

Bjerknes Centre

for Climate Research



TERMODYNAMIKK OG ØKONOMI

Alastair D. Jenkins

[<alastair.jenkins@bjerknes.uib.no>](mailto:alastair.jenkins@bjerknes.uib.no)





SAMMENDRAG/STIKKORD

- **Termodynamiske konsepter - entropi og uorden**
- **Naturvitenskapelige anvendelser**
- **Anvendelser innen informasjonsteori, samfunnsvitenskap**
- **Statistisk mekanikk, matematiske utledninger og bevis**
- **Systemer som ikke er i likevekt**
- **Maksimum entropiproduksjon**
- **Hva er forutsetningene?**
- **Anvendelser - turbulens, klima, kjemi, biologi**
- **Anvendelser - samfunnsvitenskap, -økonomi**
- **Framtidsutsikter**



TERMODYNAMISKE KONSEPTER

- Bevegelsene av partikler (atomer, molekyler, m.m.) i universet antas å være i henhold til **mekanikkens** lover (Archimedes, Galileo, Newton, Einstein, Heisenberg, ...)
- For systemer med få partikler, f.eks. solsystemet, enkle molekyler, kan man beregne bevegelsene direkte (Lagrange, Poincaré, ...)
- For systemer med mange partikler (galakser, gasser, ...) må man ta i bruk **statistisk mekanikk** (Maxwell, ...), også kalt kinetisk teori.
- Før kinetisk teori ble utviklet, hadde man allerede en teori for **varme**, som oppfylte **termodynamikkens lover**
- Kinetisk teori spesifiserer forholdet mellom **makroskopiske** parametere, f.eks. temperatur og **mikroskopiske** parametere, f.eks. molekylenes hastigheter eller vibrasjoner.



TERMODYNAMIKKENS LOVER

(Carnot, Clausius, Joule, Kelvin, ...)

- 1. Den totale energien (varme- + mekanisk) er bevart**
(Mikroskopisk - den totale energien på alle partikler)
- 3. Det finnes et nullpunkt for temperatur**
(Mikroskopisk/klassisk: hvor alle partikler står i ro)
- 2. Varmen overføres ikke spontant fra lavere til høyere temperatur; eller det eksisterer en tilstandsvariabel "entropi" som alltid øker i et isolert system**
(Mikroskopisk - systemets "uorden" minker aldri)





ENTROPI

- Definert av Rudolph Clausius i 1865:

$$S_B - S_A \geq \int_A^B dQ/T$$

- Ludwig Boltzmann¹ beregnet entropi for en idéell gass (N atomer, volum V , molekylenes posisjoner x_i , bevegelsesmengde p_i , totalenergi $E < \sum p^2/2m < E + dE$)

“fasevolum” $W = \int_R d^3x_1 \dots d^3x_N d^3p_1 \dots d^3p_N = CV^N E^{3N/2-1} dE$

og fikk $S = k \log W$. (k er Boltzmannkonstanten)

¹ E.T. Jaynes “The Evolution of Carnot’s Principle”, foredrag på at EMBO-workshop 1984

STATISTISK MEKANIKK

J. Willard Gibbs gjorde det grunnleggende arbeidet innen statistisk mekanikk. Han viste at et system ville tendere mot et tilstand med maksimum entropi, **under forutsetninger** gitt av totalenergi, sammensetning, osv. Dette er pga. at maksimumentropitilstanden er **den overveldende sannsynligste**.

- Innen **kvantemekanikk** finnes det systemer med **diskrete** tilstand. Da kan man definere entropi som $S = k \log W$, hvor W er antall måter man kan arrangere systemet på (med en bestemt totalenergi).

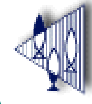
- **Claude Shannon** brukte entropikonseptet innen informasjons- og kommunikasjonsteori. Dette førte til bruk av **maksimalentropimetoder** innen statistisk estimering og dataanalyse.

- I over 100 år har det vært mye debatt om hvordan man håndterer systemer som **ikke er i likevektstilstand**. Boltzmann viste at entropien i en idéell gass må øke med tid, **men hvordan kan dette være, siden bevegelsesligningene er tidssymmetriske?**

- **E.T. Jaynes** studerte systematisk maksimalentropiprinsippet, og mente at for ikke-reversible prosesser skal **entropiproduksjonsraten** være maksimal (igjen **under de gjeldende forutsetningene**).

TURBULENSTEORI

- For turbulent konveksjon er entropiproduksjonen maksimal med maksimal varmeflukt. For turbulent strøming, f.eks. over en plate har man maksimal entropiproduksjon (og energidissipasjon) når den turbulente skjærspenningen er maksimal.
- Siden 1950-årene er det blitt beregnet slike maksimalverdiene for varmeflukt og turbulent skjærspenning ([W.V.R. Malkus](#), [L.N. Howard](#), [F.H. Busse](#), m.m.)
- De gjeldende **forutsetningene** omfatter
 - Minimum Rayleigh-tall for konvektiv ustabilitet;
 - Instabilitetskriteriet for Orr-Sommerfeld-ligningen;
 - Kontinuitetsligningen m.m.
- Eksempel: [Malkus](#), i *J. Fluid Mech.* bind 1 (1956), utledet den velkjente logaritmiske profilen i en turbulent grensesjikt, og estimerte at von Kármán konstant ~ 0.33 .



