



ENERGY STORAGE STRATEGIES

Comparative analysis of short term storage systems
for low quality heat in Dutch dwellings

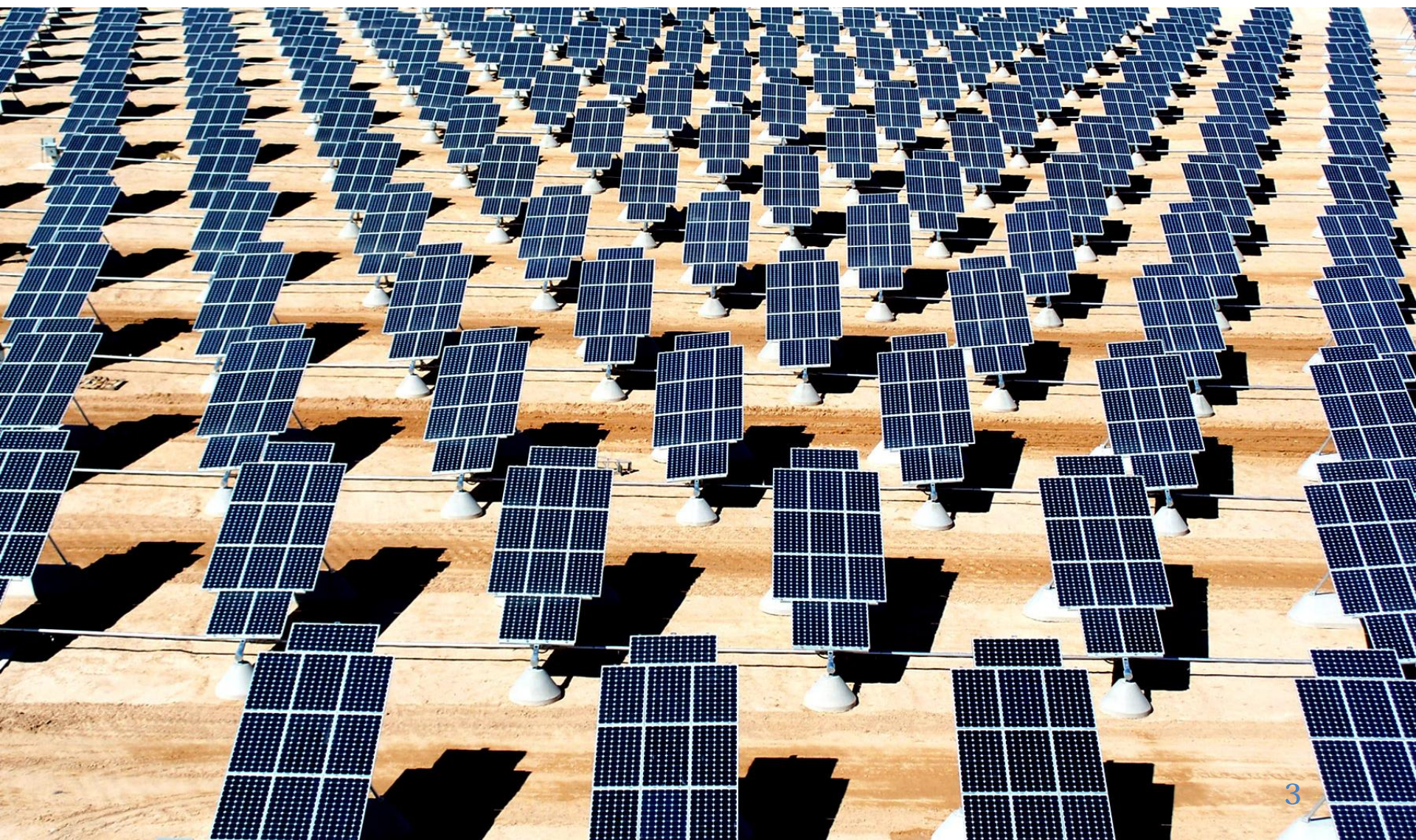
Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde
Architectural Engineering+Technology, Green Building Innovation
MSc 3/4 – Afstudeerpresentatie 30/10/2013

Student:	Martin van Meijeren, 1376101
Eerste mentor:	Prof. ir. P.G. Luscure
Tweede mentor:	Dr. ir. W.H. van der Spoel
Externe gecommiteerde	Ir. R. Binnekamp

