

# Noter til LinAlgNat på KU (Lineær Algebra i Naturvidenskab)

af Nikolai Plambech Nielsen  
Version 1.0

14. december 2015

## Indhold

<b>1 Introduktion, sprogbrug &amp; notation</b>	<b>3</b>
1.1 Talrum ( $\mathbb{R}$ & $\mathbb{C}$ ) . . . . .	3
1.2 Afbildninger . . . . .	3
1.3 Vektorer . . . . .	4
1.3.1 Regneregler . . . . .	5
1.3.2 Krydsprodukt . . . . .	6
1.4 Matricer . . . . .	6
1.4.1 Enhedsmatricer og elementære matricer . . . . .	8
<b>2 Lineære afbildninger</b>	<b>10</b>
<b>3 Matrixalgebra</b>	<b>10</b>
3.1 Regneoperationer . . . . .	10
3.2 Regneregler . . . . .	12
3.2.1 Matrixmultiplication og lineære afbildninger . . . . .	13
3.3 Invers, transponeret og adjungeret matrix . . . . .	14
3.3.1 Invers matrix . . . . .	14
3.3.2 Transponeret og adjungeret matrix . . . . .	14
3.4 Række- og søjleoperationer . . . . .	16
3.5 Operationsmatricer . . . . .	16
3.6 Trappematricer . . . . .	17
3.7 Regulære matricer og matrixinversion . . . . .	18
<b>4 Lineære ligningssystemer</b>	<b>19</b>
4.1 Løsning af lineære ligningssystemer . . . . .	19
4.1.1 Matrix til trappematrix (Gauss-elimination) . . . . .	20
4.1.2 Trappematrix til reduceret trappematrix (Gauss-Jordan elimination) . . . . .	20
4.1.3 Opskrift på løsning af lineære ligningssystemer . . . . .	20
4.2 Lineære ligningssystemer og lineære afbildninger . . . . .	21
4.3 Løsning med determinanter (Cramers formler) . . . . .	21

<b>5 Determinanter</b>	<b>22</b>
5.1 Determinanter for $2 \times 2$ og $3 \times 3$ matricer . . . . .	22
5.2 Determinant af $n \times n$ -matrix . . . . .	22
5.2.1 Række/søjle-operationer . . . . .	23
5.2.2 Udvikling af determinant . . . . .	23
5.2.3 Opskrift på beregning determinant . . . . .	23
5.3 Egenskaber ved determinanter . . . . .	23
5.4 Invers matrix og determinant . . . . .	24
<b>6 Vektorrum</b>	<b>25</b>
6.1 Definition . . . . .	25
6.2 Lineære afbildninger og isomorfi . . . . .	25
6.3 Endeligdimensionalitet, basis, underrum, span, kerne . . . . .	26
6.4 Lineær (u)afhængighed . . . . .	27
6.5 Uddyndings-/udvidelsesalgoritmen . . . . .	28
6.6 Rang og dimensionssætningen . . . . .	29
<b>7 Skalarprodukt og orthonomalbaser</b>	<b>30</b>
7.1 Gram-Schmidt ortogonalisering . . . . .	31
<b>8 Koordinattransformationer</b>	<b>32</b>

# 1 Introduktion, sprogbrug & notation

## 1.1 Talrum ( $\mathbb{R}$ & $\mathbb{C}$ )

Disse noter omhandler lineær algebra, og derfor også  $n$ -dimensionale rum. Mængden  $\mathbb{R}$  er de reelle tal, mens  $\mathbb{C}$  er de komplekse tal. Da reelle tal er et undersæt at komplekse tal (den imaginære del er bare lig 0), er  $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$ . I denne bog, og dermed også disse noter, defineres mængden  $\mathbb{F}$  til enten at være de komplekse tal  $\mathbb{C}$  eller  $\mathbb{R}$ . Dette betyder egentlig, at  $\mathbb{F}$  altid indeholder de reelle tal, men den bruges til at specificere, at vi kan både bruge reelle og komplekse værdier i en operation, mens  $\mathbb{C}$  bruges til at specificere, at vi med sikkerhed bruger komplekse værdier i denne operation. Mængden  $\mathbb{F}$  bruges da i definitioner og sætninger, for at specificere, at det er lige meget, hvilket af de to rum, man arbejder med.

Yderligere betegner  $n$  i  $\mathbb{F}^n$  antallet af dimensioner, og altså antallet af værdier ethvert koordinatsæt indeholder. Eksempelvis er  $\mathbb{R}^2$  realplanen, hvor der normalt er  $x$  og  $y$  koordinater, hvor  $\mathbb{C}^3$  er det 3-dimensionale, komplekse rum.

## 1.2 Afbildninger

Ved en **afbildning** af en mængde  $X$ , ind i en mængde  $Y$  (eller en **funktion** fra  $X$  til  $Y$ ) forstås en forskrift, hvorved der til hvert element  $x \in X$  knyttes et element  $y \in Y$ .  $X$  og  $Y$  kan altså være enhver mængde, eksempelvis kendes funktioner af én variabel, hvor  $X = \mathbb{R}$  og  $Y = \mathbb{R}$ , hvis funktionen er ubegrænset og defineret i hele  $\mathbb{R}$ . Mængden  $X$  kaldes for **definitionsmængden**, mens  $Y$  kaldes for **dispositionsmængden**.

Normalt betegnes en afbildning (som en funktion) ved ét bogstav. Notationen er:

$$f: X \rightarrow Y$$

Elementet tilsvarende  $x$  kaldes  $f(x)$  og kaldes **billedet** af  $x$  ved  $f$  eller den tilhørende **funktionsværdi**. At  $f(x)$  svarer til  $x$  skrives som

$$x \rightarrow f(x)$$

Der kan også tages et billede af en hel delmængde af  $X$ . Eksempelvis udgør billederne for alle  $x \in A \subseteq X$  en delmængde af  $Y$ , der kaldes billedet af  $A$  ved  $f$ , og betegnes  $f(A)$ . Dette skrives:

$$f(A) = \{f(x) \mid x \in A\}$$

Billedet af *hele* mængden  $X$  (kaldet  $f(X)$ ) kaldes for **billedmængden** eller **værdimængden** for  $f$ . Dette kendes også fra funktioner for én variabel, hvor værdimængden er mængden af alle  $y$ -værdier, mens dispositionsmængden (som ikke altid er den samme), for det meste er hele  $\mathbb{R}$ . Altså gælder:

$$f(X) \subseteq Y$$

En afbildning  $f: X \rightarrow Y$  kaldes **surjektiv** eller en afbildning af  $X$  på  $Y$ , hvis  $f(X) = Y$ , altså at værdimængden er lig hele dispositionsmængden. Afbildningen kaldes **injektiv**, hvis der for vilkårlige valg af  $x$ -værdier er forskellige

funktionsværdier, altså at  $f(x_1) = f(x_2)$  kun hvis  $x_1 = x_2$ . Til sidst kaldes en afbildning **bijektiv**, hvis denne både er surjektiv og injektiv, og hvis der altså til ethvert billede  $y \in Y$  findes ét og kun ét  $x \in X$ .

Disse egenskaber kan også beskrives, hvis der for en afbildning  $f: X \rightarrow Y$  er givet et  $x \in X$  og  $y \in Y$ , og ligningen  $f(x) = y$  betragtes. Da gælder det:

1. Ligningen har *mindst* en løsning for hvert  $y$ , hvis  $f$  er surjektiv
2. Ligningen har *højst* en løsning for hvert  $y$ , hvis  $f$  er injektiv
3. Ligningen har *kun* en løsning for hvert  $y$ , hvis  $f$  er bijektiv

Til bijektive afbildninger  $f: X \rightarrow Y$  hører den **omvendte** eller **inverse** afbildning  $f^{-1}: Y \rightarrow X$ . Denne afbildning er også bijektiv, og der hører et  $x \in X$  til ethvert billede af  $y \in Y$ :  $f^{-1}(y) = x$ . Yderligere gælder  $(f^{-1})^{-1} = f$ .

**Sammensatte afbildninger** er som følger: lad  $X, Y, Z$  være mængder og lad  $f: X \rightarrow Y$  og  $g: Y \rightarrow Z$  være afbildninger. Deres sammensatte afbildning  $f \circ g: X \rightarrow Z$  knytter et element  $g(f(x)) \in Z$  til hvert element  $x \in X$ . For sammensatte afbildninger gælder den associative regel: Lad  $X, Y, Z, W$  være mængder, og lad  $f: X \rightarrow Y$ ,  $g: Y \rightarrow Z$ ,  $h: Z \rightarrow W$ . Da gælder:

$$h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f = h \circ g \circ f$$

Yderligere gælder det, at hvis både  $f$  og  $g$  er enten surjektive, injektive eller bijektive, så er den sammensatte afbildning  $g \circ f$  også henholdsvis surjektiv, injektiv eller bijektiv. Og for bijektive, sammensatte afbildninger gælder at  $(g \circ f)^{-1} = g^{-1} \circ f^{-1}$

**Identiske afbildninger** er afbildninger  $\text{id}_X: X \rightarrow X$  af en mængde  $X$  ind i sig selv, hvor billedeet af  $x \in X$  er lig  $x \in X$ . Altså  $\text{id}_X(x) = x$ . For enhver bijektiv afbildning  $f: X \rightarrow Y$  gælder at  $f^{-1} \circ f = \text{id}_X$  og  $f \circ f^{-1} = \text{id}_Y$ .

Hvis  $f: X \rightarrow Y$  og  $g: Y \rightarrow X$  er afbildninger så  $g \circ f = \text{id}_X$  og  $f \circ g = \text{id}_Y$ , da er begge afbildninger bijektive, og  $f^{-1} = g$ ,  $g^{-1} = f$ .