- **Busse** (1970 J. Fluid Mech.)
beregnet strømninger med maksimal
momentumsfluks på tvers av
strømningsretningen (maksimal
turbulent skjærstrømning)

- **Malkus and Smith** (JFM 1989) obtained quite precise estimates for turbulent channel flow, using a maximum energy dissipation criterion:

GARTH PALTRIDGE

brakte prinsippet for maksimal entropiproduksjon i studier av jordens klima (1975).
Dette arbeidet danner grunnlaget for nyere studier av [H. Ozawa](#), [S. Shimokawa](#),
m.m.

Fra
OZAWA ET AL.
2001
Phys Rev. E

**From SHIMOKAWA & OZAWA (QJ RMS 2002) - Studies of
thermohaline circulation by numerical experiments**

**From SHIMOKAWA
& OZAWA
(QJRMS 2002)**

**States of the
thermohaline
circulation**

From SHIMOKAWA & OZAWA (QJRMS 2002)

**Summary of the
numerical experiments**

From SHIMOKAWA & OZAWA (QJRMS 2002)

**State transitions
classified
according to
entropy
production**

From SHIMOKAWA & OZAWA (QJ RMS 2002)

**Time series of the
rate of entropy production**

RODERICK DEWAR

“Information theory explanation of the fluctuation theorem, maximum entropy production and self-organized criticality in non-equilibrium stationary states” [J. Phys. A 36:631 (2003)].

- Matematisk bevis på prinsippet for maksimal entropiproduksjon for stasjonære systemer som ikke er i termodynamisk likevektstilstand, dvs. at det “strømmer” energi, varme, osv. gjennom systemet.
- Bruker **Gibbs'** formulering av statistisk mekanikk, men istedenfor å se på de forskjellige mikroskopiske **tilstandene**, ser man på **banene** mellom de forskjellige tilstandene, gitt de gjeldene **forutsetningene**, f.eks. energi, sammensetning, energiflukt osv.
- Resultatet blir at man får “maksimum antall baner” når man **maksimaliserer entropiproduksjonen**.
- I tillegg kan man beregne sannsynligheten for at entropiproduksjonen ikke blir maksimal. Man kan bevise at sannsynligheten for at systemet kjører “baklengs” (med negativ entropiproduksjon) er forsvinnende liten.
- Dewar har også brukt den samme analysemetoden til å undersøke “**self-organised criticality**” - f.eks. oppførselen av sandhauger, som kan ses på som en modell for biologiske eller økonomiske nettverk.

Moteksempler - C. Nicolis & G. Nicolis

(G & C N., J Chem. Phys. 1999; Physica D 2001; C.N. Q.J. R. Met. Soc. 2003)

- Ikke-lineære systemer med relativt få variabler
 - Autokatalytiske kjemiske reaksjoner
 - Enkle dynamiske modeller for atmosfæresirkulasjonen
 - Løsningene kan være stasjonære, svingende, eller kaotiske
- Modellresultatene viser ikke noen entydig relasjon mellom entropiproduksjon og modell-løsningens stabilitet.
- Entropiproduksjonen kan ofte korreleres med "Kolmogorov-Sinai entropi", som beskriver den lokale graden av ustabilitet
- Mer arbeid er nødvendig for å undersøke når og i hvilken grad *Dewar's* forutsetningene er oppfylt.

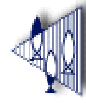




Moteksempel - Prigogine 1947

(*Etude Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles*, Desoer, Liege)

- For et lineært system (Onsagers ikke-reversibel termodynamikk):
 - Varmeledning uten konveksjon
 - Laminær strømming
- I en stasjonær tilstand er entropiproduksjonen et **minimum** i forhold til andre, ikke-stasjonære "nabo" tilstand.



C. Nicolis
QJRMS
2003



R. Lorenz, Science 2003-02-17 “Perspectives”

- 2-boks modell av jordens klima



R. LORENZ ET AL., TITAN/MARS/JORDEN

(Geoph.R.Letts
28:415, 2001)

● Maksimal energiproduksjon forklarer sirkulasjonene bedre enn om man antar at N-S varme-transport er proporsjonal med atmosfæretrykk.

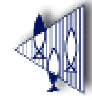
KLIMA OG BIOGEOKJEMI (A. Kleidon, K. Fraedrich, R. Lorenz)

- Et klima som ikke er i maksimal entropiproduksjonstilstand (MEP) vil ha mindre N-S varmetransport, og større N-S temperaturgradienter
- Biosfæren har mange individer, som behandler C i mange forskjellige måter (dvs. mange frihetsgrader, nødvendig for MEP)
- Biotisk aktivitet er en dissipativ prosess
- Minimum albedo for biotisk MEP-tilstand, fører til homeostasis (stabilitet)
- Resultatene ligner Gaia-hypotesen, men teorien er mer generell, ikke teleologisk.