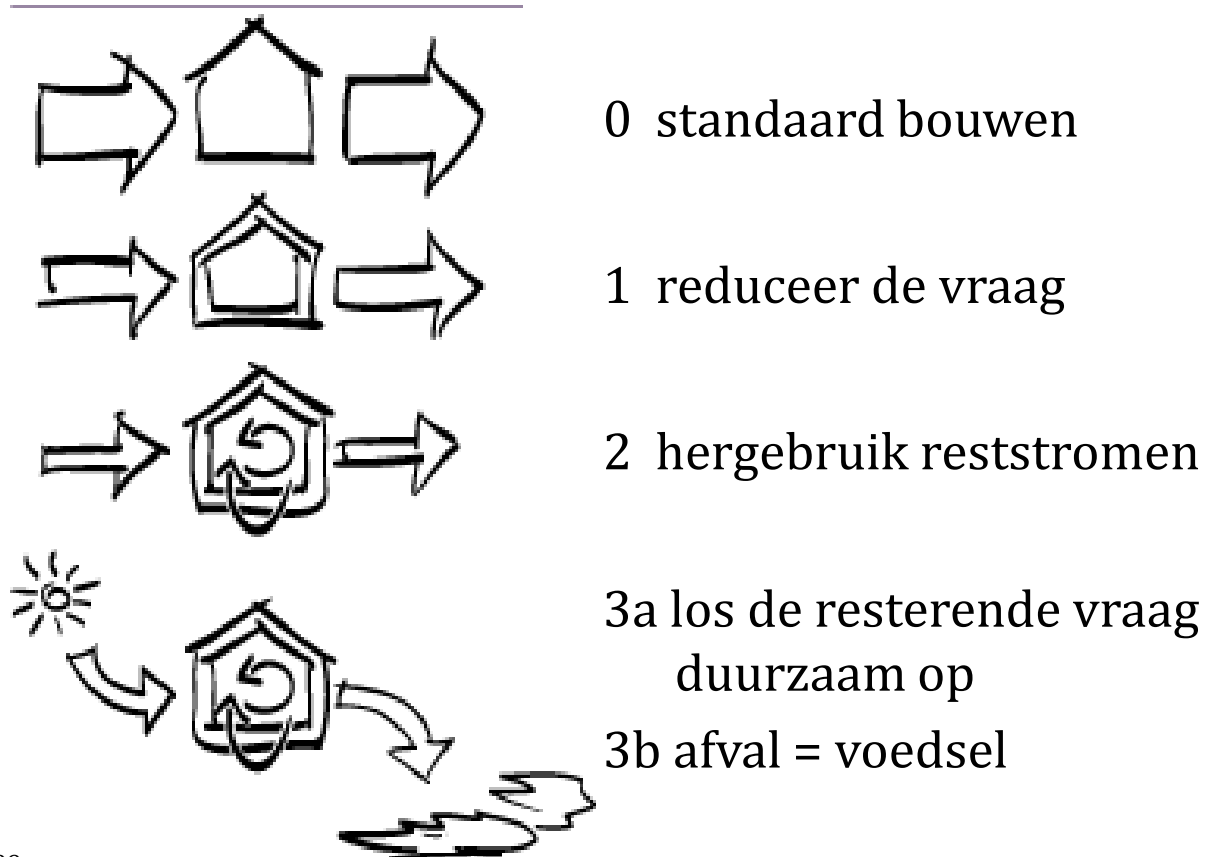
INHOUD

- Inleiding
- Literatuur
- Strategieën
- Resultaten
- Conclusie

INLEIDING RENEWABLES



INLEIDING NIEUWE STAPPENSTRATEGIE



Van den Dobbelsteen, 2009

INLEIDING RENEWABLES



wind



omgevingswarmte



zonnewarmte

OPWEKKING
generation

CONSUMPTIE
demand



hydro



restwarmte



INLEADING MISMATCH



Warm weather and high wind power output drove the German power prices into negative territory during the Christmas holidays. Photo: Scanergy

Negative power prices in Germany

Power users got paid as much as 473.82 euro/MWh in the morning on December 25, as exceptionally mild weather engulfed Germany. In Munich temperatures reached a record high of 20.7 degrees on Christmas Eve.



Steinar Aasen
Journalist

EEKS TEMP FORB HUSH VIND SOLK EONE RWE GER

Publisert: 27. December 2012, 08:42

Day-ahead power in Germany turned negative for the first time in at least five years, Bloomberg News reported. Utilities preferred to pay users rather than halt plants amid low demand, mild temperatures and higher-than-average wind generation.

Baseload next-day power price fell to minus 58.05 euro/MWh on December 25, with hour 8-9 priced as low as -473.82 euro/MWh. In comparison the the next-day power price on Saturday December 22 was +33.05 euro/MWh.

Utilities including Eon and RWE preferred to pay users rather than halt fossil fuel-fed plants as wind turbines and solar cells pushed power supply above demand.

"Operators may just decide to accept that they are giving away power and money during the Christmas week for a few hours rather than putting up with even higher costs for switching their units off," Juergen Rogalla, head of power plant operations at Stadtwerke Bielefeld GmbH, told Bloomberg News.

Intraday trading has increased in Germany as renewable energy creates more variability in the supply, and sources, of electricity throughout the day. Hourly prices have been negative depending on how much capacity is available when renewable generation peaks and there's a surplus of power.

INLEIDING PROBLEEMDEFINITIE

Most renewables do have an intermittent nature, causing a mismatch in time between energy generation and demand.