### 1.3 Vektorer

Vektorer er en konstruktion i  $\mathbb{F}^n$ , der har en størrelse og retning i  $n$  dimensioner. Eksempelvis kendes vektorer i planen som  $\mathbb{R}^2$ . Disse skrives normalt som:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathbf{a}$$

I denne bog, og i disse noter bruges dog en anden notation:

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Her noteres en vektor altså med en enkelt understregning, mens de enkelte værdier  $x_1$  og  $x_2$  viser hvilken dimension/række de tilhører. Dette muliggører nem udvidelse til mere end 3 dimensioner. Generelt er vektorformen for en vektor  $\underline{x}$  i  $\mathbb{F}^n$

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

De mest almindelige operationer er skalering af vektorer, eller multiplicering med en skalar, og addition/subtraktion. Skalering er at gange en vektor  $\underline{x}$  i  $\mathbb{F}^n$  med en skalar (et tal i  $\mathbb{F}$ ):

$$a \cdot \underline{x} = \begin{pmatrix} ax_1 \\ \vdots \\ ax_n \end{pmatrix}$$

En negativ vektor  $-\underline{x}$  er så en vektor ganget med  $-1$ :

$$-\underline{x} = (-1)\underline{x} = \begin{pmatrix} -x_1 \\ \vdots \\ -x_n \end{pmatrix}$$

Addition defineres som:

$$\underline{x} + \underline{y} = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix}$$

Og subtraktion:

$$\underline{x} - \underline{y} = \underline{x} + (-\underline{y}) = \begin{pmatrix} x_1 - y_1 \\ \vdots \\ x_n - y_n \end{pmatrix}$$

Et udtryk på formen  $a\underline{x} + b\underline{y}$  kaldes en **linearkombination** af  $\underline{x}$  og  $\underline{y}$ . Til sidst, inden regnereglerne for vektorer opskrives, defineres nulvektoren  $\underline{o}$  i  $\mathbb{F}^n$  som:

$$\underline{o} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

(altså med bogstavet "o")

### 1.3.1 Regneregler

Regnereglerne for vektorer er således:

$$V1: (\underline{x} + \underline{y}) + \underline{z} = \underline{x} + (\underline{y} + \underline{z})$$

$$V2: \underline{x} + \underline{o} = \underline{x}$$

$$V3: \underline{x} + (-\underline{x}) = \underline{o}$$

$$V4: \underline{x} + \underline{y} = \underline{y} + \underline{x}$$

$$V5: a(\underline{x} + \underline{y}) = a\underline{x} + a\underline{y}$$

$$V6: (a + b)\underline{x} = a\underline{x} + b\underline{x}$$

$$V7: (ab)\underline{x} = a(b\underline{x})$$

$$V8: 1\underline{x} = \underline{x}$$

## Skalarprodukt

I  $\mathbb{F}^n$  defineres skalarproduktet  $\underline{x} \cdot \underline{y}$ :

$$\underline{x} \cdot \underline{y} = x_1\bar{y}_1 + \cdots + x_n\bar{y}_n = \sum_{j=1}^n x_j\bar{y}_j$$

Hvor  $\bar{y}$  er den kompleks konjugerede af  $y$  (altså  $y$  med omvendt imaginærværdi). Dette gør da, at hvis  $y \in \mathbb{R}$ , er  $\bar{y} = y$ , og dermed bliver skalarproduktet det velkendte  $x_1 + y_1 + \cdots + x_n + y_n$ . Regnereglerne for skalarprodukter er således:

S1:  $(\underline{x} + \underline{y}) \cdot \underline{z} = \underline{x} \cdot \underline{z} + \underline{y} \cdot \underline{z}$

S2:  $(a\underline{x}) \cdot \underline{y} = a(\underline{x} \cdot \underline{y})$

S3:  $\underline{x} \cdot \underline{y} = \bar{\underline{y}} \cdot \underline{x}$

S4:  $\underline{x} \cdot \underline{x} \geq 0$

S5:  $\underline{x} \cdot \underline{x} = 0 \Rightarrow \underline{x} = \underline{0}$

Længden af en vektor defineres som:

$$|\underline{x}| = \sqrt{x_1^2 + \cdots + x_n^2} = \sqrt{\underline{x} \cdot \underline{x}}$$

Det bemærkes at  $|a\underline{x}| = |a||\underline{x}|$ . To vektorer siges at være **ortogonale**, hvis

$$\underline{x} \cdot \underline{y} = 0$$

### 1.3.2 Krydsprodukt

Krydsproduktet af to vektorer i  $\mathbb{R}^3$  er givet ved:

$$\underline{a} \times \underline{b} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} \quad (1)$$

## 1.4 Matricer

En **matrix** (en matrix, matricen, flere matricer, alle matricerne) er en tabel med talværdier, og har formen:

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Dette er den **generelle** matrix, hver værdi  $a_{ij}$  kaldes en **indgang**, og ligger i  $\mathbb{F}$ . Hvis  $\mathbb{F} = \mathbb{R}$  kaldes matricen reel, og hvis  $\mathbb{F} = \mathbb{C}$  kaldes matricen kompleks. Den  $i$ 'te række i  $\underline{\underline{A}}$  betegnes  $\underline{\underline{A}}[i, *]$ , og er

$$(a_{i1}, \dots, a_{in})$$

Og den  $j$ 'te søjle i  $\underline{\underline{A}}$  betegnes  $\underline{\underline{A}}[*, j]$ , og er

$$\begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{mj} \end{pmatrix}$$

Indgangen  $a_{ij}$ , som står i den  $i$ 'te række og  $j$ 'te søjle, betegnes da  $\underline{\underline{A}}[i, j]$ . Matricen  $\underline{\underline{A}}$  har  $m$  rækker og  $n$  søjler (men ikke nødvendigvis flere søjler end rækker. At disse betegnes  $m$  og  $n$  siger intet om deres indbyrdes størrelse). Matricen består da af  $mn$  indgange fra  $\mathbb{F}$ , og kalder en sådan matrix for en  $m \times n$ -matrix.

Matricen  $\underline{\underline{A}}$  kan også opfattes som bestående af  $n$   $m$ -dimensionelle vektorer, der skrives:

$$\underline{a}_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}, \dots, \underline{a}_n = \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Disse vektorer kaldes for matricens **søjlevektorer**.

En  $m \times 1$ -matrix kaldes en **søjlematrix** og har form som en vektor:

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}$$

Og en  $1 \times n$ -matrix kaldes en **rækkematrix** og har formen

$$(a_{11} \quad \dots \quad a_{1n})$$

Søjlematricer og vektorer bruges i forskellige sammenhænge (for eksempel bruges søjlematricer til matrixmultiplikation), men der er ingen stor forskel på dem, ud over sammenhæng og notation.

En matrix hvor alle elementer er lig 0 kaldes en **nulmatrix** og betegnes  $\underline{\underline{0}}$  eller  $\underline{\underline{0}}_{m,n}$  (altså med tallet "0")

Matricen  $\underline{\underline{A}}$  kan også opskrives på en kortere måde, end ved en tabel:

$$\underline{\underline{A}} = (a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n}, \quad (4)$$

eller endnu kortere

$$\underline{\underline{A}} = (a_{ij})_{m,n}. \quad (5)$$

Og disse skrivemåder er altså ækvivalente med opskrivning ved en tabel.

En  $n \times n$ -matrix, der altså har lige mange rækker og søjler, kaldes en **kvadratisk matrix**, og alle indgange  $a_{ij}$  hvor  $i = j$  siges at stå i diagonalen, mens alle andre indgange (hvor  $i \neq j$ ) siges at stå uden for diagonalen. En kvadratisk matrix, hvor alle indgange ude for diagonalen er lig 0, kaldes for en **diagonalmatrix**.

En kvadratisk matrix hvor  $a_{ij} = 0$  for alle  $i$  og  $j$  med  $i < j$  kaldes en **nedre trekantsmatrix**:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

De forskellige indgange hvor  $i < j$  kan sagtens være 0. Kravet er kun, at alle indgange over diagonalen er lig 0.

Ligeledes kaldes en kvadratisk matrix, hvor alle indgange under diagonalen er lig 0 ( $a_{ij} = 0$  for alle  $i > j$ ), for en **øvre trekantsmatrix**:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Fra en  $m \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  og en  $m \times p$  matrix  $\underline{\underline{B}}$  kan der dannes en  $m \times (n + p)$ -matrix  $\underline{\underline{C}}$  ved at opskrive  $\underline{\underline{B}}$ 's søjler efter  $\underline{\underline{A}}$ 's søjler. Matricen  $\underline{\underline{C}}$  kaldes for en **blokmatrix** og skrives:

$$\underline{\underline{C}} = (\underline{\underline{A}} \quad \underline{\underline{B}}) \quad (8)$$

Det samme kan gøres for flere matricer. For eksempel kan  $\underline{\underline{A}}$  dannes ud fra sine søjlematricer:

$$\underline{\underline{A}} = (\underline{\underline{A}}_1 \quad \cdots \quad \underline{\underline{A}}_n)$$

Det samme kan gøres med søjlevektorer.

#### 1.4.1 Enhedsmatricer og elementære matricer

En diagonalmatrix hvor alle indgange på diagonalen er lig 1 kaldes for en **enhedsmatrix**. Disse betegnes enten  $\underline{\underline{E}}$  eller  $\underline{\underline{E}}_{n,n}$ , hvis antallet af rækker/søjler ønskes specificeret. Hvis der ikke specificeres antal rækker/søjler følger enhedsmatricens størrelse af kontekst.

Enhedsmatricen kan også ses opbygget af **standard enhedssøjlematricerne** eller **standard enhedsvektorerne**:

$$\underline{\underline{E}}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \underline{\underline{E}}_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\underline{\underline{e}}_j = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \underline{\underline{e}}_j = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \leftarrow j, \dots, \underline{\underline{e}}_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

En matrix hvor alle indgange (eller elementer) pånær plads  $(j, k)$ , der er lig 1, kaldes for en **elementærmatrix**. Denne ser sådan ud:

$$\underline{\underline{I}}_{j,k} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

hvor 1 altså er i række  $j$  og søje  $k$ . Elementærmaticens størrelse defineres normalt ikke, andet end med kontekst (hvis der arbejdes med en  $m \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$ , så har dens elementærmatricer også størrelsen  $m \times n$ ).

En vilkårlig  $m \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  kan opbygges som en sum af skalerede elementærmatricer: (se regnereglerne for matricer, i afsnittet Matrixalgebra)

$$\underline{\underline{A}} = \sum_{j,k} a_{jk} \underline{\underline{I}}_{j,k} \quad (12)$$

Og for to elementærmatricer, der kan multipliceres (igen, se regnereglerne for matricer) gælder følgende:

$$\underline{\underline{I}}_{j,k} \underline{\underline{I}}_{m,n} = \delta_{km} \underline{\underline{I}}_{j,n}, \text{ hvor } \delta_{km} = \begin{cases} 1 & k = m \\ 0 & \text{ellers} \end{cases}$$

hvor  $\delta_{km}$  kaldes Kroneckers delta. Eksempelvis multipliceres  $5 \times 5$  matricen  $\underline{\underline{I}}_{2,4}$  (altså 1 i anden række, fjerde søjle) med sig selv, fås følgende:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{I}}_{2,4} \underline{\underline{I}}_{2,4} &\Rightarrow j = m = 2, k = n = 4 \Rightarrow k \neq m \Rightarrow \delta_{km} = 0 \\ &= 0 \underline{\underline{I}}_{2,4} = \underline{\underline{0}} \end{aligned}$$

Men hvis matricerne  $\underline{\underline{I}}_{2,4}$  og  $\underline{\underline{I}}_{4,4}$  multipliceres fås:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{I}}_{2,4} \underline{\underline{I}}_{4,4} &\Rightarrow j = 2, k = m = n = 4 \Rightarrow k = m \Rightarrow \delta_{km} = 1 \\ &= 1 \underline{\underline{I}}_{2,4} = \underline{\underline{I}}_{2,4} \end{aligned}$$

Samme resultat kan også opnås ved almindelig matrixmultiplikation.