FOTOSYNTESE

- **D. Juretic, P. Zupanovic (Comput. Biol. Chem. 27:541)**
- Modellering av fotosyntese i bakterier.
- Den enkleste lineære 2-tilstandsmodellen oppnår en effektoverføring på maks. 50%. Dette øker til 91% hvis man bruker en ikke-lineær MEP-modell.
- En realistisk fysisk-biofotokjemisk modell for hele fotosynteseprosessen som bruker MEP oppnår en effektivitet som er i samsvar med eksperimentelle resultater for bacteriorhodopsin og chlorophyll (10-19%).



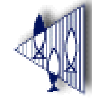
SOSIOØKONOMISKE ANVENDELSER

Bjerknes Centre

for Climate Research



- **R. Lorenz** (poster, EGS 2003) postulerte at MEP kan anvendes innen markeder og økonomiske systemer.
 - ➔ "Self-organized criticality", energidissipasjon tilsvarer overskudd (forskjellen mellom salgs- og kjøpspris)
 - ➔ Økologiske systemer kan forstås på samme måte.
- **Jeg mener**, i samsvar med f.eks. **Matthias Ruth** ("Information, order and knowledge in economic and ecological systems: implications for material and energy use". *Ecological Economics* 13 (1995) 99-114):
 - at samfunnsøkonomiske og økologiske anvendelser av MEP kan baseres på de **vanlige termodynamiske definisjoner** på entropi og energi:
 - ➔ **Veitransport**, siden den er mindre energieffektiv enn bane- eller sjøtransport, **favoriseres** av MEP-prinsippet.
 - ➔ Derimot, siden rutebiltransport er faktisk mindre energikrevende enn passasjertog, vil **færre passasjerer bruke buss** enn jernbane mellom Bergen og Oslo (bekreftet av en nyere BT-artikkel). - Men de fleste tar flyet.



(SOSIOØKONOMI)

Bjerknes Centre

for Climate Research



- ➔ De fleste vil kjøre bil til jobben. Men blir det for mye trafikk-kork vil bilene stå i ro og produsere entropi langsommere. Dette kan, selv i Bergen, føre til press for utbygging av bybane.
- **Krigen i Iraq og andre steder** produserer mer entropi enn diplomati.
- **Krigen mot narkotika** blir favorisert over kanskje mer rasjonelle måter å behandle rusmisbrukere.
- **Økonomisk vekst** begrenses av energitilgangen. Dette kan bekrefte av historiske studier.
 - ➔ Man trenger mye energi for å bygge og operere kullgruver. (Gruveoperasjoner ble betydelig effektivisert etter at James Watt hadde utviklet en mer effektiv dampmaskin). Kullgruvene fikk dårligere økonomiske betingelser etter at oljeproduksjonen økte, ettersom oljeutvinning, -transport og -bruk er mindre energikrevende.
 - ➔ Sovjetisk industri brukte mye energi og skal derfor ha produsert mye entropi. Derimot kan det rigide styringssystemet ha begrenset entropiproduksjonen i det øvrige samfunnet.



(SOSIOØKONOMI)

Bjerknes Centre

for Climate Research



- **Diktaturer** har vanligvis strengere samfunnsstyring, som bidrar til redusert entropiproduksjon og økonomisk aktivitet en tilsvarende demokratier. Denne økonomiske forskjellen kan ha vært mindre i fortiden, før den industrielle revolusjonen, når det var mindre tilgang til fossilt drivstoff.
- **Å begrense innvandring** har effekter som kan også forstås økonomisk - denne begrensningen vil i hvert fall redusere entropiproduksjonen, og en del energi må brukes til å forsvare grensene. Det blir “termodynamisk” umulig å beholde helt tette grenser.
- Verdens **jordbruksproduksjon** (også i den 3. verden) har økt som konsekvens av at nitrogen i atmosfæren omdannes til kunstgjødsel ved hjelp av industrielle prosesser. Dette fører til en betydelig entropiproduksjon: de to nitrogen”reservoarene” blandes sammen, på samme måte som karbon i kull og olje omdannes til CO_2
- ... selv om internettkommunikasjon er mer effektiv, vil **store internasjonale konferanser om klimaendringer** bli favorisert pga. deres større entropiproduksjon.



(SOSIOØKONOMI)

Bjerknnes Centre

for Climate Research



- Hvis man ikke liker konsekvenser av maksimal entropiproduksjon, må det innføres restriksjoner.
- Men restriksjonene må være **termodynamisk realiserbare**.





KONKLUSJON

- Prinsippet på maksimal entropiproduksjon (MEP) er en naturlig utvidelse av klassisk termodynamikk og Gibbs og Boltzmanns statistisk mekanikk.
- **Under relevante forutsetninger/restriksjoner** kan MEP forklare en del fenomener innen hydrodynamikk, klimasystemer på Jorden og andre planeter, biokjemi, biologi/økologi, og samfunnsvitenskap/-økonomi.
- Det blir fremdeles nødvendig å sammenligne resultatene av MEP-beregninger med observasjoner og resultater fra detaljerte numeriske modeller. En del arbeid gjenstår før man har kartlagt nøyaktig hvilken dynamiske systemer styres av MEP-prinsippet.