ENERGY STORAGE SYSTEMS

Mechanical
Energy Storage

Electric
Energy Storage

Chemical
Energy Storage

Thermal
Energy Storage

INLEIDING ENERGIEOPSLAG

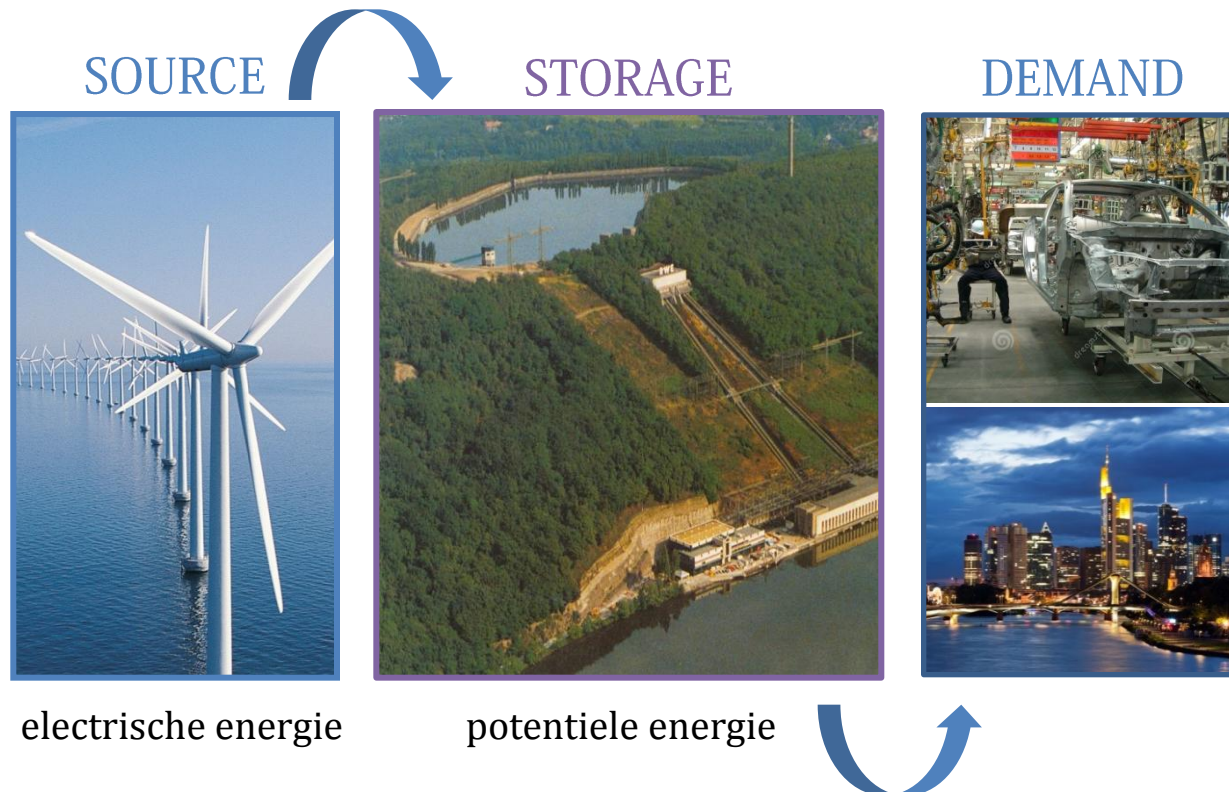
ENERGY STORAGE SYSTEMS

Mechanical
Energy Storage

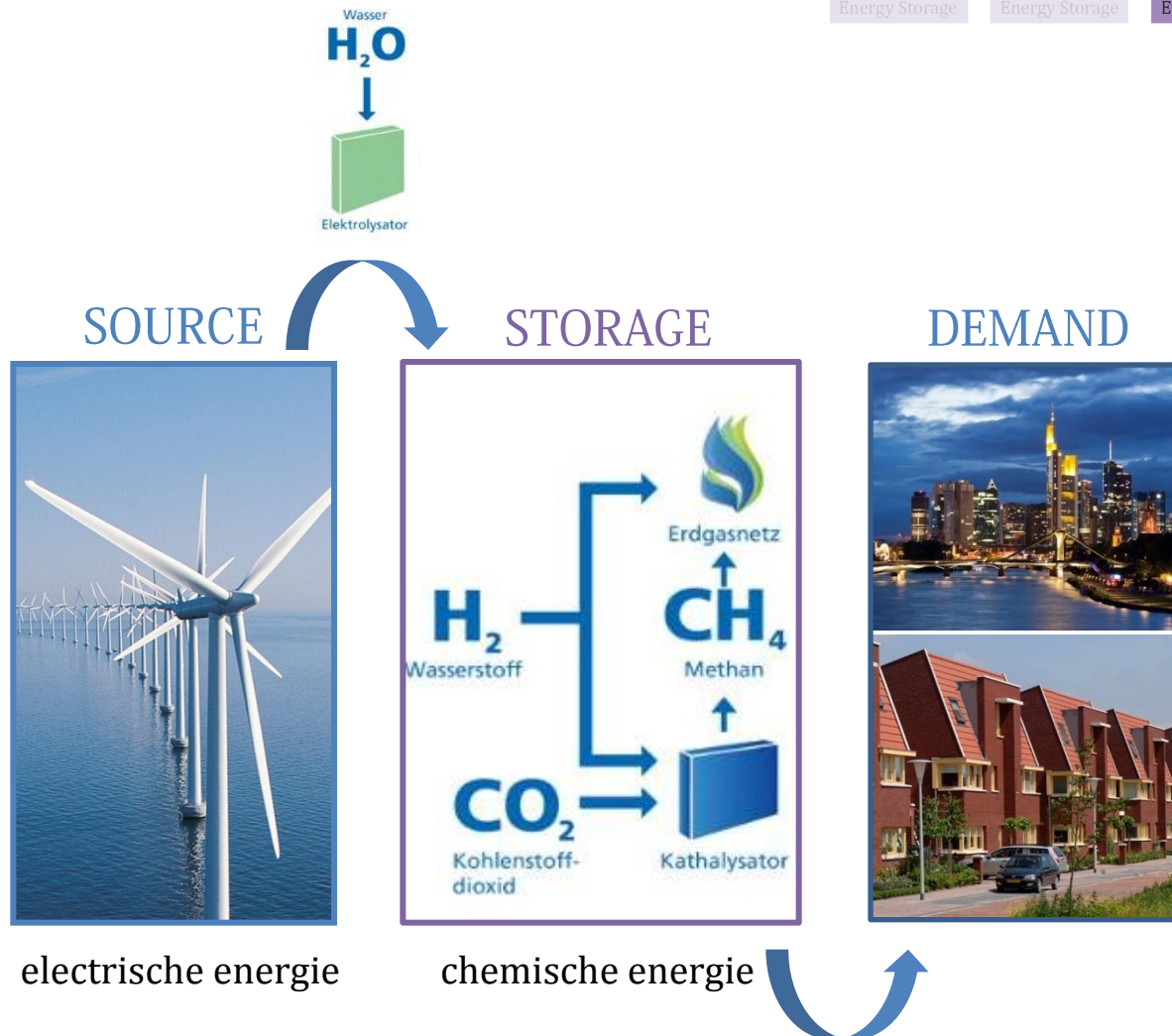
Electric
Energy Storage

Chemical
Energy Storage

Thermal
Energy Storage



INLEIDING ENERGIEOPSLAG



ENERGY STORAGE SYSTEMS

Mechanical
Energy Storage

Electric
Energy Storage

Chemical
Energy Storage

Thermal
Energy Storage

INLEIDING ENERGIEOPSLAG

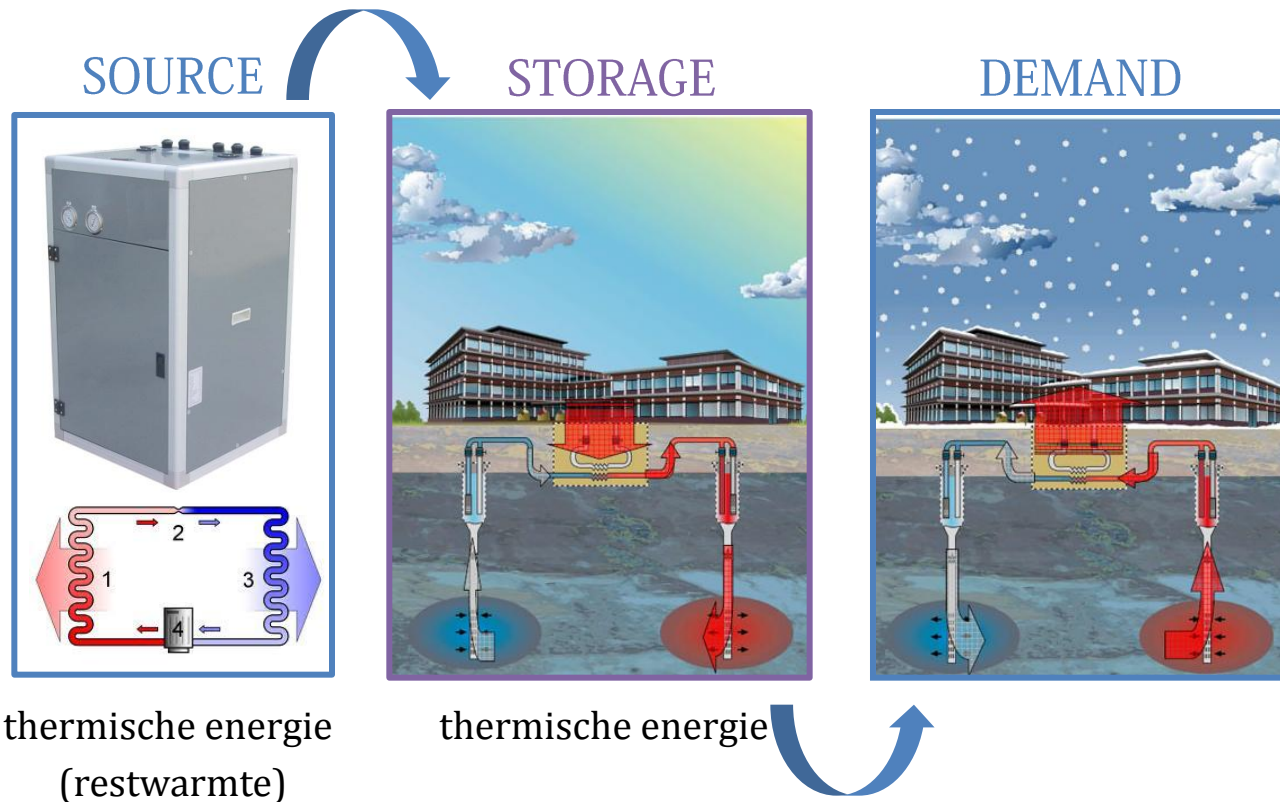
ENERGY STORAGE SYSTEMS

Mechanical
Energy Storage

Electric
Energy Storage

Chemical
Energy Storage

Thermal
Energy Storage



INLEIDING ENERGIEOPSLAG