## 2 Lineære afbildninger

Vi lader en  $m \times n$  matrix  $\underline{\underline{A}}$ , med indgange i  $\mathbb{F}$ , der har formen

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

knyttes til en afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$ , ved fastsættelsen af

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mn}x_n \end{pmatrix} \quad (14)$$

En afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$ , der på denne måde har en matrix knyttet til sig, kaldes **lineær**. Hvis  $\mathbb{F} = \mathbb{R}$  kaldes den reelt lineær, og hvis  $\mathbb{F} = \mathbb{C}$  kaldes den komplekts lineær.

En anden definition er som følger:

Lad  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$  være en lineær afbildung. Da gælder

L1:  $f(a\underline{x}) = af(\underline{x})$  for alle  $\underline{x} \in \mathbb{F}^n$ ,  $a \in \mathbb{F}$

L2:  $f(\underline{x} + \underline{y}) = f(\underline{x}) + f(\underline{y})$  for alle  $\underline{x}, \underline{y} \in \mathbb{F}^n$

Hvis omvendt  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$  er en afbildung så L1 og L2 er opfyldt, da er  $f$  en lineær afbildung.

For lineære afbildninger gælder også **søjlereglen**, der siger:

Den  $j$ 'te søjlevektor i  $\underline{\underline{A}}$  er lig billedet ved  $f$  af den  $j$ 'te standard enhedsvektor.

Altså at  $f(\underline{E}_j) = \underline{\underline{A}}_j$ .

Yderligere gælder der for en lineær afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$  knyttet til matricen  $\underline{\underline{A}} = (a_{ij})_{m,n}$  at

$$a_{ij} = f(e_j) \cdot e_i, \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (15)$$

## 3 Matrixalgebra

### 3.1 Regneoperationer

Her defineres 3 regneoperationer for matricer: multiplikation med en skalar (skaling), addition af matricer og multiplikation af matricer.

For matricen

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} = (a_{ij}) \quad (16)$$

defineres **multiplikation med en skalar** som

$$\lambda \underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} \lambda a_{11} & \cdots & \lambda a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda a_{m1} & \cdots & \lambda a_{mn} \end{pmatrix} = (\lambda a_{ij}). \quad (17)$$

Altså hvert element skaleres med faktoren  $\lambda$ .

For to  $m \times n$  matricer  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  defineres **addition af matricer**:

$$\begin{aligned}\underline{\underline{A}} &= \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{B}} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix} \\ \underline{\underline{A}} + \underline{\underline{B}} &= \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & \cdots & a_{1n} + b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & \cdots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix} = (a_{ij} + b_{ij}).\end{aligned}\quad (18)$$

Altså lægges to matricer sammen, ved at lægge deres individuelle indgange sammen parvis.

**Matrixmultiplikation** defineres som:

For en  $m \times p$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  og en  $p \times n$ -matrix  $\underline{\underline{B}}$ , der har formene

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mp} \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{B}} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{p1} & \cdots & b_{pn} \end{pmatrix},$$

defineres  $\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{B}}$ , der er en  $m \times n$ -matrix på formen

$$\underline{\underline{C}} = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix}$$

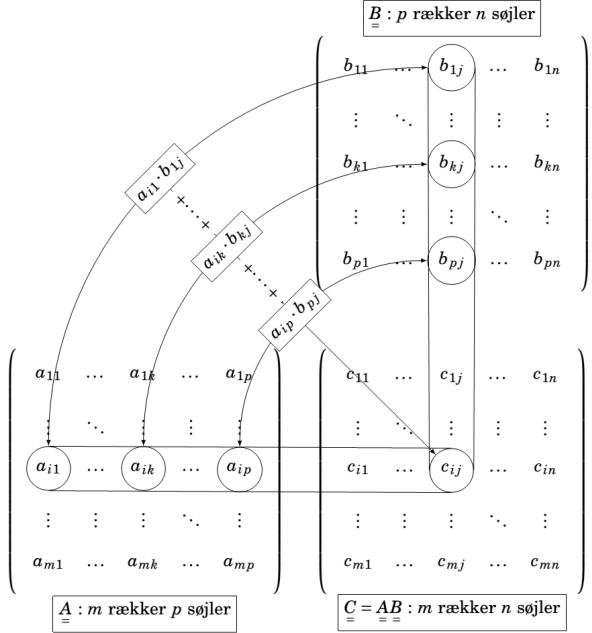
for hvilken

$$c_{ij} = a_{i1}b_{1j} + \cdots + a_{ip}b_{pj} = \sum_{k=1}^p a_{ik}b_{kj}, \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (19)$$

Hvis indgangene i  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  er reelle, så er indgangen  $c_{ij} = \underline{\underline{A}}[i, *] \cdot \underline{\underline{B}}[* , j]$ . Altså skalarproduktet mellem den  $i$ 'te række i  $\underline{\underline{A}}$  og den  $j$ 'te søjle i  $\underline{\underline{B}}$ .

Den første matrix skal altså have lige så mange rækker som den anden matrix har søjler, førend matrixmultiplikation er defineret. Det er altså **ikke lige meget, hvilket rækkefølge faktorerne står!**.  $\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{B}} = \underline{\underline{B}} \cdot \underline{\underline{A}}$  gælder altså almindeligvis **ikke**!

Herunder er en illustration af, hvordan matrixmultiplikation kan visualiseres (taget fra bogen Lineær Algebra, som disse noter er udarbejdet efter.)



Figur 1: Matrixmultiplikation

### 3.2 Regneregler

For matrixregning gælder følgende regneregler:

$$\text{M1: } (\underline{\underline{A}} + \underline{\underline{B}}) + \underline{\underline{C}} = \underline{\underline{A}} + (\underline{\underline{B}} + \underline{\underline{C}})$$

$$\text{M2: } \underline{\underline{A}} + \underline{\underline{0}} = \underline{\underline{A}}$$

$$\text{M3: } \underline{\underline{A}} + (-\underline{\underline{A}}) = \underline{\underline{0}}$$

$$\text{M4: } \underline{\underline{A}} + \underline{\underline{B}} = \underline{\underline{B}} + \underline{\underline{A}}$$

$$\text{M5: } \lambda(\underline{\underline{A}} + \underline{\underline{B}}) = \lambda\underline{\underline{A}} + \lambda\underline{\underline{B}}$$

$$\text{M6: } (\lambda + \mu)\underline{\underline{A}} = \lambda\underline{\underline{A}} + \mu\underline{\underline{A}}$$

$$\text{M7: } (\lambda\mu)\underline{\underline{A}} = \lambda(\mu\underline{\underline{A}})$$

$$\text{M8: } 1\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{A}}$$

$$\text{M9: } \lambda(\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}}) = (\lambda\underline{\underline{A}}) \underline{\underline{B}} = \underline{\underline{A}} (\lambda\underline{\underline{B}})$$

$$\text{M10: } \underline{\underline{A}} (\underline{\underline{B}} + \underline{\underline{C}}) = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}} + \underline{\underline{A}} \underline{\underline{C}}$$

$$\text{M11: } (\underline{\underline{A}} + \underline{\underline{B}}) \underline{\underline{C}} = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{C}} + \underline{\underline{B}} \underline{\underline{C}}$$

$$\text{M12: } (\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}}) \underline{\underline{C}} = \underline{\underline{A}} (\underline{\underline{B}} \underline{\underline{C}})$$

For at operationerne i M1-M12 skal være definerede, skal de individuelle matricer have passende størrelse (samme størrelse ved addition, samme antal rækker for den ene, som søger for den anden).

For en  $n \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  og et naturligt tal  $k$  defineres den  $k$ 'te **potens** af  $\underline{\underline{A}}$  som

$$\underline{\underline{A}}^k = \underline{\underline{A}} \dots \underline{\underline{A}} \text{ (} k \text{ faktorer).} \quad (20)$$

**Negative potenser** af  $\underline{\underline{A}}$ , hvor alle indgange er forskellige fra nul, defineres som:

$$\underline{\underline{A}}^{-k} = (\underline{\underline{A}}^{-1})^k \quad (21)$$

hvor  $\underline{\underline{A}}^{-1}$  er den inverse matrix af  $\underline{\underline{A}}$  (se kapitel 3.3.1). Vi sætter også følgende:

$$\underline{\underline{A}}^1 = \underline{\underline{A}}, \quad \underline{\underline{A}}^0 = \underline{\underline{E}}. \quad (22)$$

og herfra gælder:

$$\underline{\underline{A}}^{k_1} \underline{\underline{A}}^{k_2} = \underline{\underline{A}}^{k_1+k_2} \quad (23)$$

for heltal  $k_1, k_2$ .

For diagonalmatricer er matrixmultiplikation især næmt:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{A}} &= \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{B}} = \begin{pmatrix} \mu_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \mu_n \end{pmatrix} \\ \underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}} &= \begin{pmatrix} \lambda_1 \mu_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \mu_n \end{pmatrix} = \underline{\underline{B}} \underline{\underline{A}} \end{aligned}$$

Og for potenser:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{A}}^k &= \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}^k = \begin{pmatrix} \lambda_1^k & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n^k \end{pmatrix} \\ \underline{\underline{A}}^{-k} &= \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}^{-k} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda_1^k} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{1}{\lambda_n^k} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

### 3.2.1 Matrixmultiplication og lineære afbildninger

For en lineær afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$ , med tilknyttede  $m \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  gælder

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \end{pmatrix}$$

Skrives vektorer i  $\mathbb{F}^n$  som søjlematricer

$$\underline{\underline{X}} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix},$$

da kan den lineære afbildning (3.2.1) udtrykkes ved matrixmultiplikation:

$$f(\underline{\underline{X}}) = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}. \quad (24)$$

For sammensatte lineære afbildninger gælder:

Hvis  $f: \mathbb{F}^p \rightarrow \mathbb{F}^m$  og  $g: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^p$  er lineære afbildninger, så er den samme-  
satte afbildning  $h = f \circ g: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$  også lineær. Hvis  $f$  svarer til  $m \times p$ -matricen  
 $\underline{\underline{A}}$  og  $g$  svarer til  $p \times n$ -matricen  $\underline{\underline{B}}$ , da svarer  $h = f \circ g$  til  $m \times n$ -matricen  $\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}}$ .

