

# Het gebouw als energie- systeem

Literatuurstudie  
Post HBO Opleidingen Energiekunde



**1e druk, januari 2025**

Het gebouw als energiesysteem  
Literatuurstudie Energieconsulent PHOE

Auteurs: © mr drs J. Huibrecht Bos

Uitgever: J.H. Bos – sinds 1883 uitgevers

Drukker: Print & Bind, Amsterdam

Vormgeving omslag en huisstijl:  
Raymond Körner, Jargo Design

ISBN: 978-90-78342-23-6

Rechten: Dit werk valt onder een Creative Commons-licentie:  
Naamsvermelding 4.0 Internationaal  
(CC BY 4.0). Je mag vrij citeren, delen en aanpassen, op  
voorwaarde dat je correcte bronvermelding doet.  
Zie: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Bijzondere vermelding: Met dank aan Ronald Remijn REA,  
namens Stichting Post HBO Opleidingen Energiekunde.

# Het gebouw als energiesysteem

Literatuurstudie

Post HBO Opleidingen Energiekunde

mr drs Huibrecht Bos  
30 juni 2024

# Inleiding

## Opleidingen

De opleiding Introductie Energiekunde heb ik met succes afgerond in 2021 (diploma 2022). Dit geeft toegang tot het vervolg: de opleiding Energieconsulent, een maatwerkopleidingstraject dat toegang geeft tot het register van energieadviseurs (REA).<sup>1</sup>

Hiermee ben ik eind 2022 aangevangen. Dit bestaat uit twee delen, elk afgesloten met een thesis. Het eerste deel is de literatuurstudie. Voor een deel gericht op inhoudelijke kennis van energie, verduurzaming en energiesystemen. Voor een ander deel gericht op de ontwikkeling van denkmethoden zoals systeemleer, managementtheorieën en out of the box denken. Voor veel studenten zal het eerste meer vertrouwd zijn, voor mij was het tweede deel meer vertrouwd. Dat heeft alles te maken met mijn achtergrond.<sup>2</sup>

## Thesis *voortwee delen: thesis in twee delen*

In overleg met mijn studiebegeleider Ronald Remijn heb ik besloten te zoeken naar één thema voor de afrondende thesis van de inleidende literatuur als basis voor mijn vervolgonderzoek. Mijn bedoeling daarmee is dat ik de eerste thesis gebruik als opmaat en onderbouwde basis voor het tweede deel: het onderzoek naar een deelgebied in energiekunde, waarmee ik de opleiding hoop te voltooien.

De literatuur was zeer divers, maar dat kan ook niet anders bij zo'n groot vakgebied als energie. Mijn vak (energie adviseur) en mijn kennis richten zich met name op energie van de gebouwde omgeving. De Introductie Energiekunde was een prachtige opleiding in de breedte met ook veel aandacht voor opwekking, distributie en marktmodellen. Nu ik mij kan specialiseren, kies ik voor het vraagstuk van energie (of eigenlijk verduurzaming) van de gebouwde omgeving.

---

<sup>1</sup> Het Register van EnergieAdviseurs wordt beheerd door de FedEC, de branche- en beroepsorganisatie van professionals in energiekunde. Om toegelaten te worden tot het REA register, volstaat een aantal studies, waarvoor de opleiding tot energieconsulent van de stichting PHOE een zij-instroom mogelijkheid biedt. Zie [FedEC en REA's - FedEC](#) en [PHOE | Energieconsulent | Word gecertificeerd energieadviseur!](#)

<sup>2</sup> Doctoraal Bedrijfseconomie (organisatiekunde, management accounting), en doctoraal Nederlands Recht (civiel, rechtspersonen en meta-juridica). 25 jaar ervaring als ondernemer en daarnaast als toezichthouder, bestuurder in verschillende sectoren, met de bijbehorende opleidingen voor toezicht, strategieontwikkeling en leiderschap.

De literatuurstudie gaat in op een beschrijving van energiebesparing van (niet industriële) gebouwen:

---

*Verwarmde gebouwen als energiesystemen.*

---

### **Opbouw en leeswijzer**

De vooropleiding bestond bijna geheel uit gerichte brede kennis over energiekunde en thermodynamica. De literatuur voor deze aanvullende opleiding tot energieconsulent heeft onder meer veel aandacht voor systeemtheorie. Dit is een relevante aanvulling om energievraagstukken meer systematisch (letterlijk) aan te pakken. Die integrale gedachte doet recht aan de samenhang in energievraagstukken. Ik besteed de eerste helft van deze thesis aan systeemtheorie, gericht op gebouwen als energiesystemen.

De tweede helft richt zich op vraagstukken van verduurzaming, waarde en waardering en transitie. Ik beschouw deze thesis als voorwerk voor de tweede thesis, waar ik verder ga met het onderzoek naar gebouwen als energiesysteem.

# Inhoud

➤ <b>Inleiding.....</b>	<b>2</b>
Opleidingen.....	2
Thesis voor twee delen: thesis in twee delen.....	2
Opbouw en leeswijzer.....	3
➤ <b>Inhoud.....</b>	<b>4</b>
➤ <b>Systemdenken als basis voor een gebouw.....</b>	<b>5</b>
Systeemtheorie van Russel Ackoff toegepast op gebouwen.....	5
Beginselen van een systeem.....	5
5 beginselen toegepast op gebouwen als systeem.....	6
Samengevat over Ackoff.....	9
Gebouwen als energiesysteem volgens Dana Meadows.....	10
De basis van Meadows systeemtheorie.....	10
Voorraad, flows en feedbackloops.....	10
Corrigerende mechanismen.....	11
Coping mechanismen.....	13
Meadows versus Ackoff.....	14
➤ <b>Energie is de prijs van comfort.....</b>	<b>15</b>
Sustainable Energy – without the hot air.....	15
Hoofdstuk 6 Solar.....	16
Hoofdstuk 7 Heating and cooling.....	17
Hoofdstuk 9 licht.....	18
Hoofdstuk 11 Gadgets.....	18
Hoofdstuk 21 smarter heating.....	19
Hoofdstuk 22 Efficient electricity use.....	19
Hoofdstuk 26 fluctuaties en opslag van energie.....	20
Kern probleem “elektrificeren”.....	22
Samengevat over Mackay.....	23
➤ <b>Energie, exergie en de aardgastransitie.....</b>	<b>24</b>
Waarom is exergie als waarde eigenlijk relevant?.....	25
Energie in tijd en plaats.....	25
➤ <b>De vorige transitie: aan het gas.....</b>	<b>29</b>
➤ <b>Tot slot.....</b>	<b>32</b>
➤ <b>Literatuur.....</b>	<b>33</b>

# Systemendenken als basis voor een gebouw

## Systemetheorie van Russel Ackoff toegepast op gebouwen

Een gebouw kan worden beschouwd als een systeem. Een systeem is een geheel dat bestaat uit delen die los van elkaar niet dezelfde functie hebben als het geheel. De delen hangen niet alleen samen, ze werken samen en ze zijn onderling afhankelijk. Russell Ackoff wordt beschouwd als de pionier op het gebied van systeemdenken. Voor mij is zijn bijdrage op dit vlak meer van belang dan de bundel van managementcolumns, die tot de literatuur behoort, omdat juist dit systeemdenken voor mij essentieel is in het kader van energiekunde. De bloemlezing met artikelen over management en organisatie is (voor mij) minder vernieuwend.

In de laatste fase van zijn lange leven heeft Ackoff niet veel nieuws meer gepubliceerd. Wel heeft hij nog veel optredens gedaan, waarbij hij zijn theorie, met name over de andere blik van systeemdenken, meebrengt. Hiervan zijn – gelukkig – de nodige registraties als video online te vinden en te volgen.

Als het gaat om het beschouwen van vraagstukken vanuit (zijn) systeemtheorie, komen we op een aantal uitgangspunten die anders zijn als je complexe vraagstukken vanuit die systeemtheorie bekijkt. Zijn belangrijkste publicatie op dit vlak was waarschijnlijk 'Redesigning the Future' (1974), 7 jaar later gevolgd door een versie van zijn theorie die meer op big corporates was gericht: 'Creating the corporate future'.<sup>3</sup>

## Beginnelsen van een systeem

Ackoff komt met een paar beginselen, die in het beschrijven van complexe problemen als systeem, essentieel zijn. Hij vat ze samen in 5 principes<sup>4</sup>

1. DOEL Het onderscheidende en belangrijkste kenmerk van een systeem bestaat uit de eigenschappen die alleen gelden voor het systeem als geheel en niet voor één van de delen.
2. Daardoor geldt: INTEGRATIE Als je een systeem splitst of uit elkaar haalt dan verliest het zijn essentiële kenmerken. De onderdelen van een systeem werken samen om het doel te ondersteunen.

<sup>3</sup> Ackoff, Russell L. 1974. Redesigning the Future: A Systems Approach to Societal Problems. New York: Wiley.  
Ackoff, Russell L. 1981. Creating the Corporate Future: Plan or be Planned For. New York: Wiley.

<sup>4</sup> [Systems Thinking Speech by Dr. Russell Ackoff \(youtube.com\)](#)

3. ADAPTIVITEIT Systemen moeten aanpasbaar zijn, zodat ze zich kunnen richten op veranderde behoeften. Als een systeem gericht is op verbetering van delen van het systeem, dan leidt dat nog niet tot verbetering van het systeem als geheel. Alleen als een verbeterprogramma gericht is op verbetering van de essentiële eigenschappen, voorkom je dat problemen wel worden opgelost, maar het systeem niet verbetert.
4. VERBETEREN Een cultuur van leren is belangrijk in het onderhouden van een systeem. Een verbeterprogramma móet gericht zijn op wat je wel wilt (niet op wat je niet wilt). Systemen richten op het voorkomen wat je niet wilt, brengen je nog niet bij wat je wél wilt.
5. CREATIVITEIT Hoezeer permanente verbetering ook essentieel is, dit móet onderbroken worden. Continue verbetering kan niet zonder creativiteit en dat is geen continue proces.

Met deze beginselen is een gebouw als systeem te beschrijven. Ik loop deze 5 principes langs.