ENERGY STORAGE SYSTEMS

Mechanical
Energy Storage

Electric
Energy Storage

Chemical
Energy Storage

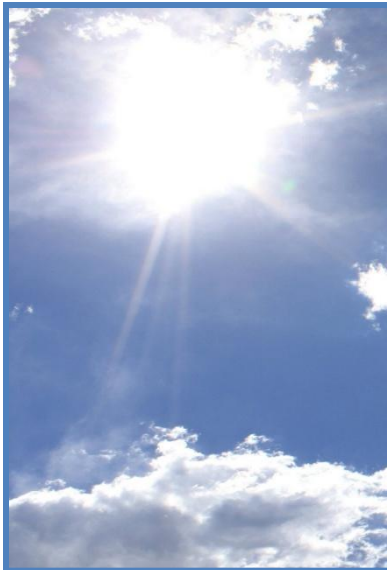
Thermal
Energy Storage



SOURCE

STORAGE

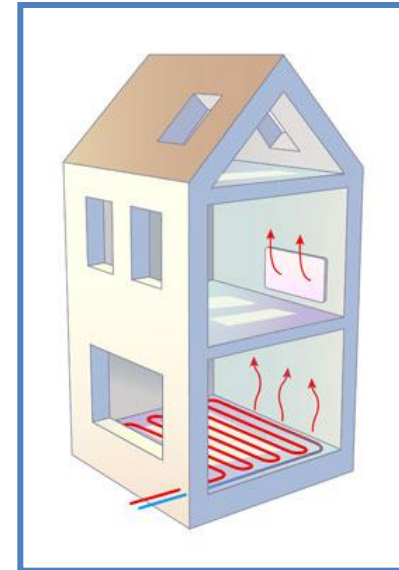
DEMAND



thermische energie



thermische energie



INLEIDING ENERGIEOPSLAG

ENERGY STORAGE SYSTEMS

Mechanical
Energy Storage

Electric
Energy Storage

Chemical
Energy Storage

Thermal
Energy Storage



SOURCE

STORAGE

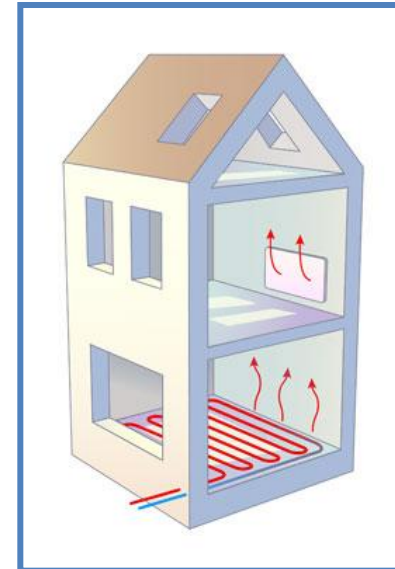
DEMAND



Thermische en
elektrische energie

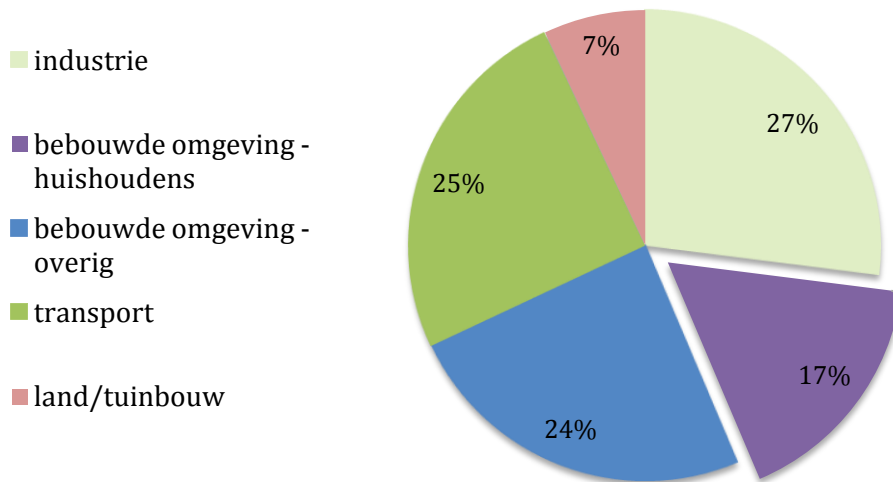


thermische energie

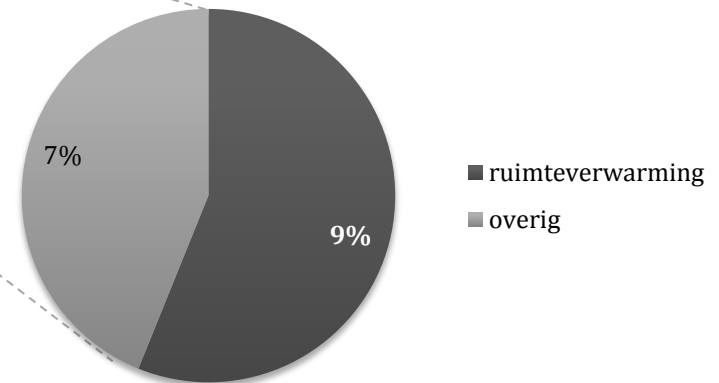


INLEIDING ENERGIEVRAAG WONINGEN

**Energiegebruik
per sector**



**Energiegebruik
huishoudens**