### 3.3 Invers, transponeret og adjungeret matrix

#### 3.3.1 Invers matrix

Definitionen på en **regulær**, eller **invertibel** matrix er som følger:

En  $n \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  kaldes regulær eller invertibel, hvis den tilhørende lineære  
afbildning  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$  er bijektiv. Da kaldes den til  $f^{-1}$  hørende  $n \times n$ -matrix  
for den inverse til  $\underline{\underline{A}}$ , og betegnes  $\underline{\underline{A}}^{-1}$ .

For **omvendte** eller **inverse** afbildninger gælder:

Lad  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$  være en bijektiv lineær afbildning. Den omvendte afbild-  
ning  $f^{-1}: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$  er ligeledes lineær.

Yderligere gælder det at:

1. Enhedsmatricen  $\underline{\underline{E}}$  er regulær og  $\underline{\underline{E}}^{-1} = \underline{\underline{E}}$
2. Hvis  $\underline{\underline{A}}$  er regulær, er  $\underline{\underline{A}}^{-1}$  regulær, og  $(\underline{\underline{A}}^{-1})^{-1} = \underline{\underline{A}}$
3. Hvis  $\underline{\underline{A}}$  er regulær, er  $\underline{\underline{A}}^{-1} \underline{\underline{A}} = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{A}}^{-1} = \underline{\underline{E}}$
4. Hvis  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  er regulære, da er  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}}$  regulær, og  $(\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}})^{-1} = \underline{\underline{B}}^{-1} \underline{\underline{A}}^{-1}$
5. Hvis  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  er  $n \times n$ -matricer, så  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}} = \underline{\underline{E}}$ . Da er  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  regulær, og  
 $\underline{\underline{A}}^{-1} = \underline{\underline{B}}$ ,  $\underline{\underline{B}}^{-1} = \underline{\underline{A}}$

#### 3.3.2 Transponeret og adjungeret matrix

For en  $m \times n$ -matrix

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

defineres den **transponerede** matrix  $\underline{\underline{A}}^t$ , som den  $n \times m$  matrix

$$\underline{\underline{A}}^t = \begin{pmatrix} a'_{11} & \cdots & a'_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a'_{m1} & \cdots & a'_{mn} \end{pmatrix}$$

Hvor

$$a'_{ij} = a_{ji}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad 1 \leq j \leq m.$$

eller

$$\underline{\underline{A}}^t = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{m1} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (25)$$

Den transponerede matrix fås altså ved at skrive den første *række* i  $\underline{\underline{A}}$ , som den første *søjle* i  $\underline{\underline{A}}^t$ , den anden række, som den anden søjle, osv. Altså  $\underline{\underline{A}}^t[i, j] = \underline{\underline{A}}[j, i]$ .

Den **adjungerede** matrix  $\underline{\underline{A}}^*$  defineres som den konjugerede, transponerede matrix:

$$\underline{\underline{A}}^* = \overline{\underline{\underline{A}}^t} \quad (26)$$

Hvis matricen  $\underline{\underline{A}}$  er reel, er  $\overline{\underline{\underline{A}}} = \underline{\underline{A}}$ , og  $\underline{\underline{A}}^* = \underline{\underline{A}}^t$ .

For vilkårlige, transponerede og adjungerede  $m \times n$ -matricer gælder det:

$$(\underline{\underline{A}}^t)^t = \underline{\underline{A}}, \quad (\underline{\underline{A}}^*)^* = \underline{\underline{A}}$$

Og for  $m \times p$ -matricen  $\underline{\underline{A}}$  og  $p \times n$ -matricen  $\underline{\underline{B}}$  gælder

$$(\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}})^t = \underline{\underline{B}}^t \underline{\underline{A}}^t, \quad (\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}})^* = \underline{\underline{B}}^* \underline{\underline{A}}^*$$

For regulære matricer  $\underline{\underline{A}}$  gælder det, at både den transponerede og adjungerede matrix er regulær, og at

$$(\underline{\underline{A}}^t)^{-1} = (\underline{\underline{A}}^{-1})^t, \quad (\underline{\underline{A}}^*)^{-1} = (\underline{\underline{A}}^{-1})^*$$

For lineære afbildninger  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$ , der har den tilhørende  $m \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$ , defineres den **transponerede** lineære afbildung  $f^t: \mathbb{F}^m \rightarrow \mathbb{F}^n$ , der har den transponerede matrix  $\underline{\underline{A}}^t$  som tilhørende matrix. Den **adjungerede** lineære afbildung  $f^*: \mathbb{F}^m \rightarrow \mathbb{F}^n$  har adjungerede matrix  $\underline{\underline{A}}^*$  som tilhørende matrix.

Om adjungerede lineære afbildninger gælder:

$$f(\underline{x}) \cdot \underline{y} = \underline{x} \cdot f^*(\underline{y})$$

for alle vektorer  $\underline{x} \in \mathbb{F}^n$  og  $\underline{y} \in \mathbb{F}^m$ . Og er  $g: \mathbb{F}^m \rightarrow \mathbb{F}^n$  en afbildung hvor

$$f(\underline{x}) \cdot \underline{y} = \underline{x} \cdot (g\underline{y})$$

for alle vektorer  $\underline{x} \in \mathbb{F}^n$ ,  $\underline{y} \in \mathbb{F}^m$ , så er  $g = f^*$ .

En matrix  $\underline{\underline{A}}$  kaldes **symmetrisk**, hvis  $\underline{\underline{A}}^t = \underline{\underline{A}}$ . Dette betyder også, at den er  $n \times n$  og at  $a_{ij} = a_{ji}$  for alle  $i \leq j \leq n$ . En lineær afbildung  $f$  kaldes **symmetrisk**, hvis den tilhørende matrix er symmetrisk. Dette betyder at  $f^t = f$ .

En matrix  $\underline{\underline{A}}$  kaldes **hermitisk**, hvis  $\underline{\underline{A}}^* = \underline{\underline{A}}$ . Dette betyder igen, at det er en  $n \times n$ -matrix. Her er dog  $a_{ij} = \bar{a}_{ji}$  for alle  $1 \leq i, j \leq n$ . En lineær afbildung  $f$ , hvis tilhørende matrix er hermitisk, kaldes **selvadjungeret**. Dette betyder også  $f^* = f$ .

For en selvadjungeret lineær afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$  gælder det at

$$f(\underline{x}) \cdot \underline{y} = \underline{x} \cdot f(\underline{y})$$

for alle vektorer  $\underline{x}, \underline{y} \in \mathbb{F}^n$ .

### 3.4 Række- og søjleoperationer

Tre typer af **rækkeoperationer**

- Type M: Multiplikation af en række med et tal  $c \neq 0$
- Type B: Ombytning af to rækker
- Type S: Addition af et multiplum af en række til en anden række (læg én række, ganget med et tal  $c$ , sammen med en anden række).

Der er også omvendte rækkeoperationer, der “ophæver” de førstnævnte rækkeoperationer:

- Den omvendte type M: At gange en række med tallet  $1/c$
- Den omvendte type B: Bytte om på to rækker igen
- Den omvendte type S: læg den samme række fra før, dog ganget med  $-c$ , til den samme anden række

Der findes også disse tilsvarende tre typer (plus deres omvendte) **søjleoperationer**.

En **søjleoperation** kan også udføres ved at transponere matricen, udføre den tilsvarende rækkeoperation, og transponere den resulterende matrice tilbage. Med andre ord, svarer en **søjle operation** til en transponeret rækkeoperation. Dette bliver især tydeligt når der ses på operationsmatricer.

### 3.5 Operationsmatricer

En **operationsmatrix** er matricen der fås ved at udføre en rækkeoperation på enhedsmatricen. Der en operationsmatrix til hver af de tre typer rækkeoperationer:

- Type M: Matricerne  $\underline{\underline{M}}_i(c)(c \neq 0)$ , der forekommer ved at gange den  $i$ ’te række i enhedsmatricen med  $c$ . Rækkeoperationerne betegnes  $M_i(c)$
- Type B: Matricerne  $\underline{\underline{B}}_{ij}(i \neq j)$ , der fremkommer ved at ombytte den  $i$ ’te og  $j$ ’te række i enhedsmatricen. Rækkeoperationerne betegnes  $B_{ij}$
- Type S: Matricerne  $\underline{\underline{S}}_{ij}(i \neq j)$ , der fremkommer ved at gange den  $j$ ’te række med  $c$  og dernæst lægge den til den  $i$ ’te række. Rækkeoperationerne betegnes  $S_{ij}(c)$ .

Disse operationsmatricer kan også udtrykkes ved enhedsmatricer og elementære matricer:

$$\begin{aligned}\underline{\underline{M}}_i(c) &= \underline{\underline{E}} + (c - 1)\underline{\underline{I}}_{i,i} \\ \underline{\underline{B}}_{ij} &= \underline{\underline{E}} - \underline{\underline{I}}_{i,i} - \underline{\underline{I}}_{j,j} + \underline{\underline{I}}_{i,j} + \underline{\underline{I}}_{j,i} \\ \underline{\underline{S}}_{ij}(c) &= \underline{\underline{E}} + c\underline{\underline{I}}_{i,j}\end{aligned}$$

Disse operationsmatricer bruges ved at multiplicere operationsmatricen  $\underline{\underline{P}}$  (som er en af typerne M, S eller B) med matricen  $\underline{\underline{A}}$ . Dette udtrykkes også ved følgende sætning:

Lad  $\underline{\underline{A}}$  være en  $m \times n$ -matrix. Hvis  $\underline{\underline{A}}$  ved rækkeoperationen  $P$  (som er en af de tre fornævnte typer) omdannes til  $\underline{\underline{B}} = P(\underline{\underline{A}})$ , da er  $\underline{\underline{B}} = \underline{\underline{P}} \underline{\underline{A}}$ , hvor  $\underline{\underline{P}}$  er den til  $P$  svarende operationsmatrix (som er  $m \times m$ ).

Ligeledes kan dette gøres flere gange:

Lad  $\underline{\underline{A}}$  være en  $m \times n$ -matrix. Hvis  $\underline{\underline{A}}$  ved successive rækkeoperationer  $P_1, \dots, P_k$  omdannes til  $\underline{\underline{B}}$ , da er  $\underline{\underline{B}} = \underline{\underline{P}}_k \cdots \underline{\underline{P}}_1 \underline{\underline{A}}$ , hvor  $\underline{\underline{P}}_k, \dots, \underline{\underline{P}}_1$  er de tilsvarende operationsmatricer (alle  $m \times m$ ).