## 5 Beginselen toegepast op gebouwen als systeem

### Ad 1. DOEL

Onderdelen van een gebouw hebben ook een functie en essentiële eigenschappen, maar niet dezelfde. Een koelkast bijvoorbeeld is een systeem op zich, waarvan de essentiële eigenschap zou kunnen zijn: het op een constante lage temperatuur houden van etenswaren op een voor menselijk gebruik toegankelijke manier. Een HR-ketel is een systeem dat water van een centraal verwarmingssysteem met behulp van gas (en lucht) op een hogere temperatuur brengt als de gemeten temperatuur lager is dan de doeltemperatuur en daarbij kan moduleren afhankelijk van een aantal parameters.

Complexere systemen leiden niet tot complexere essentiële eigenschappen. Een centraal verwarmingssysteem is ingewikkelder dan een HR-ketel omdat daar ook de leidingen, radiatoren, thermostaten, kleppen en sensoren bij horen. Maar de essentiële eigenschappen zijn eenvoudiger: een systeem om ruimte(n) efficiënt naar de gewenste temperatuur te verwarmen.

Een interessante toevoeging hierin is het woord 'efficiënt' omdat dit het element is dat door moderne elektronica wordt toegevoegd. Factoren (systemen) als (voor) de buitentemperatuur, historische waarden, de delta-T van aanvoer- en retour en het verschil van de gemeten en de doeltemperatuur van de ruimte en settings met



betrekking tot de stooklijn, stook-tijden etcetera spelen een rol. Dit zijn elementen die zijn toegevoegd aan het systeem door of dankzij het woord efficiënt in de essentiële eigenschappen.

Terug naar het verwarmde gebouw als systeem. Wat zijn de essentiële eigenschappen van een verwarmd gebouw? Bestanddelen zijn in ieder geval:

- Ruimten met verschillende functies, waarbij functies die niet samengaan van elkaar gescheiden zijn (werken, wonen, keuken, sanitair, opslag etc.).
- Die geschikt zijn voor menselijk verblijf en passende opslag van spullen.
- Toegankelijk maar ook veilig (dus afsluitbaar) zijn.
- Waarbij er verschillende technische oplossingen zijn om het binnenklimaat comfortabel te maken.
- En wellicht nog: met zicht op omgeving, seizoenen en dag/nacht.

Verkort naar de essentiële eigenschappen is een verwarmd gebouw:<sup>5</sup>

DOEL: Een geheel van ruimten voor menselijk verblijf geschikt gemaakt en voorzien van systemen die dit verblijf comfortabel maken.

## Ad 2. INTEGRATIE

De integratie van de onderdelen is belangrijk. Dit maakt het onderscheid tussen een verwarmde schuur en een woning of kantoor. Het is een omgeving waar sanitair een (vaste) plek heeft, waar gekookt, geslapen, gewoond en gewerkt kan worden. Verschillende functies, ruimten en systemen waarvoor geldt dat ze tot de woning horen, als het weglaten ervan het concept van woning aan zou tasten. De CV is onderdeel van de woning, net als de meterkast, elektriciteitsnetwerk en kookplaat of keuken. Als je dit weglaat is de vraag of je er nog kunt wonen. Een kantoor heeft andere eisen: slapen en koken zijn niet essentieel, maar samenkomen (vergaderen) en afzonderen (werkplekken) wel. Voor Ackoff is deze integratie belangrijk voor het bepalen van de systeemgrenzen: als onderdelen geen essentiële rol of betekenis hebben voor de doelstelling van het systeem, kunnen ze er wel zijn, maar behoren deze niet tot het systeem.

<sup>5</sup> Ik gebruik hier het perspectief van een verwarmd gebouw, om energie en menselijk verblijf als eigenschappen toe te voegen. In zuidelijke streken zou het een gekoeld gebouw zijn. We zouden ook van een geklimatiseerde omgeving kunnen spreken. Dit maakt de tekst wel universeel, maar niet duidelijker. Daarom heb ik – voor het Nederlands taalgebied – gekozen voor verwarmd.

Als we woningen als (energie)systeem beschouwen zie je direct dat de verschillende onderdelen elkaar beïnvloeden. Fysieke kenmerken van de thermische schil beïnvloeden de energieverliezen. Deze beïnvloeden wooncomfort, maar ook de aansturing van bijvoorbeeld verwarming. Een bad stelt extra eisen aan de warm water voorziening etc. Zo is er verband tussen bouwkundige eigenschappen (isolatie), faciliteiten (sanitair), opwekkers en afgiftesystemen. Deze integratie bepaalt alle onderdelen tot het systeem.

### **Ad 3. ADAPTIVITEIT**

Dat een systeem aanpasbaar is, is een vereiste. Eigenlijk niet eens in de kenmerken, maar voor de doelstellingen van het beheer. Je ziet zelfs bij systemen, die niet meer fysiek bereikbaar zijn, dat deze toch vaak nog routines hebben voor aanpassingen of zelfs upgrades. Systemen die niet meer toegankelijk zijn voor veranderingen kunnen door kleine veranderingen in de omgeving volledig hun waarde verliezen. Woningen zijn vrij makkelijk aan te passen. Zowel de fysieke grenzen als de klimaatsystemen zijn aan te passen.

### **Ad 4. VERBETEREN**

Verbeteren is een toevoeging, omdat Ackoff systeemtheorie beschouwt als een manier om complexe situaties te begrijpen, te beschrijven en te beheren. Dat zou je met name willen vanuit een ambitie tot verbetering (improvement). Voor woningen geldt bij uitstek dat deze in de loop van de tijd aan steeds meer eisen moeten voldoen. Soms wettelijke eisen (bijvoorbeeld over isolatie of constructie), maar ook vormgevings- of functionele eisen. Voor een deel geldt dat deze na oplevering enige tijd onveranderlijk zijn, maar op termijn geldt voor woningen bij uitstek dat deze weer aan de eisen van deze tijd moeten gaan voldoen.

### **Ad 5. CREATIVITEIT**

In zijn redevoering gaat Ackoff uitgebreid in op het punt dat enerzijds een permanente verbetering nodig is, maar dat anderzijds dit niet alleen uit feedbackloops en een vast verbeterprogramma kan komen. Permanente verbetering heeft behoefte aan disruptie, aan er af en toe heel anders naar kijken. Vooral om nieuwe oplossingen een kans te geven in bestaande situaties.

De introductie van de LED lamp is nu geen disruptie meer. Ongeveer alle eisen waaraan de conventionele verlichting voldoet, kunnen ook aan LEDs gesteld worden. In het begin was dat anders: het energiegebruik was anders, maar het licht was ook anders. Voor warmtepompen geldt nu (nog) hetzelfde: een gasketel vervangen door een warmtepomp kan alleen als aan aanvullende eisen voldaan is.

Daarmee kom je niet alleen aan de bron van energie, maar ook aan stooklijn, programmatijden, afgiftesystemen etc. Zo is de beslissing groter dan vervanging in het kader van regulier onderhoud en kunnen effecten ook bijvoorbeeld tot verandering van het binnenklimaat (lees: verbeterd comfort) leiden.

## **Samengevat over Ackoff**

Het is een gamechanger geweest in de management literatuur, waarbij zijn belangrijkste toevoeging is om op een holistische wijze naar complexe vraagstukken te kijken door deze in een systeem te plaatsen. Met deze methode dwingt Ackoff als het ware om vooraf een paar zaken vast te stellen, zoals:

- Het doel.
- De systeemgrenzen (welke onderdelen zijn essentieel in het bereiken van het doel).
- Een plan voor verbetering, waarbij weinig vaststaat, zelfs het systeem niet.

Een heel belangrijk element dat ik verder alleen in de psychologie ben tegengekomen<sup>6</sup> is dat Ackoff voor de doelstelling meegeeft dat een systeem alleen een doelstelling mag hebben, die formuleert wat je wél wilt en niet wat je niet wilt. In termen van Ackoff omdat je met een systeem dat uitsluit wat je niet wilt nog niet komt bij wat je wel wilt. Een systeem om fouten op te sporen is geen goed systeem (beter zou zijn om een systeem te hebben dat checkt of het goed is, het aan alle voorwaarden voldoet). Daarmee richt je je op de beschrijving van wat je wilt.

Hoe belangrijk die taal is zal ook uit het volgende deel blijken: voor Meadows is taal, het vocabulaire, essentieel als het gaat om systeemtheorie. Van haar is de quote:

‘Eigenlijk praten we niet over wat we zien: we zien alleen maar datgene waarover we kunnen praten.’<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Toegankelijk verwoord in dit artikel: [De onbedoelde kracht van de ontkenning: Zeg niet wat je niet wilt | Tekstblad](#)

<sup>7</sup> Dit is het uitgangspunt van Thinking in systems, Donella Meadows. Het is weer een citaat van Fred Kofman.

## Gebouwen als energiesysteem volgens Dana Meadows

Thinking in systems is uiteindelijk de titel waar Dana (voluit: Donella) Meadows om onthouden zal worden. Zelf heeft ze het verschijnen hiervan niet meegemaakt, omdat het manuscript toen het ongeveer klaar was (1993), op de plank is blijven liggen. Pas toen zij onverwacht overleed is het dankzij bevriende relaties (in 2008) alsnog uitgegeven én een succes geworden. Meadows was bekend vanwege haar rol in Limits to growth, de befaamde uitgave uit 1972 over de effecten van de wijze van economische groei van dat moment op de aarde en het klimaat. Daarna heeft zij zich toegelegd op het systeemdenken en de combinatie van beide: duurzaamheid is een kern-issue gebleven, waarover zij publiceerde.