Bronnen: Energie-in-Nederland, Enipedia, 2008

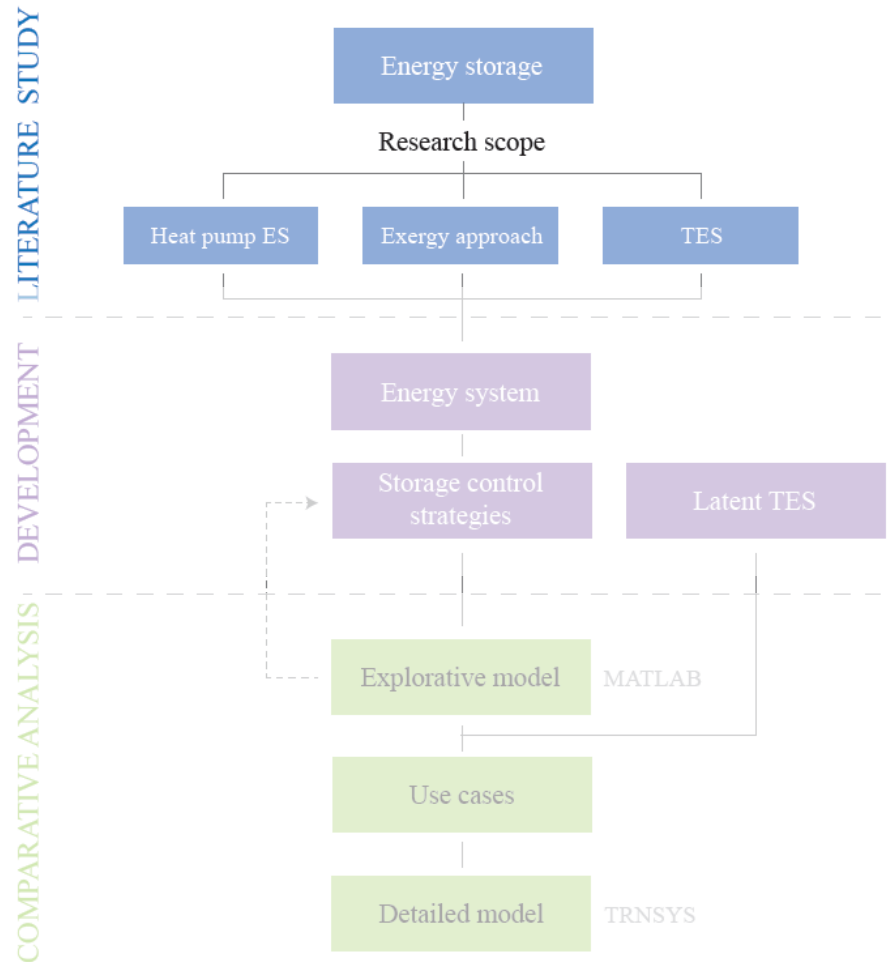
INLEIDING ONDERZOEKSVRAAG

What could be the energetic consequences of short term storage of low quality heat, applied in a contemporary Dutch dwelling with an air-source heat pump?

INLEIDING DOELSTELLING

This project aims for development and assessment of a heat pump energy system and associated storage control strategies. The research is executed to determine the energetic possibilities of application in standard single family residential buildings in the Netherlands.

INLEIDING METHODE

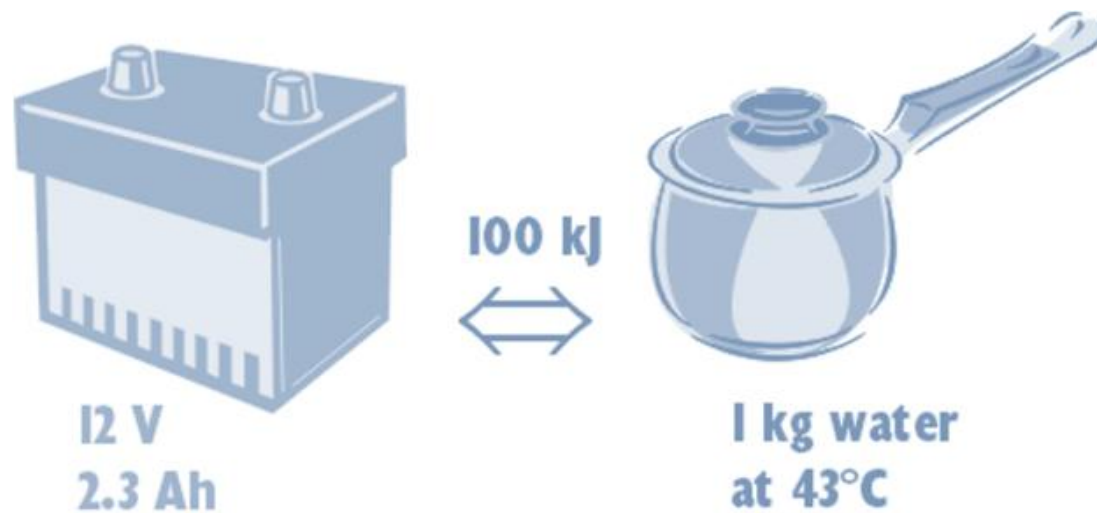


ONDERZOEK LITERATUUR



LITERATUUR EXERGIE

Sommige vormen van energie hebben een lagere kwaliteit dan andere.