De omvendte rækkeoperationer fås ved at invertere operationsmatricerne, og er givet ved:

- $\underline{\underline{M}}_i(c)^{-1} = \underline{\underline{M}}_i(\frac{1}{c})$
- $\underline{\underline{B}}_{ij}^{-1} = \underline{\underline{B}}_{ij}$
- $\underline{\underline{S}}_{ij}(c)^{-1} = \underline{\underline{S}}_{ij}(-c)$

Operationsmatricerne for søjleoperationer er de transponerede operationsmatricer for rækkeoperationerne (ligesom sidste kapitel). Hvis  $M_i(c)^s$  betegner søjleoperationen af type M, og  $\underline{\underline{M}}_i(c)^s$  betegner den tilhørende matrix (og ligeledes for de to andre typer), da er operationsmatricerne lig:

- Type M:  $\underline{\underline{M}}_i(c)^s = \underline{\underline{M}}_i(c)^t = \underline{\underline{M}}_i(c)$
- Type B:  $\underline{\underline{B}}_{ij}^s = \underline{\underline{B}}_{ij}^t = \underline{\underline{B}}_{ij}$
- Type S:  $\underline{\underline{S}}_{ij}(c)^s = \underline{\underline{S}}_{ij}(c)^t = \underline{\underline{S}}_{ji}(c)$

For søjleoperationer gælder det samme som ved rækkeoperationer:

Lad  $\underline{\underline{A}}$  være en  $m \times n$ -matrix. Hvis  $\underline{\underline{A}}$  ved successive søjleoperationer  $Q_1, \dots, Q_k$  omdannes til  $\underline{\underline{B}}$ , da er  $\underline{\underline{B}} = \underline{\underline{Q}}_k \cdots \underline{\underline{Q}}_1 \underline{\underline{A}}$ , hvor  $\underline{\underline{Q}}_k, \dots, \underline{\underline{Q}}_1$  er de tilsvarende operationsmatricer (alle  $n \times n$ ).

### 3.6 Trappematricer

Lad  $\underline{\underline{A}} = (a_{ij})_{m,n}$  være en  $m \times n$ -matrix.

Matricen  $\underline{\underline{A}}$  kaldes en **trin-1** matrix, hvis den har formen:

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & a & \star & \dots & \star \\ 0 & & 0 & \star & & & \star \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \star & \dots & \star \end{pmatrix} \quad (27)$$

hvor  $a \neq 0$  og  $\star$  betyder, at disse indgange kan have vilkårlige værdier. Tallet  $a$  kaldes matricens første trin. Positionen  $(i, j)$  for de første trin i en trin-1 matrix er  $(1, j_1)$  for  $1 \leq j_1 \leq n$ . Matricen  $\underline{\underline{A}}_1$ , kaldet **restmatricen for trin-1 matricen  $\underline{\underline{A}}$** , fremkommer ved at slette den første række af  $\underline{\underline{A}}$ . Hvis restmatricen  $\underline{\underline{A}}_1$  også er en trin-1 matrix, kaldes  $\underline{\underline{A}}$  for en **trin-2** matrix. I givet fald kaldes **første trin i  $\underline{\underline{A}}_1$**  for **andet trin i  $\underline{\underline{A}}$** . Positionen af andet trin i en trin-2 matrix er  $(2, j_2)$ ,  $j_1 < j_2 \leq n$ . Restmatricen  $\underline{\underline{A}}_2$  for trin-1 matricen  $\underline{\underline{A}}_1$  kaldes også restmatricen for trin-2 matricen  $\underline{\underline{A}}$ . Ligeledes defineres trin-3, trin-4 og så videre.

Matricen  $\underline{\underline{A}}$  kaldes en **trappematrix**, hvis den er en trin- $d$  matrix for et  $d = 1, 2, 3, \dots$ , og hvis dens restmatrix enten er *tom* eller en nulmatrix.

Hvis  $\underline{\underline{A}}$  er en trappematrix kaldes tallene  $j_1 < \dots < j_d$  for **trinpositionerne** for  $\underline{\underline{A}}$ .

Nulmatricen  $\underline{\underline{0}}$  defineres til at være en trappematrix.

En **reduceret trappematrix** er en trappematrix hvor alle trinnene har værdien 1, og hvor der både er 0 *over* og *under* trinnet (til forskel fra almindelige, hvor der kun er 0 *under* trinnet)

Antallet af trin  $d$  i en  $m \times n$ -trappematrix er altid mindre end, eller lig antallet af søjler og rækker. I tilfældet hvor  $m = d$  er den sidste række ikke en nulrække. I tilfældet  $d = n$  er  $j_1 = 1, j_2 = 2, \dots, j_d = n = d$

For at afgøre om en matrix er en trin-1 matrix, skal den første søjle, der ikke er en nulmatrix, findes. Har denne formen:  $\begin{pmatrix} a \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$  er matricen en trin-1 matrix.

For så at afgøre om det er en trin-2 matrix undersøges restmatricen på samme måde. Dette fortsættes, og hvis man ender med en tom matrix eller nulmatrix er den givne matrix en trappematrix.

Enhver  $m \times n$ -matrix kan ved hjælp af rækkeoperationer omdannes til en trappematrix, og videre til en reduceret trappematrix.

### 3.7 Regulære matricer og matrixinversion

Definitionen på en regulær  $n \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  er at ligningen  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{Y}}$  har netop én løsning  $\underline{\underline{X}}$  for hvert valg af  $\underline{\underline{Y}}$ . Dette er ækvivalent med at den tilhørende lineære afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$  er bijektiv (eller injektiv/surjektiv, da disse er ækvivalente).

For regulære  $n \times n$ -matricer gælder også følgende:

- Hvis der foretages en rækkeoperation på en regulær matrix  $\underline{\underline{A}}$ , er den nye matrix  $\underline{\underline{A}'}$  også regulær.
- En  $n \times n$ -trappematrix er regulær hvis den har  $n$  trin.
- En matrix er regulær, hvis den kan overføres i enhedsmatricen ved rækkeoperationer
- Hvis  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  er  $n \times n$ -matricer, og  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}}$  er regulær, da er både  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  regulære.
- hvis  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}} = \underline{\underline{E}}$  da er både  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  regulære og  $\underline{\underline{A}}^{-1} = \underline{\underline{B}}^{-1} = \underline{\underline{A}}$

Og der er følgende opskrift på matrixinversion af en  $n \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$

1. Opskriv totalmatricen  $(\underline{\underline{A}} | \underline{\underline{E}})$
2. Omskriv til en reduceret trappeform  $(\underline{\underline{A}'} | \underline{\underline{B}'})$  ved rækkeoperationer.
3. Hvis  $\underline{\underline{A}'} = \underline{\underline{E}}$  er  $\underline{\underline{A}}$  regulær og  $\underline{\underline{B}'} = \underline{\underline{A}}^{-1}$ .
4. Hvis  $\underline{\underline{A}'} \neq \underline{\underline{E}}$  er  $\underline{\underline{A}}$  ikke regulær.

## 4 Lineære ligningssystemer

Et lineært ligningssystem med  $m$  ligninger og  $n$  ubekendte er en række linjer givet på formen:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned}$$

Et sådan ligningssystem kan også beskrives ved matricer. Matricen

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (28)$$

kaldes for **koefficientmatricen** og tilføjes søjlematricen

$$\underline{\underline{B}} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}, \quad (29)$$

kaldet ligningssystemets **konstantsgjøle**, efter søjlerne i  $\underline{\underline{A}}$  fås blokmatricen  $\underline{\underline{C}} = (\underline{\underline{A}} \quad \underline{\underline{B}})$ . Denne kaldes for ligningssystemets **totalmatrix**, og har formen:

$$\underline{\underline{C}} = \left( \begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & b_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & b_m \end{array} \right), \quad (30)$$

der er en  $m \times (n + 1)$ -matrix, og hvor den lodrette linje er tilføjet for overskue-lighed. Sættes

$$\underline{\underline{X}} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (31)$$

kan ligningssystemet skrives som

$$\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{B}} \quad (32)$$

### 4.1 Løsning af lineære ligningssystemer

For at løse et lineært ligningssystem på matrixform, bruges Gauss-elimination, der består i at bruge rækkeoperationer for at omdanne totalmatrixen til en trappematrix.

#### 4.1.1 Matrix til trappematrix (Gauss-elimination)

For at omdanne en matrix til en trappematrix findes den første søjle, der ikke er en nuløjle. Denne omdannes ved rækkeoperationer til at have nuller i denne søjle, ud over første position. Herved er en trin-1 matrix opnået. Restmatricen behandles nu på samme måde, så en trin-2 matrix opnås. Dette gentages for en trin-3 matrix og så videre, indtil der nås en trappematrix.

Nogle gange bruges Gauss-Jordan elimination, hvor trappematricen omdannes til en reduceret trappematrix:

#### 4.1.2 Trappematrix til reduceret trappematrix (Gauss-Jordan elimination)

For at gå fra en trappematrix til en reduceret trappematrix arbejdes der nedefra og op: Det sidste trin multipliceres med  $1/a$ , så værdien af trinnet bliver 1. Herefter trækkes denne række fra de øvre rækker, så den sidste søjle bliver til en enhedssøjlematrix (altså at der er 0 over og under trinnet). Herefter gøres det samme for andet trin og den tilhørende søjle, og så fremdeles.

Selve løsningsmetoden kan opsummeres i følgende opskrift

#### 4.1.3 Opskrift på løsning af lineære ligningssystemer

1. Opskriv blokmatricen  $\underline{\underline{C}} = (\underline{\underline{A}} \quad \underline{\underline{B}})$
2. Omdan ved hjælp af rækkeoperationer  $\underline{\underline{C}}$  til en trappematrix

$$\underline{\underline{C}}' = (\underline{\underline{A}}' \quad \underline{\underline{B}}')$$

3. Hvis der er trin i sidste søjle af  $\underline{\underline{C}}'$  er der *ingen* løsning
4. Hvis der ikke er trin i sidste søjle, og antallet af trin i  $\underline{\underline{C}}'$  er lig antallet af søjler i  $\underline{\underline{A}}$ , er der en entydig løsning, som findes ved substitution (hvis ikke der er foretaget Gauss-Jordan elimination)
5. Hvis der ikke er trin i sidste søjle, og antallet af trin i  $\underline{\underline{C}}'$  er mindre en antallet af søjler i  $\underline{\underline{A}}$  er der uendeligt mange løsninger. Disse findes ved at sætte de **frie variable** (de variable der *ikke* er i en trinposition) lig parametrene  $t_1, \dots, t_{n-d}$ , hvor  $d$  er antallet af trin. Dernæst udtrykkes variablene  $x_{j1}, \dots, x_{jd}$  svarende til trinpositioner (kaldet ledende variable), ved parametrene  $t_1, \dots, t_{n-d}$ .