### De basis van Meadows systeemtheorie

Meadows beschrijft systemen eigenlijk eenvoudiger dan Ackoff: er zijn maar drie elementen nodig voor een systeem: 1. Elementen, 2. Samenhang en 3. Een doel. Waar Ackoff systemen meer normatief benadert als een omgeving van waaruit je bestuurt of beheert, (dus eigenlijk als wijze van modelleren van de werkelijkheid) ziet Meadows systemen niet als manier om ernaar te kijken, maar als een natuurlijke ordening. Meadows is erg taalgevoelig en gaat bijvoorbeeld in op het gevoelsmatige verschil, dat functie meer van objecten is en doelen van mensen en beschrijft dan dat dat ook andersom kan zijn. Waar Ackoff zich concentreert op verandering, gaat Meadows juist uit van de neiging tot onveranderlijkheid van systemen:<sup>8</sup>

- Systemen blijven zichzelf. Zelfs als je onderdelen vervangt blijft het systeem hetzelfde zolang de verhoudingen en doelen gelijk blijven.<sup>9</sup>
- Doelen lees je af aan gedrag. Niet aan rapportages.
- Gedrag en resultaat hoeven niet samen te hangen, hoewel wenselijke resultaten vaak wel worden toegeschreven aan gedrag.

### Voorraad, flows en feedbackloops

Meadows plaatst in systemen voorraden en flows. Voorraden zijn te kwantificeren, flows te kwalificeren en als je ziet dat een systeem steeds op dezelfde manier reageert op bepaalde voorraadstanden of -bewegingen dan is sprake van een feedbackloop: 'systeemdenkers zien de wereld als een verzameling feedbackprocessen'. Niet alle voorraadwijzigingen zijn het gevolg van feedbackloops. Er zijn ook wijzigingen van in- en uitstroom, die van buiten

<sup>8</sup> Meadows, Denken in systemen, Hoofdstuk 1

<sup>9</sup> Een belangrijke vraag voor mij is of deze systeemeigenschap ook geldt als we monumentale gebouwen beschouwen als energiesystemen. Hierop kom ik in de volgende thesis terug.

ingegeven zijn. Soms is dit dan weer een punt waarop een feedbackloop reageert met een keten van causale reacties die via in- of uitstroom de voorraad beïnvloeden.

Er is een verschil tussen balancerende feedbackloops (zorgen voor stabiliteit, maar beperken ook de mogelijkheid tot verandering) en – complexer - zichzelf versterkende feedbackloops, waarbij de reactie op een voorraadmutatie de mutatie op zich versterkt. Een eenvoudig voorbeeld hiervan is 'rente-op-rente' waarbij de hoofdsom groeit door rente, maar elk jaar daarna sneller groeit.

Meadows speelt met het concept van verschillende flows en feedbackloops, die in een systeem tegelijk werken. De ene die bijvoorbeeld een ruimte afkoelt (warmteverliezen) en de andere die daarop gaat opwarmen. Het wordt complexer als de afkoeling versnelt omdat de ruimte warmer wordt. Dit is interessant omdat de reactie van de 'voorraad' (hier de ruimte) vertraagd optreedt. Net als de rente-op-rente. Het principe van een voorraad in stand houden kan best complex zijn.

Van het principe van verschuivende dominantie is de combinatie van bevolkingsgroei en welvaart (als twee voorraden) een voorbeeld waarbij de bevolkingsgroei eerst sneller gaat dan de welvaart, maar – in veel gevallen - de welvaartsgroei uiteindelijk sneller gaat en de bevolkingsgroei door de welvaartsgroei wordt beperkt.

Divergerende combinaties bestaan ook, waarvan in de economie de 'varkenscyclus' of de tulpenrally's de meest gebruikte metaforen zijn.<sup>10</sup> De les van Meadows is dat er veel situaties met versterkende feedbackloops zijn, die een (ongewenste) groei aanjagen, maar zegt Meadows, er is altijd een balancerende loop aanwezig omdat geen enkel systeem onbeperkt kan doorgroeien. De vraag is welke (niet dominante) balancerende loops er zijn. En hoe die te versterken zijn.

### Corrigerende mechanismen

Drie mechanismen, die Meadows hiervoor uitwerkt zijn veerkracht, zelfsturing en hiërarchie<sup>11</sup>. Vervolgens gaat Meadows in op het probleem dat tegelijk met deze manier van kijken ontstaat. Wie de wereld, wereldproblemen of situaties beschouwt en beschrijft als 'systemen' met voorraden en flows, met elementen, een doel en samenhang, beschrijft dit als een model. En een model is (en blijft) een beschrijving van de situatie maar is niet de situatie. Voor economen is dit een vertrouwde situatie waarbij economen altijd dezelfde disclaimer gebruiken: de

<sup>10</sup> De varkenscyclus beschrijft hoe varkensprijzen en -aanbod oscilleren: hoge prijzen leiden tot het fokken van meer varkens, maar doordat iedereen dit doet, ontstaat overaanbod en lage prijzen, waarna door uittreding het aanbod daalt en prijzen weer stijgen, en zo de cyclus herhaalt. Het effect is zo sterk omdat het te duur is om (levende) varkens te bewaren tot de prijzen stijgen.

<sup>11</sup> Hoofdstuk 3.

toevoeging 'ceteris paribus'.<sup>12</sup> Meadows verzet zich tegen het verschijnsel dat in modellen zaken vaak lineair worden aangenomen of beschreven waar ze exponentieel zijn. Ook beschrijft ze het dilemma dat het onmogelijk is om modellen beter te maken door meer factoren toe te voegen aan het model, terwijl het weglaten ook zeker tot modelschade leidt.<sup>13</sup>

Een veelheid van voorbeelden passeert de revue. De meeste gaan in op mechanismen en misverstanden die wellicht hun oorsprong hebben gevonden in het werk van Meadows voor *Limits to the Growth*. Het gaat daarbij om de beschrijving van situaties waarbij er een correlatie is tussen vervuiling en toenemende welvaart, tussen niet duurzaam gebruik (bijvoorbeeld bodemuitputting) en ontwikkeling van de landbouw, tussen ontwikkeling van supplementen in voeding van planten en dieren en effect op voedselkwaliteit.

### De tragedie van gemeenschappelijk bezit

Een heel ander voorbeeld is hier beslist interessant: het betreft de beschrijving van problemen met het gemeenschappelijk gebruik van openbaar/publiek bezit: *the tragedy of the commons*<sup>14</sup>. Waarbij er een gemeenschappelijk weiland is dat iedereen mag gebruiken. Het beschreven effect is dat rationale boeren steeds meer dieren gaan toevoegen aan dit weiland tot de opbrengst negatief is. Dat zouden ze op eigen land niet doen, want zo is het land maar één jaar te gebruiken. De schade van het uitputten van een gemeenschappelijke bron heeft dus een heel ander effect op het gedrag dan wanneer het eigen is. Dit wijst op de noodzaak van regelgeving, privatisering of educatie en motivatie. Of andere oplossingen die leiden tot een gemeenschappelijke verantwoordelijkheid. Dit verschijnsel is niet alleen beschrijvend voor het macro effect op het klimaat van micro besluiten van consumenten of producenten. Dit zie je ook bij situaties waarin, bijvoorbeeld door financiële of fiscale regelingen, de lasten van energie verschuiven naar een andere partij. Voorbeelden hiervan zijn lease-auto's, VVE's met verdeling van energiekosten naar oppervlak, contracten die inclusief energie zijn, zoals sommige huurcontracten of een hotelovernachting etc.

Deze beschrijving van valkuilen en uitwegen<sup>15</sup>, is het laatste hoofdstuk van het deel over systemen en de wereld waarin wij wonen. In het kader van de vraag naar

<sup>12</sup> Ceteris paribus is een Latijnse term die "met alle andere dingen gelijk" betekent. In de economie gebruikt voor de veronderstelling dat alle andere variabelen constant worden gehouden om de effecten van één specifieke verandering te isoleren en te begrijpen. Het is behulpzaam bij het vereenvoudigen van complexe systemen en het maken van duidelijkere, meer gerichte analyses.

<sup>13</sup> In de economie benoemt als 'overfitting': het toevoegen van factoren om een model beter te laten aansluiten bij de werkelijkheid, maar daarbij teveel onzekerheid meenemen over de impact waarmee de uitkomsten van het model juist afnemen. Factoranalyse is de methode om te rekenen aan de betrouwbaarheid onder meer door factoren weg te laten. Meadows beschrijft deze aspecten niet.

<sup>14</sup> Hardin, Garrett. 1968. "The Tragedy of the Commons." *Science* 162 (3859): 1243-1248.

<sup>15</sup> Hoofdstuk 5.

gebouwen als energiesystemen is het interessant of de *tragedy of the commons* in dat vraagstuk een relevant model is. En hoe dit dan een rol speelt.

We kennen voor klimaatvraagstukken het verweer dat de invloed of impact van energiebesparing in Nederland te weinig is om daar zoveel actie op te moeten nemen. Inmiddels lijkt de inzet op ieder-doet-wat-hij-kan het hiervan te winnen, maar nog steeds wordt hiermee de inzet als groot en de uitkomst als futiel neergezet. In duurzame (hernieuwbare) bronnen zien we voor gebouwen als energiesystemen ook dat de problemen van publiek bezit een steeds grotere rol spelen. Bijvoorbeeld aan geluidsoverlast van warmtepompen, onderkoeling van bodembronnen van warmte door de ene gebruiker, die de bron ook voor anderen uitput.

Hernieuwbare bronnen van energie zijn, zoals de *common ground*, ook gevoelig voor uitputting. Dat is oplosbaar, maar vraagt afspraken, regels of beperkingen. Zoals die ook bij de *common ground* nodig zijn om te voorkomen dat overbelasting de bron voor iedereen (op die plek) onbruikbaar maakt.

### Coping mechanismen

Daarna komt in deel 3 een opsomming van mogelijke coping mechanismen. Coping mechanismen zijn voor Meadows van belang om te bepalen op welke manier de ongewenste eigenschappen en bewegingen van een systeem veranderd kunnen worden en risico's gemitigeerd. Een belangrijk gegeven hierbij is nog dat Meadows systemen ziet als integratie van flows en voorraden. Het gaat dus steeds om grootheden en processen die deze veranderen. Met deze twee elementen kun je eigenlijk op drie punten ingrijpen: op voorraden, op flows (processen) én op de tijd. Tijd is bij alles een belangrijke factor. Hieruit blijkt ook wel weer hoeveel het concept van Meadows verschilt van dat van Ackoff. Een paar van de copingmechanismen van Meadows haal ik hier aan:

- het combineren van voorraden met *buffers* waarbij niet altijd voldoende flow moet zijn maar mutaties in de buffer kunnen worden opgevangen.
- het aanbrengen van *vertraging* in systemen waardoor het effect van flows op de voorraden beperkt wordt. Een ongebruikelijke weg, die niet gauw in beeld komt, omdat de neiging op onevenwichtigheden juist is om te reageren. De bedoeling is om overreacties te beperken, waardoor eerder een evenwicht komt.
- stimuleren van *balancerende feedbackloops* of het gebruiken van de veranderkracht van versterkende feedbackloops.
- het verbeteren van de *transparantie van informatie*: gebrek aan informatie bij de juiste persoon en op juiste moment is één van de belangrijkste oorzaken van divergerende systemen.