LITERATUUR EXERGIE

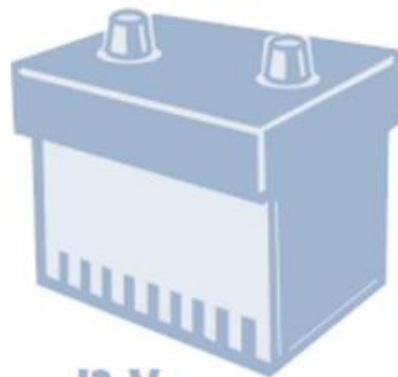
Exergie is een maat voor de kwaliteit van een hoeveelheid beschikbare energie, en geeft de fractie van deze energie die in arbeid kan worden omgezet.

Voor warmte geldt (van Gool, 1997):

$$Ex_{Q(H)} = Q_H * \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$

LITERATUUR EXERGIE

Sommige vormen van energie hebben een lagere kwaliteit dan andere.



12 V
2.3 Ah

Energie = 100 kJ

Exergie = 100 kJ



1 kg water
at 43°C

Energie = 100 kJ

Exergie = 7 kJ

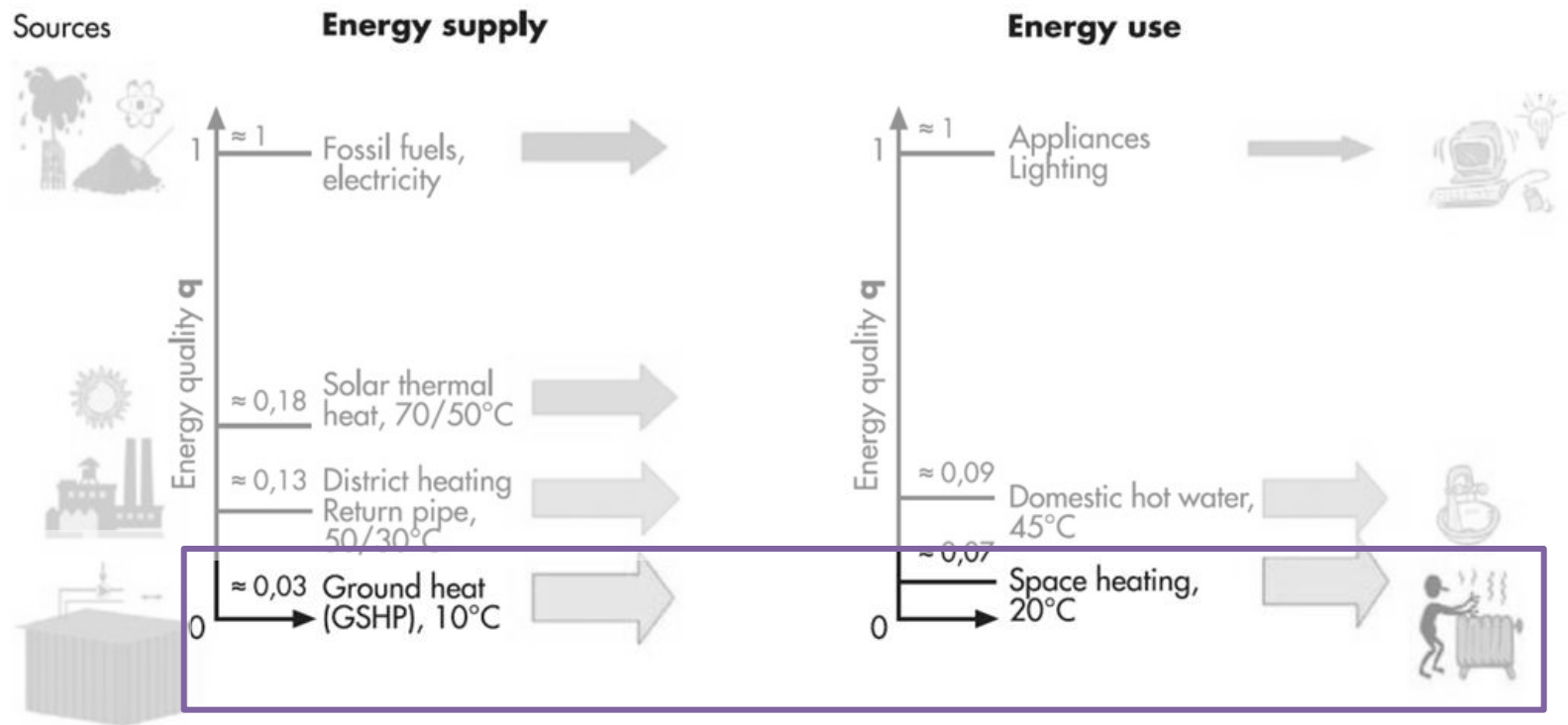
LITERATUUR

Exergie in bebouwde omgeving

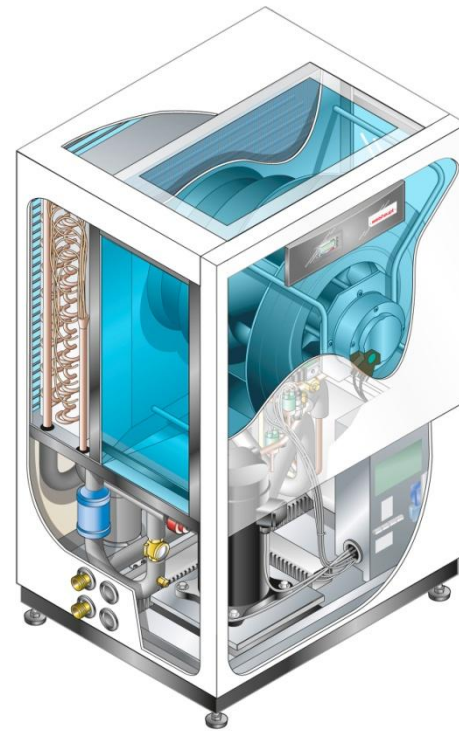
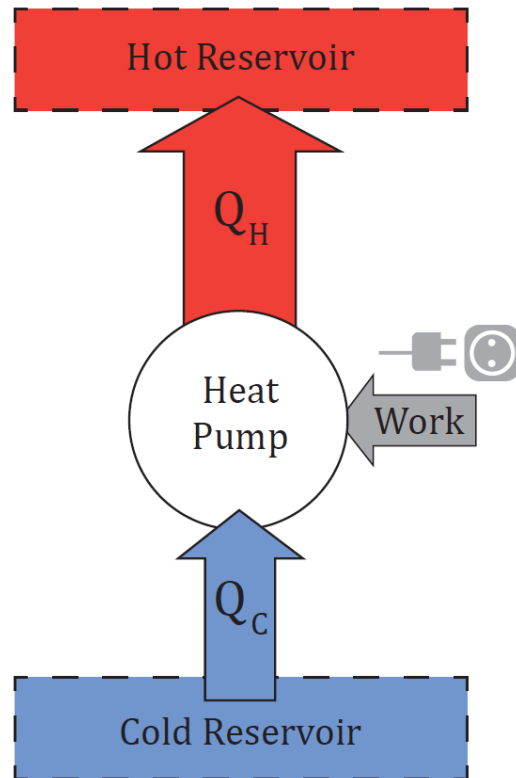
Literatuur (Torio, 2011, Jansen&Luscuere, 2012, Jansen, 2013)

- Energie efficienties geven onvolledig beeld van prestatie van een energetisch proces
- Exergie kwantificeert de thermodynamische prestatie van een systeem en geeft inzicht hoe(veel) het verbeterd kan worden
- Energiesystemen in bebouwde omgeving kunnen veel minder hoogwaardige energie gebruiken, m.n. voor warmte/koude vraag

