \\ 0 \leq z \leq (y-x)^2 \end{array} \right\} D_{xy} \quad (10.2)$$

Med y först har vi kvar projektionen D_{xz} av D

$$\begin{cases} z = (y-x)^2 \Rightarrow \sqrt{z} = \pm(y-x) \Rightarrow y = x + \sqrt{z} \\ z = (1-x)^2 \Rightarrow x = 1 - \sqrt{z} \end{cases}$$

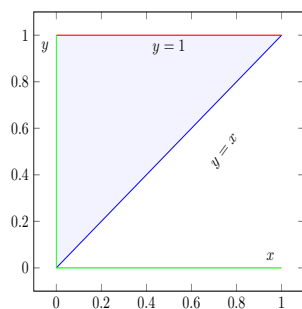
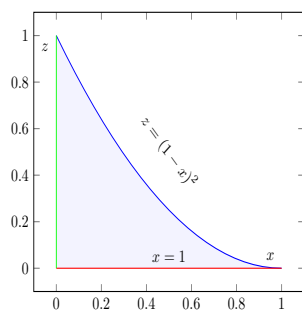
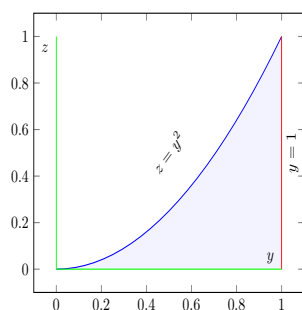
$$y \rightarrow z \rightarrow x \text{ ger } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 1 \\ x \leq z \leq (1-x)^2 \\ x + \sqrt{z} \leq y \leq 1 \end{array} \right\} D_{xz} \quad (10.3)$$

$$y \rightarrow x \rightarrow z \text{ ger } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq z \leq 1 \\ 0 \leq x \leq 1 - \sqrt{z} \\ x + \sqrt{z} \leq y \leq 1 \end{array} \right\} D_{xz} \quad (10.4)$$

Med x först har vi kvar projektionen D_{yz} av D

$$x \rightarrow z \rightarrow y \text{ ger } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq y \leq 1 \\ x \leq z \leq y^2 \\ 0 \leq x \leq y - \sqrt{z} \end{array} \right\} D_{yz} \quad (10.5)$$

$$x \rightarrow y \rightarrow z \text{ ger } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq z \leq 1 \\ \sqrt{z} \leq y \leq 1 \\ 0 \leq x \leq y - \sqrt{z} \end{array} \right\} D_{yz} \quad (10.6)$$

Figur 17: D_{xy} Figur 18: D_{xz} Figur 19: D_{yz}

Test av (10.5)

$$\begin{aligned}
 I &= \int_0^1 \int_0^{y^2} \int_0^{y-\sqrt{z}} z \, dx \, dz \, dy = \int_0^1 \int_0^{y^2} z \left[x \right]_0^{y-\sqrt{z}} dz \, dy = \int_0^1 \int_0^{y^2} z(y - \sqrt{z}) \, dz \, dy = \\
 &= \int_0^1 \left[\frac{z^2 y}{2} - \frac{2z^{\frac{5}{2}}}{5} \right]_0^{y^2} dy = \int_0^1 \left(\frac{y^2}{2} - \frac{2y^5}{5} - \frac{0^2 y}{2} - \frac{2 \cdot 0^{\frac{5}{2}}}{5} \right) dy = \\
 &= \int_0^1 \frac{y^5}{10} dy = \left[\frac{y^6}{60} \right] = \underline{\underline{\frac{1}{60}}}
 \end{aligned}$$

Man kan också tänka att D skivas upp. T.ex. för fixt y har vi skivan i figur 18 on the previous page

$$\begin{aligned}
 \text{Ger } I &= \int_0^1 \left(\iint_{\hat{D}_{xz}} dx \, dz \right) dy \\
 \hat{D}_{xz} &: \begin{cases} 0 \leq x \leq y \\ 0 \leq z \leq (y-x)^2 \end{cases} \quad \text{ger (10.2)} \\
 \hat{D}_{xz} &: \begin{cases} 0 \leq z \leq y^2 \\ 0 \leq x \leq y - \sqrt{z} \end{cases} \quad \text{ger (10.5)}
 \end{aligned}$$

11 Föreläsning XI

Kommer snart!

12 Appendix

Figurer

1	Graf i 2D	2
2	Graf för polära koordinater	3
3	Exempel på rotationssymmetri	5
4	Rymdpolära koordinater	6
5	Grafisk visning av hur f ändras i x - & y -riktningen	8
6	Arean innan skalning	28
7	Arean efter skalning	28
8	Arean innan skalning	29
9	Arean efter skalning ($+\tilde{C}$ påverkar ej arean)	29
10	Grafisk visning av (8.2)	31
11	$D = \{(x, y) \mid 0 \leq x \leq 2, 0 \leq y \leq x^2\}$	35
12	2D representation av en skiva	36
13	Visar på en yta med mindre ytor i	37
14	$D = \{(x, y) \mid 0 \leq y \leq 1, 0 \leq x \leq \sqrt{y}\}$	39
15	Funktion i xy -planet	42
16	Avbildat i uv -planet	42
17	D_{xy}	45
18	D_{xz}	45
19	D_{yz}	45

Tabeller