Pas daarna noemt Meadows *regelgeving en zelfsturing* als mechanismen. Ze gebruikt echter een teruglopende telling waarbij de prioriteit dus als hoger gelezen kan worden. De hoogste prioriteit krijgen: het aanpassen van de doelen van een systeem en de metaversie hiervan: het veranderen van bestaande paradigma's. Dit heeft duidelijk het meeste effect maar is ook de langste weg.

De rol van regelgeving is goed ingeschat. Meadows noemt deze als laatste omdat – ook of zelfs de politiek – regelgeving pas inzet als systemen zonder, duidelijk ontsproten. De rol van regelgeving in energiebeleid en -gedrag wordt duidelijk bij het latere onderdeel over de aardgastransitie.

### **Meadows versus Ackoff**

Het interessante is dat Meadows een heel erg een mathematische weg kiest. En Ackoff het gebruik van systemen meer beschouwt als een managementstijl. Er zijn veel overeenkomsten waardoor ze elkaar aanvullen. De beginselen zijn hetzelfde (elementen, samenhang en doel), maar Ackoff gaat gelijk methodisch verder richting verbetering en verandering. Meadows wijst juist op de onveranderlijkheid van – met name – maatschappelijke of economische systemen. Waarbij zij meer in de richting van een soort 'natuurwetten' gaat, die de verschijnselen wel beschrijven maar de aanpak ook op afstand houdt.

Het systeemdenken is voor mij als econoom een vertrouwd beginsel omdat economen nu eenmaal dol zijn op het vereenvoudigen van de werkelijkheid en andere factoren buiten beschouwing laten om een verschijnsel te beschrijven. Het is in veel gevallen met veel onbekenden ook – zo is mijn overtuiging – de enige manier om meer grip en begrip van complexe situaties te krijgen.

Vooruitkijkend naar het tweede deel van mijn opleiding, denk ik dat Meadows goede handvatten biedt voor systemen die autonoom moeten werken als het gaat om de gebouwde omgeving. Zij heeft veel situaties beschreven, waarbij in automatisering vanzelf de situaties (problemen) ontstaan die zij beschrijft.

Ackoff is praktisch als het gaat om complexe situaties te beschrijven waar de oplossing niet geprogrammeerd moet worden (automatisering), maar het een afwegingskader betreft waar mensen de keuze maken.



## Energie is de prijs van comfort

Deze uitspraak maakt bij gebouwen altijd direct duidelijk dat de energie in principe voor het verblijf is en niet voor het gebouw. Prijs is hierin overdrachtelijk en geeft goed aan wat energie aan een gebouw toevoegt.

Na de voorgaande introductie over gebouwen als systemen of (nog meer afgebakend) als energiesystemen kijk ik in dit hoofdstuk naar de rol van energie en energiebesparing, waarbij ik de indrukwekkende publicatie van MacKay volg. David J.C. MacKay was een gerespecteerde Britse hoogleraar natuurkunde en informatietechniek aan de Universiteit van Cambridge. Hij was ook hoofdwetenschappelijk adviseur van het Britse Department of Energy and Climate Change. MacKay stond bekend om zijn bijdragen aan de informatietheorie en duurzame energie. Zijn werk en onderzoek waren invloedrijk. Vooral zijn boek "Sustainable Energy – without the hot air", waarin hij complexe energievraagstukken toegankelijk maakte voor een breed publiek. Hij is overleden in 2016. MacKay's expertise en inzichten hebben een blijvende impact gehad op het debat over duurzame energie en klimaatverandering.

### Sustainable Energy – without the hot air

De publicatie Sustainable Energy – without the hot air, van David MacKay is een bijzondere publicatie. Het behandelt in bijna 30 hoofdstukken even zoveel specifieke thema's die met energiegebruik of opwekking te maken hebben in een generieke zoektocht naar: wat is nou waar en vooral ook: wat is significant. De eerste vijf hoofdstukken behandelen bijvoorbeeld:

1. Cars
2. Wind
3. Planes
4. Solar
5. Heating and cooling

Waarbij het voor MacKay steeds de vraag is: hoe verhoudt dit vraagstuk zich tot de totale energie van de UK. Zo maakt hij de auto, de windmolen, maar ook vliegen tot een maatschappelijk vraagstuk, waarbij een vaste grootte ook is om energiehoeveelheid niet alleen voor de UK uit te drukken, maar ook in de voor hem vaste rekeneenheid van kWh/p/d: kWh per persoon per dag. De eenheid kWh is hier een eenheid voor de hoeveelheid energie. Ik volg hem hier om kWh te gebruiken omdat dat voor veel mensen de meest bekende eenheid is. Veel bekender dan hoeveel een Joule of een calorie is. Veel hoofdstukken krijgen iets

humoristisch wanneer hij een oplossing als zonne-energie uitvergroet tot 'dé' oplossing en gaat rekenen hoeveel oppervlakte van de UK er dan voor nodig is, hoeveel beschikbaar en op welke manier dat dan gebruikt kan worden.

Deze thesis (in de vorm van een literatuurstudie) sorteert voor op de gedachte van een gebouw als energiesysteem. Ik zal, om een indruk te geven van de inhoud van MacKay, enkele hoofdstukken eruit lichten die betrekking hebben op huizen en huishoudens. Wat Mackay doet is: ingewikkelde vraagstukken en maatschappelijke dilemma's doorrekenen naar een goede verhouding die begrijpelijk is voor veel mensen. Veel grootheden, zoals het energiegebruik van de industrie of de vervuiling van de luchtvaart of de opbrengst van een windmolen, leiden tot getallen die geen verhouding meer hebben waardoor ze abstract zijn. Mackay vertaalt veel van die getallen naar de vergelijking van de energie van één persoon, één huishouden of heel de UK.

## Hoofdstuk 6 Solar

De basis is dat zonneshijn tot wel 1000W vermogen per m<sup>2</sup> geeft. Enkele voorwaarden: de m<sup>2</sup> is haaks op de zon (dus maximaal oppervlak), de kortste route door de dampkring en geen bewolking. Dus voor de zon in UK (of NL) zijn er wat correcties: hoeveel zon er overblijft en hoe deze energie te winnen. Zo'n 25% is te oogsten als elektriciteit (PV) en ook ongeveer zo'n percentage als warmte (thermisch).

Leuke toevoeging is dat MacKay er in dit hoofdstuk op wijst dat de zon niet alleen de bron is van ongeveer alle energie op aarde, maar ook de bron is die zorgt voor de basiswarmte (klimaat), daglicht, groei van gewassen, fotosynthese, kortom het leven.

Daarnaast is zonlicht ook nog een directe bron van energie. Energie die makkelijk te winnen is en moeilijk is op te slaan. Thermisch valt dat nog mee omdat je goed een buffervat kunt opwarmen en dan periodiek gebruiken voor warm water of verwarming. Zonder reguliere afname van deze warmte gaat het toch verloren omdat ook warmte slecht houdbaar is.

- o PV: de meest flexibele vorm van energie (met de hoogste exergie) is elektriciteit. Deze is direct op te wekken met zonlicht. In Nederland gedurende zo'n 1100 zgn. vollast-uren per jaar, dus 1 op 8 uren.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> 8760 uur in een jaar, zonuren 1400-1700 per jaar, corrigeren naar orientatie en helling zijn met doorgaans zo'n 1000-1100 vollasturen (productie-uren). Zie ook [ZonurenCalculator](#) of per station van KNMI [KNMI - Maandsommen zonneshijnduur, normalen, anomalieën](#)

- o Thermisch is de opbrengst nog hoger: handig voor warm water (verwarming is maar een deel van het jaar nodig, warm water elk seizoen). Beter op te slaan maar niet voor lang.
- o Biomassa: de zon gebruiken om gewassen te maken om te vergassen of te verbranden. Het kan wel, maar er zijn enorme hoeveelheden land nodig. Het voordeel van biomassa is dat het goed te bewaren is en dus ook te gebruiken als de zon niet schijnt of in het seizoen dat met name warmte nodig is in plaats van elektriciteit. Biomassa is overigens ook in Nederland nog steeds groter als bron van energie dan wind of zon met zo'n 40% van alle duurzame energie.<sup>17</sup>

Al met al is de zon dé energiebron van de wereld. Ook te gebruiken als directe bron, maar met mitsen en maren omdat verder van de evenaar de beschikbaarheid aan uren en seizoenen gekoppeld zit, waarbij de energiebehoefte goeddeels omgekeerd is met de beschikbaarheid van zon.

## Hoofdstuk 7 Heating and cooling

In dit hoofdstuk is direct al zichtbaar dat 2006 een andere tijd was, waarin er amper koeling nodig was en verwarming bijna geheel op hoge temperatuur ging. MacKay rekent tot verwarming de gehele behoefte aan warmte, dus warm water én verwarming. Hij gaat uit van het huishouden als entiteit. Een gebouw, zou je kunnen zeggen, met verschillende bewoners.

Wat grootheden die interessant zijn:

- Een bad kost zo'n 5kWh, een douchebeurt 1,5kWh.
- Thee en koffie ongeveer 1kWh per dag.
- Magnetron 0,5kWh en een oven 1,5kWh.
- Wasmachine, droger en vaatwasser hadden (toen) doorgaans het maximum vermogen. Daar zien we al een grote verandering: alleen de droger zit nog op 2500W maar vaatwasser en wasmachine gebruiken, behalve bij het opwarmen(kort), veel minder stroom.
- Al met al gebruiken we zo'n 12kWh per persoon voor warm water van alle soorten, het dubbele voor verwarming (24kWh, equivalent voor 850m<sup>3</sup> gas). En nog een beetje voor koeling (dat neemt nu snel toe).