Sammenhængen mellem antallet af trin  $d$  i en  $m \times n$ -koefficienttrappematrix  $\underline{\underline{A}}'$  og antallet af søjler/rækker i samme er som følger:

1. hvis  $m > d$  findes der en søjle  $\underline{\underline{B}}$ , så ligningssystemet  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{B}}$  ingen løsning har.
2. hvis  $n > d$  har ligningen  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{0}}$  en løsningsmængde givet ved en parameterfremstilling med  $n - d$  parameter, og ligningen har altså uendeligt mange løsninger.
3. hvis  $m = n = d$  har ligningssystemet  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{B}}$  netop én løsning for hvert valg af  $\underline{\underline{B}}$ .

Og omvendt:

1. Hvis ligningssystemet  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{B}}$  har mindst én løsning for hvert valg af  $\underline{\underline{B}}$ , da er  $d = m$ .
2. Hvis ligningssystemet  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{0}}$  kun har én løsning (nemlig  $\underline{\underline{0}}$ ), da er  $d = n$
3. Hvis ligningssystemet  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{B}}$  har netop én løsning for hvert valg af  $\underline{\underline{B}}$ , da er  $d = m = n$ .

## 4.2 Lineære ligningssystemer og lineære afbildninger

Et ligningssystem af typen  $\underline{\underline{A}} \underline{\underline{X}} = \underline{\underline{B}}$  kan også beskrives ved lineære afbildninger. Hvis vi lader  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$  være den lineære afbildung, der hører til  $\underline{\underline{A}}$ , sætter  $x = \underline{\underline{X}}$ ,  $b = \underline{\underline{B}}$ , så bliver ligningssystemet

$$f(x) = b \quad (33)$$

For lineære afbildninger gælder følgende om injektivitet:

- En lineær afbildung  $f$  er injektiv når ligningen  $f(\underline{x}) = \underline{0}$  kun har løsningen  $\underline{x} = \underline{0}$

Og følgende gælder om dimensionerne for en lineær afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^m$ :

1. Hvis  $f$  er surjektiv er  $m \leq n$
2. Hvis  $f$  er injektiv er  $m \geq n$
3. Hvis  $f$  er bijektiv er  $m = n$

Og hvis  $m = n$  gælder følgende: for en lineær afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$  er surjektiv, injektiv og bijektiv ækvivalente, og hvis en afbildung dermed er det ene, så er den også de andre.

## 4.3 Løsning med determinanter (Cramers formler)

For et regulært/bijektivt ligningssystem med  $n$  ligninger og  $n$  ubekendte fås følgende udtryk for de ubekendte, kaldet Cramers formler

$$x_j = \frac{\begin{array}{c} j \\ \downarrow \\ \left| \begin{array}{cccc} a_{11} & \dots & b_1 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & b_n & \dots & a_{nn} \end{array} \right| \end{array}}{\det(\underline{\underline{A}})}, j = 1, \dots, n \quad (34)$$

Hvor den øverste determinant er matricen  $\underline{\underline{A}}$ , hvor den  $j$ 'te søje er udskiftet med konstantssøjlen  $\underline{b}$ . Eksempelvis er  $x_3$  til  $n = 3$ :

$$x_3 = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{31} \\ a_{21} & a_{22} & a_{32} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}} \quad (35)$$

## 5 Determinanter

En determinant er et tal, der knyttes til enhver kvadratisk matrix. Notationen er som følger. For en  $n \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  er determinanten  $\det(\underline{\underline{A}})$  skrevet som:

$$\det(\underline{\underline{A}}) = |\underline{\underline{A}}| \quad (36)$$

Determinanten for en  $n \times n$ -matrix har  $n!$  led, hver med  $n$  faktorer.

### 5.1 Determinanter for $2 \times 2$ og $3 \times 3$ matricer

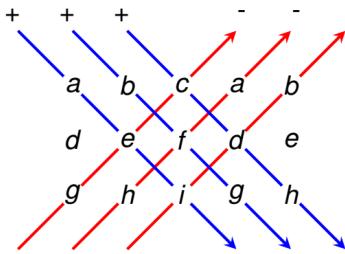
For en  $2 \times 2$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  er determinanten

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad \det(\underline{\underline{A}}) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

Og for  $3 \times 3$ -matricen  $\underline{\underline{A}}$  er determinanten

$$\begin{aligned} \underline{\underline{A}} &= \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & g & i \end{pmatrix}, \quad \det(\underline{\underline{A}}) = |\underline{\underline{A}}| = \begin{vmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & g & i \end{vmatrix} \\ |\underline{\underline{A}}| &= aei + bfg + cdh - gec - hfa - idb \end{aligned}$$

Denne kan også findes ved hjælp af pilereglen, hvor værdierne skrives op, og de to første søjler skrives igen, denne gang efter den sidste søjle.



De tre første pile lægges til, og de tre sidste pile trækkes da fra.

### 5.2 Determinant af $n \times n$ -matrix

Definitionen på en determinant for en  $n \times n$  matrix  $\underline{\underline{A}}$  er

$$\det \underline{\underline{A}} = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sign}(\sigma) a_{1\sigma(1)} a_{2\sigma(2)} \dots a_{n\sigma(n)} \quad (37)$$

Denne bruges i praksis ikke, da den bruger permutationer, som ikke er en del af pensum.

### 5.2.1 Række/søjle-operationer

For en  $n \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$ , hvor matricen  $\underline{\underline{B}}$  fremkommer ved en række- eller søjleoperation på  $\underline{\underline{A}}$  gælder følgende:

- Type M (multiplikation med skalar  $c$ ):  $\det \underline{\underline{B}} = c \det \underline{\underline{A}}$
- Type B (ombytning af to rækker/søjler):  $\det \underline{\underline{B}} = -\det \underline{\underline{A}}$
- Type S (addering af række/søjle, multipliceret med skalar  $c$ , til en anden række/søjle):  $\det \underline{\underline{B}} = \det \underline{\underline{A}}$

### 5.2.2 Udvikling af determinant

Udviklingen af en determinant for matricen  $\underline{\underline{A}}$  er givet ved

$$\begin{aligned} \det \underline{\underline{A}} &= a_{11}A_{11} + \cdots + a_{in}A_{in} = (-1)^{i+1}a_{1i} \det \underline{\underline{A}}_{11} + \cdots + (-1)^{i+n}a_{in} \det \underline{\underline{A}}_{in} \\ &= a_{1i}A_{1i} + \cdots + a_{ni}A_{ni} = (-1)^{1+i}a_{1i} \det \underline{\underline{A}}_{1i} + \cdots + (-1)^{n+i}a_{ni} \det \underline{\underline{A}}_{ni} \end{aligned}$$

Hvor  $1 \leq i \leq n$  og hvor  $\underline{\underline{A}}_{ij}$  er den  $n-1 \times n-1$ -matrix der fremkommer ved at slette den  $i$ -te række og den  $j$ -te søjle.  $A_{ij}$  kaldes for *komplementet* til  $a_{ij}$  og er givet ved  $A_{ij} = (-1)^{i+j} \det \underline{\underline{A}}_{ij}$ .

Denne metode kaldes for udviklingen af den  $i$ -te række (første linje) eller  $i$ -te søjle (anden linje)

### 5.2.3 Opskrift på beregning determinant

For at udregne determinanten  $\det \underline{\underline{A}}$  bruger man i praksis følgende opskrift

1. Lav række/søjleoperationer på  $\det \underline{\underline{A}}$ , så der kommer flere 0'er i en række eller søjle (og hold øje med, om determinantens værdi ændres, hvis der for eksempel bruges operationer af typen M eller B)
2. Uregn den nye determinant ved brug af udvikling af determinanten efter en række eller søjle, der har mange 0'er.

Man kan godt komme ud for at skulle bruge denne opskrift flere gange, før den endelige værdi er fundet.

## 5.3 Egenskaber ved determinanter

Determinanter har følgende egenskaber

- $\det(\underline{\underline{A}}) = \det(\underline{\underline{A}}^t)$
- For en trekantsmatrix (**øvre**, såvel som **nedre**, og **diagonalmatricer**) er  $\det(\underline{\underline{A}})$  lig produktet af diagonalelementerne.
- for to  $n \times n$ -matricer  $\underline{\underline{A}}$  og  $\underline{\underline{B}}$  gælder:  $\det(\underline{\underline{A}} \underline{\underline{B}}) = \det \underline{\underline{A}} \det \underline{\underline{B}}$
- En  $n \times n$  matrix er **regulær**, hvis  $\det \underline{\underline{A}} \neq 0$
- For en regulær matrix gælder:  $\det(\underline{\underline{A}}^{-1}) = \frac{1}{\det \underline{\underline{A}}}$

## 5.4 Invers matrix og determinant

For en  $n \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  forstås **komplementet** til indgangen  $a_{ij}$  som

$$A_{ij} = \left| \begin{array}{cccc|c} a_{11} & \dots & 0 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & 0 & \dots & a_{nn} \end{array} \right| \leftarrow i \quad (38)$$

$\uparrow$   
 $j$

Denne kan også udregnes ved

$$A_{ij} = A_{ij} = (-1)^{i+j} \det \underline{\underline{A}}_{ij} \quad (39)$$

hvor  $\underline{\underline{A}}_{ij}$  er den  $(n-1) \times (n-1)$ -matrix, der fremkommer ved at slette den  $i$ -te række og den  $j$ -te søjle i  $\underline{\underline{A}}$ .