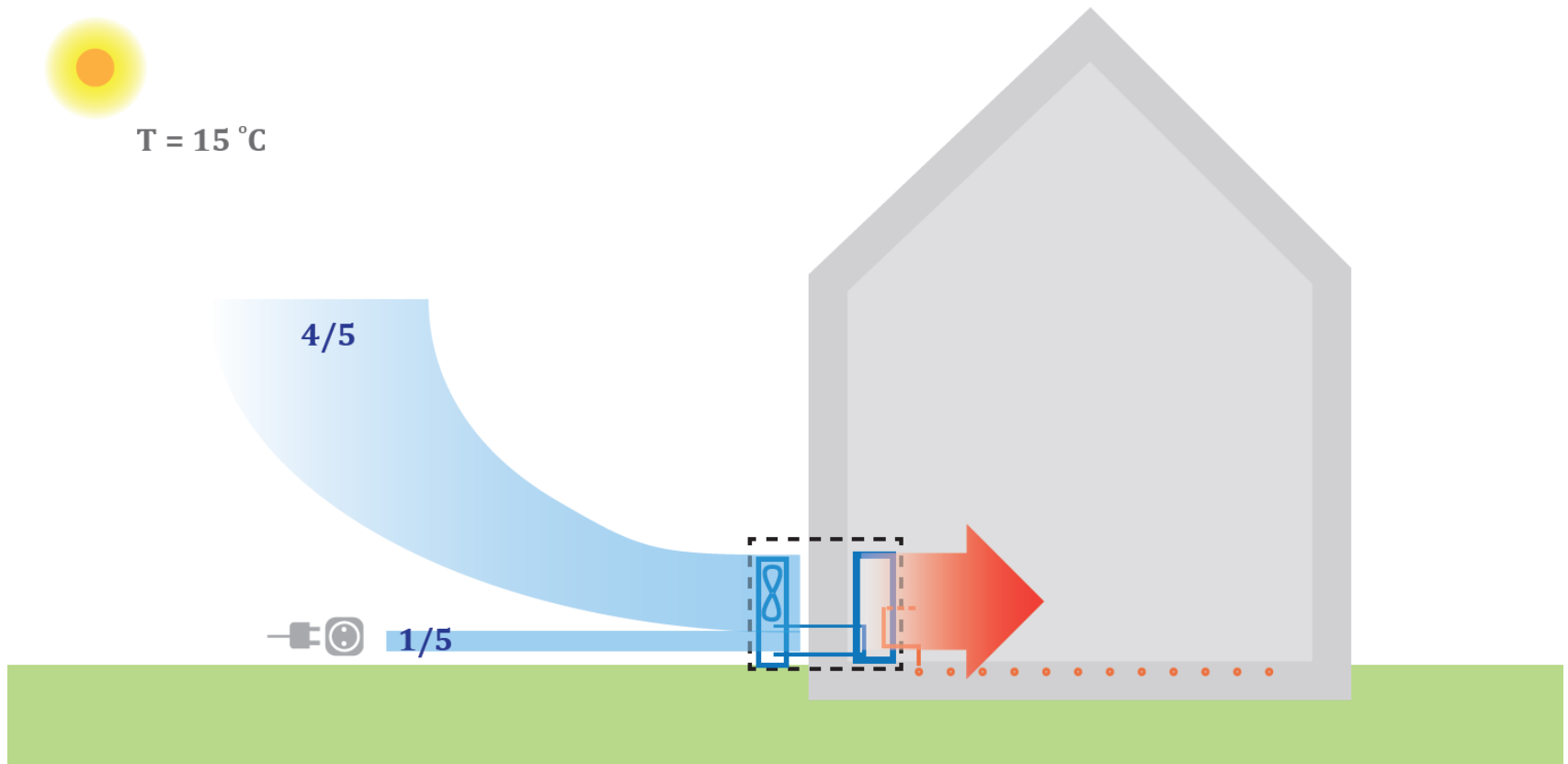
LITERATUUR MATCH IN KWALITEIT



LITERATUUR WARMTEPOMP