<sup>17</sup> Zie overzicht CBS van hernieuwbare energie naar water, wind, zon, aard, buitenlucht en dus biomassa [Hernieuwbare energie in Nederland 2022 \(cbs.nl\)](https://www.cbs.nl/nl-nl/indicatoren/energie/hernieuwbare-energie-in-nederland-2022)

- Een volwassen man gebruikt per dag zo'n 2500 kilocalorieën, bijna gelijk aan 3kWh.
- Een m<sup>3</sup> aardgas geeft voor bijna 10kWh aan warmte om cv-water te verwarmen.
- Met 100km rijden met een personenauto, gebruik je zo'n 50-70kWh aan benzine óf 17kWh aan stroom (dit is waarom elektrische auto's zoveel duurzamer zijn).

Mackay rekent met 37kWh energie per dag voor warm water, verwarming en koeling. Als je dit omrekent naar alleen gas dan komt het op bijna 1400 m<sup>3</sup> gas per persoon per jaar. Dat is meer dan voor alleen huishoudens. Hierin zit ook de warmte voor werk, school en publieke plaatsen. Ter vergelijking: voor transport (personen en vracht) gebruiken we in Nederland ongeveer 2x zoveel energie.

### Hoofdstuk 9 Licht

Mackay rekent met 4kWh/dag voor verlichting per persoon. Wat typisch voor zijn aanpak is, is dat hij met de nodige aannames komt tot een (geschat) totaal, waarbij dan ook straatverlichting en verkeerslichten zijn inbegrepen. Interessant is dat hij er ook een tabelletje bij heeft met verschillende soorten verlichting en hun capaciteit in lumen/Watt. Daar is zichtbaar dat er wel inmiddels grote innovaties zijn bereikt: LED is in 2006 nog wit en zo'n 35 lumen/Watt. Inmiddels heeft LED alle kleuren en is de lichtopbrengst zomaar 100 lumen/Watt.

### Hoofdstuk 11 Gadgets

Een uiterst gemakkelijk hoofdstuk dat gaat over kleine en stille gebruikers en tegelijk ook over de meeste stekkers in huis. In de UK is een campagne geweest om opladers uit het stopcontact te halen. Met als argument: je doet wat je kunt en 'alle beetjes helpen'. MacKay verzet zich hiertegen. Hij zegt: "dit lijkt alsof het uitmaakt maar het houdt de aandacht af van waar het om gaat". Hij vergelijkt dit met het hozen van de Titanic met een theelepeltje. Waar het wél om gaat is dat je met de opladers soms dichtbij apparaten bent die vaak níet uitgaan, maar wel een veelvoud verbruiken: printers, computerschermen, computers, televisies, versterkers, dvd-spelers, decoders... dat gaat vaak 10-50x zo hard als een telefoonlader.

Dit is een opmaat naar sluimergebruik waarbij Mackay een tabel presenteert met gadgets en stroomgebruik bij aan, aan maar niet actief, standby en uit. Verrassend genoeg is de versterker de grootste gebruiker als deze uit staat.<sup>18</sup>

## Hoofdstuk 21 smarter heating

Mackay drukt het warmteverlies van een huis uit in een eenvoudige formule:

$$\text{Energieverbruik}^{19} = \text{GTV} \times \text{WVG} / \text{EVS}$$

GTV = gemiddeld temperatuurverschil (graden K)

WVG = warmteverlies gebouw (ook wel warmteverlies coëfficiënt in kWh/d)

EVS = Efficiëntie van verwarming (percentage van effectieve warmteomzetting)

De GTV wordt beïnvloed door de buitentemperatuur en natuurlijk ook door de binnentemperatuur.

Verwarming is gelijk aan de warmteverliezen van een gebouw. Het is alleen wel andersom denken. Meestal is de vraag: hoeveel energie (gas) stop je in je huis. Maar het is – bijvoorbeeld om te zien waar je kunt besparen – heel interessant om te kijken waar verlies je energie in je huis? De beide grootheden zijn over een jaar gelijk. Maar ze richten de aandacht en de actie op iets anders. Dit is precies de reden dat veel mensen meer gericht zijn op anders opwekken dan op energie besparen.

Mackay doet iets interessants door hier met warmteverliezen een basis voor zijn berekeningen te leggen: hij drukt het energielek van het huis uit in kWh/d/graden C, dus in energie per dag per graad verschil tussen buiten en binnen. En dan zijn er drie manieren om dit te beïnvloeden: de binnentemperatuur, de buitentemperatuur en de mate waarin het huis 'lek' is.

## Hoofdstuk 22 Efficient electricity use

Hier komt Mackay op één van mijn stokpaardjes door te analyseren: de apparaten uitzetten die je niet gebruikt en wel aan staan. Mackay onderzocht eerder gadgets maar hier gaat het om sluimergebruik van apparaten die vanzelf helemaal niet uitgaan. De vraag is: hoeveel stroom gebruiken ze als ze niet in bedrijf zijn? De inschatting (toen) is dat het standby gebruik ongeveer 8% van het elektriciteitsgebruik in de UK was. Dat percentage zal, met steeds meer apparaten

<sup>18</sup> Blz 70 Sustainable Energy - wtha

<sup>19</sup> "Elektriciteitsgebruik" gaat over hoe elektriciteit wordt toegepast, terwijl "elektriciteitsverbruik" meer gericht is op de hoeveelheid elektriciteit die daadwerkelijk wordt geconsumeerd. Deze termen komen vanwege dit onderscheid beide voor.

en een explosie van het aantal adaptertjes in huis (gebruiken allemaal stroom en maken warmte), op z'n minst verdubbeld zijn. Het totale elektriciteit gebruik per huishouden daalde ondertussen (LED, zuiniger witgoed etc.). Dus het is een factor van betekenis aan het worden.

Zijn eigen conclusie is dat (sinds hij het meet en er actie op onderneemt) zijn elektriciteitsgebruik gehalveerd is.<sup>20</sup>

## Hoofdstuk 26 Fluctuaties en opslag van energie

Elektriciteit kan niet in het net worden opgeslagen. De levering moet gelijk zijn aan de afname. Door de grote getallen en variatie van huishoudens, kantoren en industrie is er een goede verdeling waarmee het een voorspelbaar patroon is. Daar komt nu een nieuwe onvoorspelbaarheid bij: de fluctuaties van duurzame opwekking (snelle variatie in zon en wind) waarmee een steeds groter deel van het stroomaanbod hard toe- en afneemt. Mackay becijfert de impact waarbij hij gegevens van Ierland extrapoleert naar UK. Deze vergelijking gaat niet helemaal goed omdat de maximale vermindering van windenergie van Ierland vermoedelijk een veel kleiner gebied betreft dan de windenergie rond de UK. De grote getallen en het aan elkaar knopen van netwerken helpen om de verschillen te beperken. Stormen trekken over en een groter gebied laat een gelijkmatiger verloop zien.

Datzelfde geldt voor zonne-energie waar half bewolkt lokaal snel wisselt van 100 naar 10% opwekking en dit over een groter gebied uit middelt naar bijvoorbeeld 60%.

Toch blijft onbalans een probleem. Met name omdat voor alle niet duurzame opwekking geldt, dat deze minder snel bij- en afgeschakeld kan worden. Dit aspect was er altijd al, waarbij alleen grote energiegebruikers hier zicht en invloed op hadden door hun contractvorm. Maar met 1,5 miljoen gebouwen, die ook energie leveren (PV op dak), komt dit direct in beeld tot bij de consument. Het is inmiddels zichtbaar in particuliere contracten (dynamisch contract). Duidelijk is te zien dat, wanneer er opwekking met zonnestroom is, deze elektriciteit een lage prijs (waarde?) heeft.

Mackay rekent met twee situaties:

1. Lange periodes van flauwte (met name wind omdat die meer varieert dan zon).

<sup>20</sup> Een interessant gegeven omdat ik herken uit de praktijk dat inzicht tot heel veel verbetering kan leiden: met percentages besparingen van 35-50%. Waar Milieucentraal heel voorzichtig is met het effect van energiemonitoring. Zij schatten een besparing van 15%.

2. Grote fluctuaties in aanbod of vraag van energie die opgevangen moeten worden.

Voor een deel kan het aanbod flexibeler worden gemaakt maar niet zonder kosten van 'standby' van centrales. Voor een ander deel en de korte termijn is opslag van energie de oplossing. Het probleem als je gaat rekenen aan opslag van elektriciteit is dat vrij snel zichtbaar is dat de hoeveelheden onwaarschijnlijk veel ruimte gaan vragen. Mackay rekent door hoeveel hoge oppervlakte stuwmeer nodig is (in km<sup>2</sup>) om flexibel te schakelen om waterkracht als opslag te gebruiken (als er stroom is: pompen, als er stroom nodig is: opwekken). De cijfers zijn achterhaald (ze worden alleen maar groter door verdere elektrificering) maar het geeft wel de omvang van het vraagstuk aan.

Mackay kijkt ook over de grens: wat zijn andere manieren om hier mee om te gaan? Noorwegen heeft substantiële hoeveelheden waterkracht die heel snel zijn bij- en af te schakelen. Daarmee kan het snel grote verschillen opvangen. De Denen hebben veel windenergie in een beperkt gebied en daarmee hetzelfde probleem. Denemarken is een klein land en lost dit op door grote verbindingen met andere landen waarmee ze vraag en aanbod uitmiddelen zonder grote capaciteit standby te houden.

Ook met de opslag van batterijen van auto's is gerekend door Mackay. Dit doe ik hier even over en voor Nederland omdat de cijfers van 2006 teveel van de werkelijkheid afwijken. Het gemiddeld elektriciteitsgebruik van Nederland is 120 miljard kWh per jaar, dat is ongeveer 330 miljoen kWh per dag (= 330GWh/d).