**Komplementmatricen**  $K(\underline{\underline{A}})$  er

$$K(\underline{\underline{A}}) = \begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix} \quad (40)$$

Og for denne gælder

$$\underline{\underline{A}} K(\underline{\underline{A}})^t = (\det \underline{\underline{A}}) \underline{\underline{E}} \quad (41)$$

For en regulær matrix  $\underline{\underline{A}}$  gælder

$$\underline{\underline{A}}^{-1}[i, j] = \frac{A_{ji}}{\det \underline{\underline{A}}} = \frac{(-1)^{i+j} \det \underline{\underline{A}}_{ji}}{\det \underline{\underline{A}}} \quad (42)$$

Den inverse matrix er altså givet på formen:

$$\underline{\underline{A}}^{-1} = \frac{1}{\det \underline{\underline{A}}} K(\underline{\underline{A}})^t \quad (43)$$

## 6 Vektorrum

### 6.1 Definition

Et vektorrum er en mængde  $V$ , hvori der er givet to operationer: addition af to elementer og multiplikation med en skalar. For  $\underline{x}, \underline{y} \in V$  og  $\lambda \in \mathbb{F}$  gælder

$$\lambda \underline{x} \in V, \quad \underline{x} + \underline{y} \in V \quad (44)$$

Ud fra disse fås (som ved regneregler for vektorer og matricer):

$$V1: (\underline{x} + \underline{y}) + \underline{z} = \underline{x} + (\underline{y} + \underline{z})$$

$$V2: \underline{x} + \underline{o} = \underline{x}$$

$$V3: \underline{x} + (-\underline{x}) = \underline{o}$$

$$V4: \underline{x} + \underline{y} = \underline{y} + \underline{x}$$

$$V5: \lambda(\underline{x} + \underline{y}) = \lambda\underline{x} + \lambda\underline{y}$$

$$V6: (\lambda + \mu)\underline{x} = \lambda\underline{x} + \mu\underline{x}$$

$$V7: (\lambda\mu)\underline{x} = \lambda(\mu\underline{x})$$

$$V8: 1\underline{x} = \underline{x}$$

Vi definerer  $\mathbb{F}^0 = \{0\}$ , altså at denne mængde kun indeholder nul-vektoren. Vi siger også at  $V$  er defineret over talrummet  $\mathbb{F}$ . Talrummene  $\mathbb{F}^n, n \in \mathbb{N}_0$  er vektorrum over  $\mathbb{F}$ . Hvis  $\mathbb{F} = \mathbb{R}$  kaldes vektorrummet reelt, og hvis  $\mathbb{F} = \mathbb{C}$  kaldes vektorrummet komplekst.  $\mathbb{M}_{m,n}(\mathbb{F})$  er mængden af  $m \times n$ -matricer med indgange i  $\mathbb{F}$ , og er ligeledes et vektorrum.  $\text{Pol}(\mathbb{F})$  er mængden af polynomier med én variabel og koefficienter i  $\mathbb{F}$ . Altså polynomier på formen

$$p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n, \quad x \in \mathbb{F} \quad (45)$$

### 6.2 Lineære afbildninger og isomorfi

Vi kalder  $f$  en lineær afbildung fra  $U$  til  $V$ , hvis linearitetsbetingelserne er opfyldt:

$$L1: f(\lambda\underline{x}) = \lambda f(\underline{x}) \text{ for alle } \underline{x} \in U, \lambda \in \mathbb{F}$$

$$L2: f(\underline{x} + \underline{y}) = f(\underline{x}) + f(\underline{y}) \text{ for alle } \underline{x}, \underline{y} \in U$$

En lineær afbildung kaldes også for en *homomorfi*, og der gælder, at hvis  $f: W \rightarrow V$  og  $g: U \rightarrow W$  er lineære afbildninger, da er  $f \circ g: U \rightarrow V$  også lineær.

For en afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow V$  givet ved

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = x_1 \underline{a}_1 + \cdots + x_n \underline{a}_n \quad (46)$$

hvor  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  er vektorer i  $V$ , er denne lineær, og alle lineære afbildninger  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow V$  har denne form. Yderligere gælder at  $\underline{a}_j = f(\underline{e}_j)$ .

En bijektiv, lineær afbildung  $f: U \rightarrow V$  kaldes for en **isomorfi** fra  $U$  til  $V$ , og de to vektorrum  $U$  og  $V$  kaldes **isomorfe**, hvis der finde blot én isomorfi fra  $U$  til  $V$ . For isomorfier gælder:

- Den identiske afbildung  $\text{id}_U: U \rightarrow U$  er en isomorfi
- Hvis  $f: U \rightarrow V$  er en isomorfi gælder at  $f^{-1}: V \rightarrow U$  er en isomorfi
- Hvis  $f: W \rightarrow V$  og  $g: U \rightarrow W$  er isomorfier, da er  $f \circ g: U \rightarrow V$  en isomorfi.

### 6.3 Endeligdimensionalitet, basis, underrum, span, kerne

Et vektorrum kaldes **endeligtdimensionalt**, hvis det er isomorft med et talrum  $\mathbb{F}^n$ ,  $n \in \mathbb{N}_0$ . Dimensionen  $\dim V$  defineres da til at være  $n$ . Og hvis  $\mathbb{F}^m$  er isomorft med  $\mathbb{F}^n$ , da er  $m = n$ .

En **basis** for et vektorrum  $V$  er et ordnet sæt vektorer,  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ , hvor hver vektor  $\underline{a}$  i  $V$  kan skrives som en linearkombination af basisvektorerne:

$$\underline{a} = x_1 \underline{a}_1 + \dots + x_n \underline{a}_n \quad (47)$$

Basen betegnes  $\mathcal{A} = (\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)$  og koordinaterne  $x_1, \dots, x_n$  for vektoren  $\underline{a}$  med *hensyn til*  $\mathcal{A}$ , betegnes  $\mathcal{A}[\underline{a}] = (x_1, \dots, x_n)$ . Bemærk, at den  $j$ 'te basisvektors  $(\underline{a}_j)$  koordinater i basen  $\mathcal{A}$  er den  $j$ 'te standardenhedsvektor, altså  $\mathcal{A}[\underline{a}_j] = \underline{e}_j$ .

- Den lineære afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow V$  givet ved

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = x_1 \underline{a}_1 + \dots + x_n \underline{a}_n \quad (48)$$

er en isomorf, hvis  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  er en basis.

- Et vektorrum  $V \neq \{\underline{o}\}$  har en basis, netop hvis det er endeligtdimensionalt. I så fald indeholder enhver basis for  $V$  netop  $\dim V$  elementer.
- et sæt  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  af  $n$  vektorer i  $\mathbb{F}^n$  er en basis hvis  $n \times n$ -matricen  $\underline{\underline{A}} = (\underline{a}_1 \dots \underline{a}_n)$  er regulær
- For en lineær afbildung  $f: U \rightarrow V$  hvor  $\dim U = \dim V$  er følgende tre udsagn ækvivalente:  $f$  er surjektiv, injektiv og bijektiv.

En ikke-tom delmængde  $U \subseteq V$  kaldes for et **underrum**, hvis følgende to betingelser er opfyldt:

U1: Hvis  $\underline{x} \in U$ ,  $\lambda \in \mathbb{F}$  gælder  $\lambda \underline{x} \in U$ .

U2: Hvis  $\underline{x}, \underline{y} \in U$  gælder  $\underline{x} + \underline{y} \in U$ .

Nulvektoren  $\underline{o}$  er da altid i et underrum, og et underrum kaldes stabilt ved vektoroperationerne, hvis U1 og U2 er opfyldt. V1-V8 gælder da også for underrum, da disse i sig selv er vektorrum. Ligeledes kan der bestemmes dimension og baser af  $U$ .  $V$  og  $\{\underline{o}\}$  kaldes for *trivielle* underrum af  $V$ .

For en ikke-tom delmængde  $M$  af  $V$  forstås **span** som mængden af alle linearkombinationer af vektorer i  $M$ . Dette betegnes  $\text{span } M$ . Hvis  $\text{span } M = M$  er  $M$  et underrum.

For en lineær afbildung  $f: U \rightarrow V$  forstås **kernen**  $\ker f$  som mængden

$$\ker f = \{\underline{x} \in U | f(\underline{x}) = \underline{o}\} \quad (49)$$

Og ved **billedet**  $f(U)$  for  $f$  forstås mængden

$$f(U) = \{\underline{y} \in V | \underline{y} = f(\underline{x}) \text{ for et } \underline{x} \in U\} \quad (50)$$

- Kernen  $\ker f$  for den lineære afbildung  $f: U \rightarrow V$  er et underrum i  $U$ .
- Billedet  $f(U)$  af  $U$  ved  $f$  er et underrum i  $V$ .
- Den lineære afbildung  $f$  er injektiv når  $\ker f = \underline{o}$ .
- Hvis den lineære afbildung er givet ved matricen  $\underline{\underline{A}}$ , er billedet  $f(U) = \text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}$

## 6.4 Lineær (u)afhængighed

Et sæt vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  i  $V$  kaldes **lineært uafhængige**, hvis ligningen

$$x_1\underline{a}_1 + \dots + x_n\underline{a}_n = \underline{o} \quad (51)$$

kun har løsningen  $(x_1, \dots, x_n) = (0, \dots, 0)$ . Ellers kaldes sættet **lineært afhængigt**

- Et sæt af vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  i  $V$  er lineært uafhængige, hvis blot én vektor kan skrives som en linearkombination af de andre.
- $\{\underline{a}_1\}$  er lineært uafhængig, hvis  $\underline{a}_1 \neq \underline{o}$ .
- $\{\underline{a}_1, \underline{a}_2\}$  er lineært uafhængig, hvis  $\underline{a}_1 \neq \lambda \underline{a}_2$ .
- Et sæt af vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  i  $V$  er lineært uafhængige, hvis den lineære afbildung  $f: \mathbb{F}^n \rightarrow V$ , givet ved linearkombinationen af  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ , er injektiv.
- Et sæt af vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  i  $V$  er lineært uafhængige, hvis de udgør en basis for  $\text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}$ .
- For et endeligtdimensionalt vektorrum  $V$ , med et sæt lineært uafhængige vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ . Da er  $n \leq \dim V$ , og  $n = \dim V$  når  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  er en basis for  $V$ .
- For et endeligtdimensionalt vektorrum  $V$ , med et sæt vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ , der frembringer  $V$ ; er  $n \geq \dim V$  og hvis  $n = \dim V$  er  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  en basis for  $V$ .
- Et sæt lineært uafhængige vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  i  $V$  og en yderligere vektor  $\underline{a}_{n+1}$  er lineært afhængige, hvis  $\underline{a}_{n+1} \in \text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}$ .

Ved et **maksimalt lineært uafhængige** sæt vektorer forstås et sæt lineært uafhængige vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n \in M \subseteq V$ , der ikke kan udvides til et større lineært uafhængigt sæt  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n, \underline{a}_{n+1} \in M$ .

- Ethvert lineært uafhængigt sæt vektorer i  $M$  (der er en delmængde af det endeligdimensionale vektorrum  $V$ ) kan udvides til et maksimalt lineært uafhængigt sæt af vektorer fra  $M$ .
- Ethvert maksimalt lineært uafhængigt sæt vektorer fra  $M$  (delsmængde af e.dim rum  $V$ ) udgør en basis for span  $M$ .
- Et underrum  $U$  af et endeligdimensionalt vektorrum  $V$  er endeligdimensionalt, og  $\dim U \leq \dim V$ .
- Et lineært uafhængigt sæt vektorer i det e.dim rum  $V$  kan udvides til en basis for  $V$ .