Op dit moment hebben we bijna 500.000 elektrische auto's met een accu van gemiddeld 50kWh. Als al deze accu's vol zijn, dan is dat 25 miljoen kWh, dat is nog geen 2 uur van het elektriciteitsgebruik van Nederland. Nou zijn deze accu's gemiddeld niet vol en er zijn ook nog auto's onderweg en niet aan de lader. Dus de beschikbare capaciteit zal nu misschien een kwartiertje zijn: 1% van één dag consumptie (indien de technische oplossing om ook weer stroom aan auto's te onttrekken voorhanden zou zijn).

Dit eenvoudige rekenvoorbeeld geeft de complexiteit van het opslag vraagstuk weer waarmee ook de druk toeneemt om vooral niet de verschillen in aanbod en vraag geheel op te vangen in het systeem. Een belangrijk deel, waarschijnlijk veel groter, kunnen we opvangen in het gebruik.

### Effecten van onbalans, opslag en saldering

Voor mijn onderzoek is er een relevant afgeleid gegeven: in alle gevallen zal de prijs uiteindelijk waarschijnlijk toch de waarde van de energie gaan weergeven. Waarmee zonder twijfel (na saldering) zonnestroom opwekken om terug te

leveren financieel niet interessant is en er momenten zijn waarop je heel snel op energie kunt besparen door zo min mogelijk af te nemen omdat de prijs dan hoog is.

Het voordeel van de prijs als mechanisme is dat dit sturend werkt op gedrag, waarmee vraag en aanbod 'vanzelf' convergeren. Ander voordeel is dat de prijs en de prijsverschillen een economische basis leggen onder innovaties (investeringen) om op grote én op kleine schaal energie op te slaan. Zodra de saldering er af is ontstaat direct een markt voor de thuisbatterij. De thuisbatterij én smart grid opties (waarbij ook de batterij van de auto een rol speelt).

### **Kernprobleem "elektrificeren"**

Elektriciteit is ideaal: het is de meest flexibele vorm van energie. Elektriciteit is de meest hoogwaardige energiedrager. Waarover straks meer... De hoogwaardigheid van elektriciteit komt doordat deze in alles is om te zetten: in beweging, warmte en licht. In de Nederlandse situatie is er nog een relatief voordeel want verwarming verbruikt er een groter deel van de energiebehoefte dan koeling. Elektriciteit in een warmtepomp wordt gebruikt als hulpenergie en deze wordt uiteindelijk omgezet in/toegevoegd aan de warmte die uit een andere bron onttrokken wordt.<sup>21</sup>

Verder is elektriciteit makkelijk op te wekken met zonnepanelen of windmolens, ook in grote hoeveelheden. Tegelijk is er een groot nadeel van elektriciteit: het is niet houdbaar en het is moeilijk op te slaan. In ieder geval in grote hoeveelheden. Een eenvoudige verhouding: de accu van een Tesla vul je in 30 seconden met een windmolen op zee. Dus als het een dag lekker waait vul je 3000 Tesla's met die ene windmolen. Deze accu capaciteit zou wel 60 miljoen kosten, ongeveer 5x zoveel als de molen zelf. Om één dag productie op te slaan.

Dit is precies de reden dat wordt gekeken naar alternatieve manieren van het opslaan van elektriciteit, bijvoorbeeld in waterstof. Ook duur maar beter schaalbaar. In het volgende deel gaan we in op de waarde van energie. De vraag van de waarde van energie zou minder een rol spelen als we permanent de beschikking zouden hebben over voldoende elektriciteit. Dan zou er nog een distributieprobleem overblijven maar dat probleem is veel kleiner dan het opslag probleem.

---

<sup>21</sup> Bij koeling is dat andersom. Of eigenlijk net zo: bij de warmte van de door koeling onttrokken energie komt de elektriciteit op.



## Samengevat over Mackay

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de rol van energie en energiebesparing door de lens van David J.C. MacKay's invloedrijke werk "Sustainable Energy – without the hot air". MacKay onderzocht de energievraagstukken met een nuchtere en wetenschappelijke benadering waarbij hij de lezer meeneemt op een reis door diverse energiebronnen en hun potentieel voor het Verenigd Koninkrijk. Zijn methodische aanpak om energiegebruik en -productie in begrijpelijke eenheden (kWh per persoon per dag) te vertalen heeft de complexe discussie rondom duurzame energie voor een breder publiek toegankelijk gemaakt. Hij benadert elk onderwerp met een kritische blik waarbij hij de maatschappelijke implicaties van energiegebruik belicht en de lezer uitnodigt om na te denken over de werkelijke impact van verschillende energieoplossingen. Bijzonder is zijn vermogen om de potentie van zonne-energie te ontleden waarbij hij niet alleen de technische uitdagingen en mogelijkheden beschouwt maar ook de fundamentele rol van de zon in het ondersteunen van leven op aarde en het direct aanleveren van energie.

MacKay's discussie strekt zich uit tot de huishoudelijke consumptie waarbij hij de energiebehoeften van verwarming, koeling en dagelijks gebruik in huizen analyseert. Zijn gedetailleerde berekeningen over het energieverbruik voor alledaagse activiteiten zoals baden, koken en het gebruik van gadgets onthullen verrassende inzichten in ons energiegebruik en de mogelijkheden voor besparing.

Een van de belangrijkste thema's die MacKay aanroert is de noodzaak van een intelligenter verwarmingssysteem en de efficiëntie van elektriciteitsgebruik. Door het warmteverlies van huizen te kwantificeren en de inefficiënties van sluimergebruik van apparaten te belichten onderstreept hij de potentiële energiebesparingen die behaald kunnen worden door bewuster om te gaan met energie. Dit is een belangrijke bron van inspiratie om complexe vraagstukken (de energiehuishouding van een gebouw) naar begrijpelijke verhoudingen te beschrijven. Dat is mijn ambitie voor deel 2.

MacKay adresseert ook de complexiteit van energieopslag en de uitdagingen van fluctuerende duurzame energiebronnen. Zijn analyse van de capaciteit van elektrische auto's als energieopslag biedt een realistische kijk op de beperkingen en mogelijkheden van huidige technologieën. Dit leidt tot een bredere discussie over de waarde van energie en de economische en technologische innovaties die nodig zijn om een duurzame energietoekomst te realiseren. MacKay's nalatenschap is een waardevolle bron voor iedereen die geïnteresseerd is in de complexiteit van duurzame energie en de uitdagingen die voor ons liggen op weg naar een groenere toekomst.

## Energie, exergie en de aardgastransitie

Voor veel mensen zal de middelste term de grote onbekende zijn in de titel van dit hoofdstuk. Bij energie hebben we een beeld en ook bij de aardgastransitie maar exergie... wat is exergie? Een handboekje uit 1998, geschreven door Willem van Gool, geeft hierop antwoord maar ook uitleg en toepassingen. Het is een heel relevant begrip en toch zo onbekend.

Eerst een korte uitleg. Exergie is simpel gezegd de waarde van energie. In het water van een ligbad dat te koud is geworden (bijvoorbeeld afgekoeld tot 35 graden) zit nog wel zo'n 4kWh aan energie. 4kWh aan stroom is genoeg om een gewone thuisbatterij helemaal te vullen, om 50km met een elektrische auto te rijden, 50 liter thee te zetten of een kwartier te douchen. De hoeveelheid energie is gelijk maar de waarde van het afgekoelde badwater is zo gering dat we het gewoon wegspoelen, terwijl we een accu bestellen om 4kWh zonnestroom op te slaan. En misschien buiten wel een Prius-plug-in aan de stekker hebben om die 4kWh te laden waarmee we heel voordelig rijden. De ene 4kWh is dus de andere niet. Puur omdat we er niet hetzelfde mee kunnen.

Dit is een interessant gegeven, zeker voor economen. Exergie is dus wel een waarde maar niet de prijs van energie. De prijs hangt samen met beschikbaarheid (vraag en aanbod) en is dus een afhankelijke van de markt. Als er geen markt is, is er geen prijs. Maar dat verandert niets aan de waarde, toepasbaarheid of exergie van een energiedrager of -vorm. Een ander bijzonder onderscheid is dat de exergie te berekenen is. Dat is bijzonder: de toepasbaarheid, als grootte om de mogelijkheid tot omzetting van de energie in kracht is te berekenen. En hangt dus ook niet af van marktomstandigheden, overvloed of tekort. Die is natuurkundig gezien altijd gelijk. Voor economen is dit moeilijk te verteren: de waarde hangt immers zeker ook af van de beschikbaarheid: kun je er aan komen. Zo zie je dat elektriciteit de hoogste exergie heeft (meest toepasbaar) maar in de tijd heel erg kan verschillen in waarde (prijs). Wat enkel afhankelijk is van de beschikbaarheid. Een overvloed kan zelfs zorgen voor een negatieve prijs (onbalansmarkt). Dat is een eigenschap die bij kolen minder gauw voorkomt. Bij gas is het recent eens geweest door een tekort aan opslagcapaciteit van LNG in combinatie met een overschot aan productie waarbij termijncontracten tot tekorten leidden, waardoor er een negatieve prijs was voor het afnemen van gas. In corona is iets soortgelijks met olie gebeurd. Toen was even de olie prijs negatief: je kreeg dus geld om olie af te nemen. Je moest het alleen wel direct afnemen (wat fysiek nog niet zo eenvoudig is om op grote schaal te doen).

## Waarom is exergie als waarde eigenlijk relevant?

Het boek van Van Gool is in de opleiding wel genoemd maar behoorde niet tot de verplichte literatuur. Ik ben in exergie geïnteresseerd geraakt doordat we in de verduurzaming van gebouwen heel veel bronnen gebruiken en deze verschillen in prijs, beschikbaarheid en mogelijkheden maar eigenlijk hebben we er niet zoveel beeld bij. Een lucht-water-warmtepomp gebruikt relatief weinig elektriciteit om zoveel mogelijk warmte uit (koude) lucht te halen en die warmte op te waarden en daarvan dan CV water te maken van 50 graden Celsius. Koude lucht is dus steeds meer een bron van warmte. Waar elektriciteit als hulpenergie een voorbeeld is van energie met de hoogste exergie en koude buitenlucht ongeveer het omgekeerde. Behalve omgevingslucht is er in onze maatschappij ook veel restwarmte, bijvoorbeeld van productieprocessen. De vraag is of we daar wat mee kunnen. Nu wordt er nog erg gedacht aan de directe toepassing: restwarmte uit de industrie rond de Rotterdamse haven gaat een warmtenet vullen voor de zuidelijke randstad. Maar dit wordt nog niet gezien als bron van warmte als alternatief voor bijvoorbeeld een warmtepomp. Het verschil tussen beide is dat restwarmte als warmtenet de warmte moet leveren als eindproduct. Als het een bron zou zijn, zou het een halfproduct zijn, waar lokaal nog een omzetting plaatsvindt om het op te werken naar bijvoorbeeld een midden temperatuur.

Een ander voorbeeld in het klein waar we de ene bron (gas) gebruiken voor warmte en de andere bron (benzine in de auto) voor kracht. En dus de auto koelen en de lucht verwarmen: 70% van de energie uit benzine wordt omgezet naar warmte en die koelen we met buitenlucht. Veel huizen met een auto voor de deur zouden prima de hele winter kunnen verwarmen op de warmte die door de auto geproduceerd wordt.<sup>22</sup> Een fractie van de warmte gebruiken we in de winter voor de verwarming van de auto, maar het meeste (bijna alles hiervan) gaat verloren.

Zouden we het maar kunnen meenemen... opslaan... bewaren. Dan zouden we kunnen rijden en stoken op aardgas óf benzine, in plaats van dat we beide nodig hebben.

## Energie in tijd en plaats

Als energie alleen ging over opwekking en efficiënt gebruik van energie, dan hadden we geen verduurzamingsprobleem. Het probleem is dat tussen opwekking en gebruik nog opslag, distributie en omzetting zitten. Zowel voor opslag en omzetting is essentieel wat je overhoudt. Langzaam ontdekken we

<sup>22</sup> Een auto die in een jaar 20.000 km rijdt, met een verbruik van 1:14, gebruikt zo'n 1430 liter benzine. 70% daarvan wordt bij verbranding omgezet naar warmte, dat is dus zo'n 1000 liter. Daarin zit 34GJ energie, net zoveel als in 950 m<sup>3</sup> aardgas, wat voldoende is voor verwarming en warm water van een moderne eengezinswoning.

bronnen met een lage waarde zoals buitenlucht, oppervlakte water, warmte uit ventilatielucht en restwarmte van industrie als waardevolle input. Tegelijk is er een enorme focus op 'elektrificeren'. Hoeveel energie je uit deze bronnen haalt, is eenvoudig uit te drukken in kWh, wat ook de eenheid voor de hoeveelheid elektrische energie is. Maar in exergie (de toepassing) zijn ze elkaars tegengestelden. Met warmte van het buitenwater kun je bijna niks en met elektriciteit kun je bijna alles. Buitenlucht is heel beperkt om te zetten maar bijna onbeperkt beschikbaar en bij elektriciteit is opwekking, distributie en opslag beperkt maar kun je het naar alles omzetten.

Exergie is voor gebouwen relevant omdat ze in beschikbaarheid en toepasbaarheid ongeveer elkaars tegenpolen zijn. Daarom is voor mij is de vraag: wat kunnen we, met exergie als basis onder de toepasbaarheid en beschikbaarheid van energie, meenemen in de afweging hoe we omgaan met energiegebruik en -verliezen in gebouwen.

De ene energie is de andere niet: "*Exergie is de waarde van energie*", zegt Van Gool.<sup>23</sup> Voor mij als econoom loopt dat dwars door een ander begrip van waarde heen: de waarde bepaald door vraag en aanbod, of anders gezegd door schaarste. Hierop kom ik later terug. Eerst meer over exergie. Er zijn heel veel manieren om exergie te beschrijven. Een paar beschrijvingen:

### Definities van exergie:

- Een oudere definitie aan te houden: exergie is de toepasbaarheid van energie. Dat verhoudt zich ook eenvoudig tot het voorbeeld. De toepassingsmogelijkheden van warmte uit een afgekoeld bad zijn beperkt. Zo beperkt dat we de warmte gewoon met het water laten weglopen.
- De eerste definitie van exergie is van voor het begrip: toen (1873) beschreef Gibbs exergie als 'availability'.<sup>24</sup> Dit begrip is gerelateerd aan het idee van de maximale nuttige arbeid die kan worden verkregen uit een thermodynamisch systeem in een gegeven toestand in relatie tot een bepaalde omgeving.
- In hoofdstuk 1 maakt Van Gool de definitie compleet:

<sup>23</sup> Van Gool, W. 1989 (nieuwe druk 1998). Van Gool ESE Consultancy, Driebergen, inleiding, pag VI.

<sup>24</sup> geïntroduceerd door Josiah Willard Gibbs in 1873, exergie is een fundamenteel concept in de thermodynamica, met name in de studie van energieomzettingen en -efficiëntie.

Exergie van een *materiaal* of energiedrager is de maximale hoeveelheid *werk* die kan worden verkregen als dat materiaal of die energie met een reversibel proces wordt *omgezet* naar een inerte referentietoestand.<sup>25</sup>

- o Exergie is een eigenschap van materiaal zoals ijzer of een energiedrager zoals aardgas.
- o Werk en warmte zijn de basisconcepten uit de thermodynamica. Waarbij werk altijd is om te zetten in warmte, maar warmte niet altijd in werk. De hoeveelheid werk is dus de mate waarin exergie gemeten wordt bij de omzetting van een materiaal of energiedrager. Werk is de mogelijkheid om energie om te zetten in beweging. Met warmte is beweging te maken. Met een groter temperatuurverschil is meer beweging te maken dan met een kleiner temperatuur verschil. Dit is het verschil is de exergie.

Zo komen we met de definitie en beschrijving van exergie terecht bij de eerste en de tweede hoofdwet van thermodynamica:

- Eerste hoofdwet: 'wet van behoud van energie'. Energie kan worden omgezet maar gaat niet verloren. De som van de energie voor en het totaal na omzetting blijven gelijk.
- Tweede hoofdwet: 'omzetting van energie leidt tot verliezen'. Elke omzetting van de ene in andere energie leidt tot verliezen. Bijvoorbeeld in de vorm van warmte die wordt afgegeven aan de omgeving.

Exergie gaat over de mate waarin de energie (ná omzetting) nog te gebruiken is voor andere doeleinden. Hoe minder toepassingsmogelijkheden hoe lager de exergie, de availability, de beschikbaarheid of de waarde van deze energie.

Een belangrijk gegeven bij de berekening van exergie is de entropie. Entropie is te definiëren als de mate van chaos. Een eenvoudig voorbeeld hiervan is dat als in een tank een schot twee gassen gescheiden houdt, het verwijderen van dit schot altijd zal leiden tot het mengen van de gassen en dat gemengde gassen niet 'vanzelf' weer zullen scheiden. In veel natuurlijke processen is er een natuurlijke richting die niet makkelijk omkeerbaar is. Hoofdstuk 2 van Van Gool gaat hier dieper op in, wat voor deze thesis te ver voert om te refereren. Het verschijnsel (kwaliteit) is hierin belangrijker dan de mate (kwantiteit).

Van Gool beschrijft de verschillen in het gebruik van aardgas heel specifiek en precies in een verhouding die te denken geeft.<sup>26</sup> Aardgas heeft een hoge verbrandingswaarde. Als daarmee een materiaal verwarmd wordt naar 1200

<sup>25</sup> De toevoeging reversibel en inerte referentietoestand zijn essentieel voor de condities volgens natuurkunde en thermodynamica, maar voor ons voert uitleg hiervan te ver en is het belangrijkste dat het gaat over hoeveel 'werk' er kan ontstaan door een omzetting van de energie, bijvoorbeeld door verbranding.

<sup>26</sup> Hoofdstuk 3.10 exergie matching

graden Celsius dan is nog 80% van de warmte over. Stoomturbines (bijvoorbeeld voor opwekking van elektriciteit) werken op een warmte van rond 550 graden Celsius waar nog 65% exergie over is. Aangezien dat percentage aangeeft wat de maximale hoeveelheid nuttig werk is dat overblijft hangt dit getal direct samen met het rendement van een centrale die deze stoomturbines gebruikt. Verliezen van 35% zijn hoog maar vallen in het niet als we zien dat er bij water van 90 graden Celsius al 85% verlies is. En als aardgas gebruikt wordt voor het warmhouden van een huis (op een lagere temperatuur) dan daalt de exergie naar minder dan 10%. Dat zelfde geldt voor de optimale verwarming van gebouwen met een lagere temperatuur (bijvoorbeeld 60 graden Celsius). De hoogrendementsketel haalt hier een rendement van bijna 100% maar de exergie is een fractie hiervan. Voor het tweede deel van de studie is hiervan de vraag wat dit betekent en of dit anders kan.

## De vorige transitie: aan het gas.

Sven Ringelberg heeft een alleraardigst leesbaar overzicht geschreven van een periode van 60 jaar aardgas in Nederland. Nu is het een periode maar het zal niet lang duren of we kijken daarop terug als een tijdperk. Een afgesloten periode waarin zaken anders en vanzelfsprekend waren en waarvan de feiten en de zekerheden volledig veranderen.

Zal het aardgas-tijdperk net als de koloniale periode tot een ondenkbaar verleden gaan behoren? Of blijft het dichterbij ons. Ringelberg beschrijft zeer accuraat het verloop van de vondst van aardgas in de zoektocht naar olie. Waarbij toen – en nog heel lang – dat aardgas naar huidige normen niet op waarde geschat werd. Helder werd dat het veel was, heel veel. Maar de waarde was nog niet helder. Dat had initieel natuurlijk ook alles te maken met het gegeven dat het transport/de beschikbaarheid van gas anders is dan van olie. Het verspreidde zich het best via vaste distributie (leidingen) en niet als vloeibare brandstoffen in eenvoudige tanks.

Qua kenmerken zien we nu grote overeenkomsten met voor het aardgas zelfs grote voordelen voor veel doeleinden ten opzichte van andere brandstoffen. Het is met name erg schoon: verbranding leidt tot waterdamp en CO<sub>2</sub> met weinig roet en fijnstof.