## 6.5 Uddyndings-/udvidelsesalgoritmen

Uddyndingsalgoritmen er en måde at reducere et sæt lineært afhængige vektorer til et sæt lineært uafhængige vektorer, mens udvidelsesalgoritmen er en metode til at udvide et sæt lineært uafhængige vektorer til et sæt maksimalt lineært uafhængige vektorer, og dermed en basis for et vektorrum. Givet et sæt vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n \in \mathbb{F}^m$ , der enten er lineært uafhængige (udvidelsesalgoritmen) eller lineært afhængige (uddydningsalgoritmen) er algoritmerne som følger:

### Uddyndingsalgoritmen

1. Lav matricen  $\underline{\underline{A}} = (\underline{a}_1 \ \dots \ \underline{a}_n)$ , der altså har de givne vektorer som søjler.
2. Rækkereducer  $\underline{\underline{A}}$  til en trappematrix  $\underline{\underline{B}}$
3. Vælg de søjler i  $\underline{\underline{A}}$ , hvor der er trinpositioner i  $\underline{\underline{B}}$  (eksempelvis: trin i  $\underline{\underline{B}}$ , i søjle 1, 2 og 4  $\rightarrow \underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_4$  er lineært uafhængige, og udgør en basis for  $\text{span}\{\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_4\}$ ).

### Udvidelsesalgoritmen

1. Lav matricen  $\underline{\underline{A}} = (\underline{a}_1 \ \dots \ \underline{a}_n \ \underline{\underline{E}})$ , der har sættet af lineært uafhængige vektorer som de første  $n$  søjler, og  $m \times m$ -enhedsmatricen  $\underline{\underline{E}}$  som de næste søjler.
2. Reducer  $\underline{\underline{A}}$  til trappematricen  $\underline{\underline{B}}$ .
3. Vælg de søjler i  $\underline{\underline{A}}$ , hvor der er trinpositioner i  $\underline{\underline{B}}$ . De valgte søjlevекторer ( $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ , samt et sæt af standardenhedsvektorerne) udgør da en basis for  $\mathbb{F}^m$

## 6.6 Rang og dimensionssætningen

For to endeligdimensionale vektorrum  $U$  og  $V$  forstås **rangen**  $\text{rg } f$  af en lineær afbildung  $f: U \rightarrow V$  som dimensionen af billedrummet  $f(U)$ :

$$\text{rg } f = \dim f(U) \quad (52)$$

Og ved rangen  $\text{rg } \underline{\underline{A}}$  af en  $m \times n$ -matrix  $\underline{\underline{A}}$  forstås rangen af den til  $\underline{\underline{A}}$  hørende afbildung  $f: \mathbb{F}^m \rightarrow \mathbb{F}^n$

$$\text{rg } \underline{\underline{A}} = \dim(\text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}) \quad (53)$$

### Dimensionssætningen

For en lineær afbildung  $f: U \rightarrow V$  gælder

$$\text{rg } f + \dim(\ker f) = \dim U \quad (54)$$

### Egenskaber for rang

- Rangen af  $m \times n$ -matricen  $\underline{\underline{A}} = (\underline{a}_1 \dots \underline{a}_n)$  er lig antallet af vektorer i et maksimalt lineært uafhængigt sæt af vektorer fra  $\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}$
- Rangen af en trappematrix  $\underline{\underline{A}}$  er lig antallet af trin i denne.
- Rangen af en matrix ændres ikke ved udførelse af række-/søjle-operationer
- Rangen af en matrix er den samme som rangen af dens transponerede matrix:  $\text{rg } \underline{\underline{A}} = \text{rg } \underline{\underline{A}}^t$

## 7 Skalarprodukt og ortonormalbaser

Skalarprodukt er en måde at knytte et tal til hvert par vektorer i et vektorrum  $V$ . For to vektorer  $\underline{x}, \underline{y} \in V$  skrives skalarproduktet  $\underline{x} \cdot \underline{y}$ . Regneregler for skalarprodukt i  $V$  over  $\mathbb{F}$  er som følger:

$$S1: (\underline{x} + \underline{y}) \cdot \underline{z} = \underline{x} \cdot \underline{z} + \underline{y} \cdot \underline{z}$$

$$S2: (\lambda \underline{x}) \cdot \underline{y} = \lambda(\underline{x} \cdot \underline{y})$$

$$S3: \underline{x} \cdot \underline{y} = \overline{\underline{y} \cdot \underline{x}}$$

$$S4: \underline{x} \cdot \underline{x} \geq 0$$

$$S5: \underline{x} \cdot \underline{x} = 0 \Rightarrow \underline{x} = \underline{o}$$

Et vektorrum der er udstyret med skalarprodukt kaldes for et *indre produkt rum*, og hvis  $\mathbb{F} = \mathbb{R}$  kaldes det for et *euklidisk rum*.

Hvis to vektorer  $\underline{x}, \underline{y}$  har koordinaterne  $(\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n)$  og  $(\underline{y}_1, \dots, \underline{y}_n)$  i en ortonormalbasis (**specielt i  $\mathbb{F}^n$  kaldes dette for sædvanligt skalarprodukt**), regnes skalarproduktet ved

$$\underline{x} \cdot \underline{y} = \sum_{i=1}^n x_i \overline{y_i} \quad (55)$$

### Længden af vektor og normering

- Længden af en vektor  $\underline{x}$  er  $|\underline{x}| = \sqrt{\underline{x} \cdot \underline{x}}$
- Der gælder  $|\lambda \underline{x}| = |\lambda| |\underline{x}|$ , hvor  $|\lambda| = \sqrt{\lambda \bar{\lambda}}$
- Hvis  $|\underline{x}| = 1$  kaldes vektoren for en enhedsvektor
- En vektor  $\underline{y} = \frac{1}{|\underline{x}|} \underline{x}$  er en enhedsvektor, fremstillet ved normering af  $|\underline{x}|$
- Normering er at dividere en vektor med sin længde.
- For  $\mathbb{R}^n$  er  $\underline{x} \cdot \underline{y} = \cos(\theta) |\underline{x}| |\underline{y}|$ . Eller, cos til vinklen mellem to vektorer er  $\cos \theta = \frac{\underline{x} \cdot \underline{y}}{|\underline{x}| |\underline{y}|}$
- Cauchy-Schwarz's ulighed:  $|\underline{x} \cdot \underline{y}| \leq |\underline{x}| |\underline{y}|$
- Trekantsuligheden:  $|\underline{x} + \underline{y}| \leq |\underline{x}| + |\underline{y}|$

### Ortogonal-/ortonormalsæt og skalarprodukter

- To vektorer siges at være ortogonale, hvis  $\underline{x} \cdot \underline{y} = 0$ . Dettes skrives også som  $\underline{x} \perp \underline{y}$
- Et sæt vektorer  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  i  $V$  kaldes for et ortogonalsæt, hvis hver vektor er forskellig fra nulvektoren og deres indbyrdes skalarprodukter alle er lig 0. Altså  $\underline{a}_i \neq \underline{o}$ ,  $1 \leq i \leq n$  og  $\underline{a}_i \cdot \underline{a}_j \neq 0$ , for  $1 \leq i, j \leq n$ .
- Et ortogonalsæt, hvor  $|\underline{a}_i| = 1$ ,  $1 \leq i \leq n$  kaldes for et ortonormalsæt. Et ortogonalsæt (og ortonormalsæt) er altid lineært uafhængigt.

En basis  $\mathcal{A} = (\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)$  kaldes en ortonormalbasis, hvis sættet  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  er et ortonormalsæt og altså  $\underline{a}_i \cdot \underline{a}_i = 1$ ,  $\underline{a}_i \cdot \underline{a}_j = 0$ ,  $i \neq j$ . **Ethvert endeligtdimensionalt indre produkt vektorrum  $V$  har en ortonormalbasis (sætning 7.1.10).** Koordinaterne for en vektor  $\underline{x}$  i denne base er givet ved

$$\mathcal{A}[\underline{x}] = \begin{pmatrix} \underline{x} \cdot \underline{a}_1 \\ \vdots \\ \underline{x} \cdot \underline{a}_n \end{pmatrix} \quad (56)$$

Egenskaber ved ortogonalsæt  $(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)$ :

- For  $\underline{a} \in \text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}$  gælder:  $\underline{a} = \sum_{i=1}^n \frac{\underline{a} \cdot \underline{a}_i}{\underline{a}_i \cdot \underline{a}_i} \underline{a}_i$
- for  $\underline{b} \in V$  sættes  $\underline{a}_{n+1} = \underline{b} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{\underline{b} \cdot \underline{a}_i}{\underline{a}_i \cdot \underline{a}_i} \underline{a}_i \right)$ 
  - Hvis er  $\underline{a}_{n+1} \neq \underline{0}$ , er sættet  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n, \underline{b}$  lineært uafhængigt, og  $\underline{a}_{n+1}$  er ortogonalt på  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$
  - er  $\text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n, \underline{b}\} = \text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n, \underline{a}_{n+1}\}$

## 7.1 Gram-Schmidt ortogonalisering

Egenskaberne for ortogonalsæt giver anledning til følgende opskrift på, hvordan man danner en ortonormal basis for et underrum  $U$ .

**Opskrift:** Lad sættet  $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$  i  $V$  være lineært uafhængige, og lad  $U = \text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}$ .

1. Lad  $\underline{b}_1 = \underline{a}_1$
2. for  $k = 1, \dots, n-1$  lad

$$\underline{b}_{k+1} = \underline{a}_{k+1} - \left( \sum_{i=1}^k \frac{\underline{a}_{k+1} \cdot \underline{b}_i}{\underline{b}_i \cdot \underline{b}_i} \underline{b}_i \right) \quad (57)$$

da er  $(\underline{b}_1, \dots, \underline{b}_n)$  en basis for  $U$  bestående af ortogonale vektorer.

3. for  $i = 1, \dots, n$  lad  $\underline{b}'_i = \frac{\underline{b}_i}{\|\underline{b}_i\|}$ .

Da er  $(\underline{b}'_1, \dots, \underline{b}'_n)$  en ortonormalbasis for  $U$

Udtrykket  $\frac{\underline{a}_{k+1} \cdot \underline{b}_i}{\underline{b}_i \cdot \underline{b}_i}$  ændres ikke, hvis  $\underline{b}_k$  erstattes af  $c\underline{b}_k$ ,  $c \neq 0$ . Det kan derfor være bekvemt at gøre dette for et passende  $c$  (eksempelvis for at eliminere brøker).

## **8 Koordinattransformationer**