De waardering daarvoor heeft lang geduurd. Er is veel aan de overtuiging gedaan om mensen om te krijgen naar het gasnet in plaats van de kolenkit. Met argumenten die we ons haast niet kunnen voorstellen hielden mensen vast aan hun kolenkachel. Precies dit onderdeel is echt interessant omdat we achteraf de bijzondere gedachtegangen zien die ons haast ongeloofwaardig overkomen. En we kunnen het allemaal beoordelen omdat we allemaal zijn groot geworden met gasgestookte woningen, kantoren en restaurants.

Dat is dan ook de grootste verandering waar we nu 3 generaties aan gewend zijn: we verwarmen de gebouwen en niet de mensen. Een gewoonte die hardnekkig zal zijn om te veranderen... Het kostte eerst nog moeite om met het voordeel dat er niet langer 1 verwarmde kamer per huis is, maar dat het hele huis verwarmd wordt, mensen om te krijgen. Nu gaan we voor een deel terug in de tijd. Steeds meer is helder dat niet ons energiegebruik een probleem is maar juist het verstoken van energie die we *niet* gebruiken. Ongebruikte kamers die verwarmd worden. Huizen die warm blijven als er niemand is. Kantoren waar op vrijdag de bezetting lijkt op zaterdag maar het stookschema is als donderdag... Het zijn de restverschijnselen van de propaganda dat we voor weinig het allemaal en overal warm kunnen hebben.

Het kon niet op. Het energiegebruik heeft een hele sterke relatie met de economische groei. Het gas en de hele snelle implementatie van de distributie

maakte in Nederland ook veel groei mogelijk. Niet alleen economische groei maar ook welzijn, comfort en gezondheid namen toe. En daarbij ook het energiegebruik. Er is een periode geweest waarin het de vraag was of we al dat gas wel op zouden krijgen. Toen zijn grote contracten gesloten waar Nederland voor hele lage prijzen gas onder meer aan Rusland verkocht. De periode waarin internationale leveringen de onderlinge afhankelijkheid van landen bevestigde: een situatie die weer helemaal paste bij het Europese en later het globale denken waarvan de gedachte was dat als we voldoende allemaal van elkaar afhankelijk waren er niemand meer behoefte zou krijgen aan gewapende conflicten.

De regionale conflicten in het Midden-Oosten (met name de oorlog tussen Irak en Iran) die de olielevering aan Europa bedreigde was met name een stimulans voor een groter netwerk, meer exploratie en meer olieproducerende landen. Nederland deed nog een beetje mee in gas- (Groningen) en olieproductie (Noordzee) hoewel dat steeds weer op en afschaalde als de wereldprijs voor olie weer onder de productieprijs op zee zakte.

Ringelberg beschrijft terecht hoe de Club van Rome een grote invloed heeft gehad al vanaf de jaren zeventig om energie te besparen. De oliecrisis gaf een extra zetje dat tekorten nog mogelijk waren. Maar het belangrijkste wat ontstond was dat in de jaren zeventig – eindelijk – regels kwamen om energie te besparen. Of anders gezegd: om met energie om te gaan als iets dat schaars is of kan worden. Dit is de periode waarin dubbelglas en isolatie in het bouwbesluit kwamen. Gevolgd door de jaren tachtig waar (opnieuw) in een moordend tempo bestaande bouw met een spouwmuur werden voorzien van isolatie. Gevolgd door de jaren negentig waar het milieu al wel belangrijk werd als begrip voor de leefomgeving maar CO<sub>2</sub> nog niet een eenheid was om de luchtkwaliteit te duiden.

De discussie over kernenergie was weer wat geluwd op het punt dat bestaande reactoren bleven en voor nieuwe geen ruimte was. Het afval was een probleem dat onoplosbaar leek. Wat nu de stikstofcrisis heet was toen de 'zure regen' waarbij foto's van verkommerende bossen en verzuring van grond tot zichtbare effecten leidde op de natuur. Nu is helder hoeveel er al bekend was maar ook is haast pijnlijk zichtbaar dat voor die informatie weinig ruimte was. Energie besparen was wel iets dat opkwam maar ondertussen nam de consumptie veel sneller toe dan de besparing. Ook hier zien we opnieuw het effect van de groeiende economie op het energiegebruik. Ringelberg plaatst dat al voor in zijn boek in een mooi kader door op eerdere energietransities te wijzen<sup>27</sup> en hun verband met economische groei en ontwikkeling. De jaren negentig was nog ruim voor de periode van de

<sup>27</sup> In zijn inleiding zet Ringelberg op een rij hoe eerste de beschikbaarheid van hout (1600), dan de transitie naar turf, speciaal in Nederland, vanwege de lokale beschikbaarheid, gevolgd door de kolentransitie (elders al na 1600, in Nederland kwam dit langzaam in de 19<sup>e</sup> eeuw).



vliedschaamte, de waterbesparende douchekop en de energielabels voor apparaten en gebouwen.

Een belangrijk gegeven is dat we moeten concluderen dat het met name de overheid was die ons tot verduurzaming aanzette. Met belangrijke nieuwe uitgangspunten in het bouwbesluit, met aanvullende heffingen op brandstof (het verguisde kwartje van Kok) en met regels – deels uit Brussel – die ons normen oplegde waar zeker in het begin weerstand tegen was. Alleen door regelgeving zijn stofzuigers nu niet meer 2500 Watt. Door subsidie zijn miljoenen huizen in de jaren 80 geïsoleerd en door belastingvoordelen is vroegtijdig elektrisch rijden een realistisch alternatief geworden. Hier komen we het effect dat Dana Meadows al beschreef voor systemen weer tegen. Eerst kijken we wat er gebeurt maar, als systemen uiteindelijk niet convergeren naar een gewenst niveau, komt er laat (of te laat) een vraag om regelgeving.

De overheid heeft een even grote rol gehad om ons áán het gas te krijgen als nu weer om wijken ván het gas te halen. Voorlichting, infrastructuur, prijsregulering en investering in publieke of collectieve voorzieningen en netwerken zijn noodzakelijk om letterlijk en figuurlijk de weg te plaveien naar duurzame bronnen en distributie van warmte en elektriciteit.

Ringelberg gaat tot slot in op juist deze publieke rol in de energietransitie en daarmee op de maatschappelijke energievoorziening.

In mijn vervolg zal ik meer ingaan op de micro-effecten van een energietransitie. Al met al kunnen we De Nederlandse Aardgastransitie niet rekenen tot de wetenschappelijke standaardwerken maar wel waarderen als een uitstekend leesbaar historisch en maatschappelijk overzicht van het aardgastijdperk.

## Tot slot

Deze thesis geeft een beeld van delen van de literatuur in dit geval zo specifiek mogelijk toegepast op gebouwen als energiesystemen. Dit laat delen van de informatie onbesproken. Dat is niet omdat deze minder interessant is maar vooral om vast voor te sorteren op de bedoeling van deze aanvullende opleiding om een uit het brede vakgebied van energiekunde een specifieke richting te kiezen en daar de diepte in te gaan.

Met mijn vak als energieadviseur gericht op verduurzaming van gebouwen wil ik juist in de richting van de gebouwde omgeving verder onderzoek doen.

In het traject om te komen tot deze eerste rapportage heb ik veel gehad aan de adviezen, opmerkingen en complimenten van mijn studiebegeleider Ronald Remijn. Hij heeft geholpen mij te beperken en gestimuleerd om gericht te verdiepen. Er zat meer tijd tussen het doornemen van de literatuur en het afmaken van dit document dan verwacht. Ik ben blij dat we in ieder geval een deel van deze tijd besteed hebben om een goede richting te kiezen – in dit geval gebouw als energiesysteem – en daar tot een gerichte rapportage te komen die voorsorteert op het vervolg.

Leiderdorp, 25 juli 2024

mr drs Huibrecht Bos

## Literatuur

Blok, Kornelis, (2020), Introduction to Energy Analysis. Amsterdam: Techne Press, 3<sup>e</sup> druk, ISBN 978-0-367-43481-6

Meadows, H., Donella H. Wright, Diana, Denken in Systemen (oorspr. Thinking in Systems A Primer, 3 Dec 2008), ISBN 978-9-025-91018-1

Ackoff, Russell L. (1999), Ackoff's Best, his classic writings on management, New York: John Wiley & Sons, ISBN 978-0-471-31634-3

Mackay, D.J.C. (2009), Sustainable energy Without the hot air, ISBN 978-1-906860-01-1

Van Gool, Willem, (1998), Energie en Exergie, Van Gool ESE Consultancy, Driebergen ISBN 90-804468-1-5

Ringelberg, Sven, (2021), De Nederlandse aardgastransitie. Lessen voor de energietransitie voor de 21<sup>ste</sup> eeuw, Utrecht, Academische Uitgeverij Eburon, ISBN 978-94-6301-328-4

mr drs J. Huibrecht Bos

# Het gebouw als energiesysteem

Literatuurstudie Energieconsulent PHOE

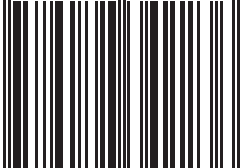


*Het gebouw als energiesysteem* verkent hoe gebouwen functioneren als geïntegreerde energiesystemen waarin geometrie, de kwaliteit van de thermische schil en installaties onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn. Tegelijkertijd speelt het gebruik van het gebouw een cruciale rol in de werkelijke energieprestaties en efficiëntie.

Door inzichten van systeemdenkers zoals Ackoff en Meadows te combineren met de pragmatische benadering van David MacKay, biedt dit boek een helder en toepasbaar kader voor het verduurzamen van de gebouwde omgeving. Het koppelt theoretische principes aan praktische strategieën, met thema's als exergie, energiebesparing en gedragsverandering.

Deze literatuurstudie laat zien hoe een gebouw niet alleen een energiegebruiker is, maar een dynamisch systeem dat energie kan bufferen, delen en optimaliseren voor de mensen die het gebruiken. Een interessante beschouwing voor iedereen die gebouwen wil begrijpen als actieve schakels in een circulair energiesysteem.

ISBN 978-90-78342-23-6



9 789078 342236

*Sinds 1883*

- uitgevers -