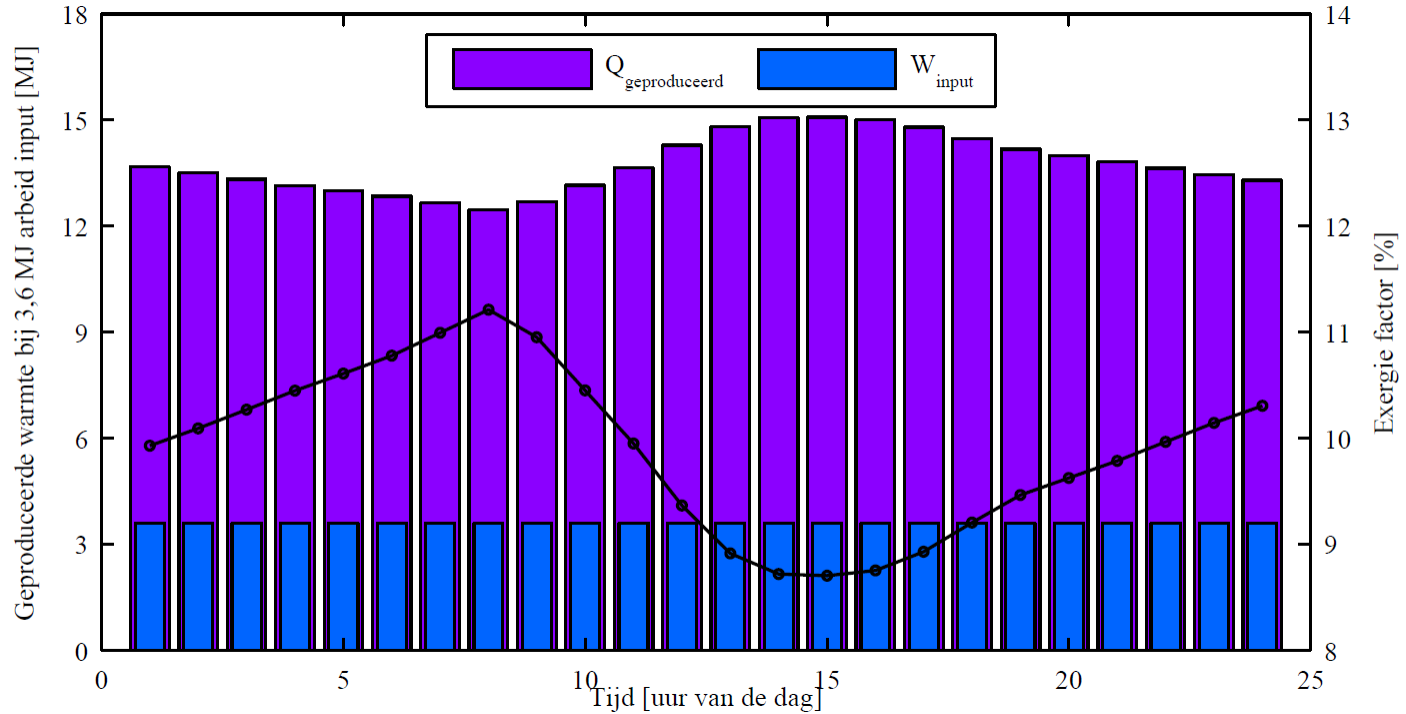


LITERATUUR WARMTEPOMP

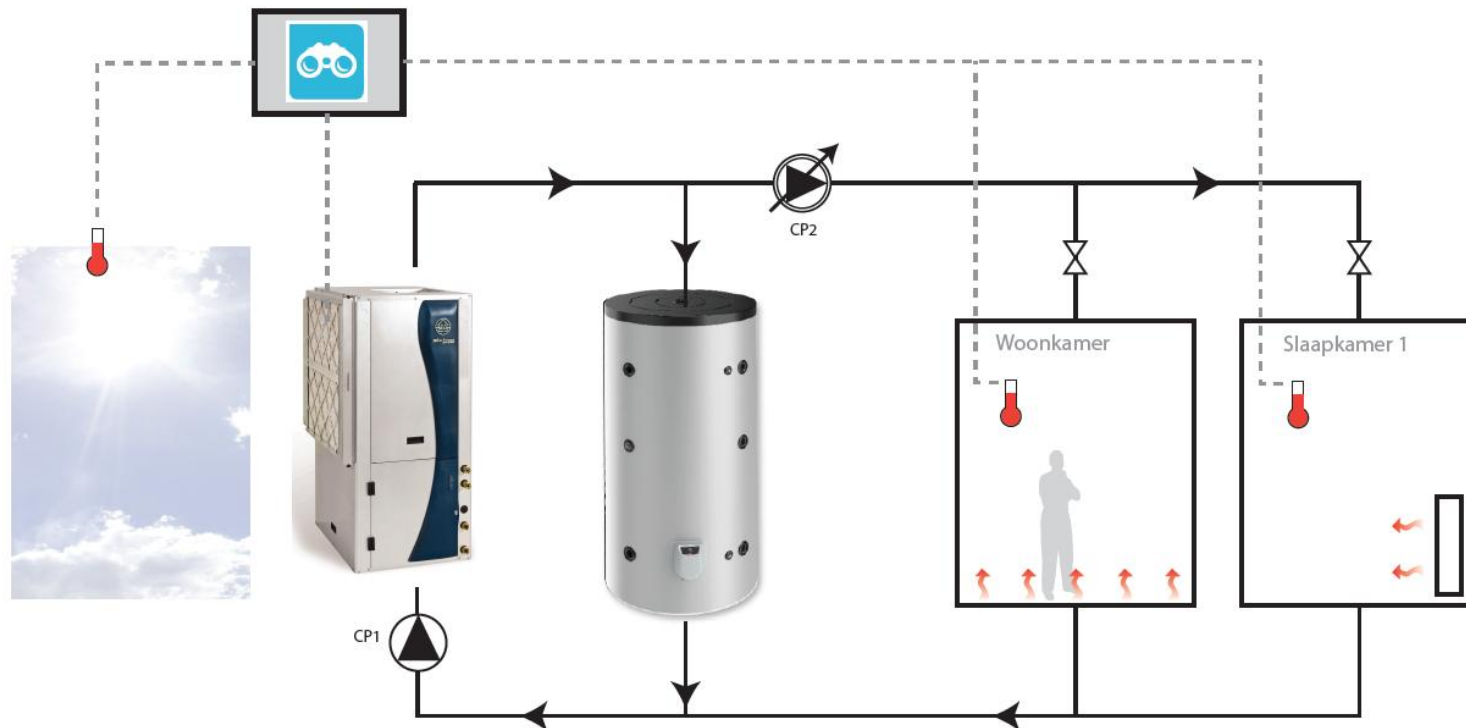


LITERATUUR ENERGIESYSTEEM

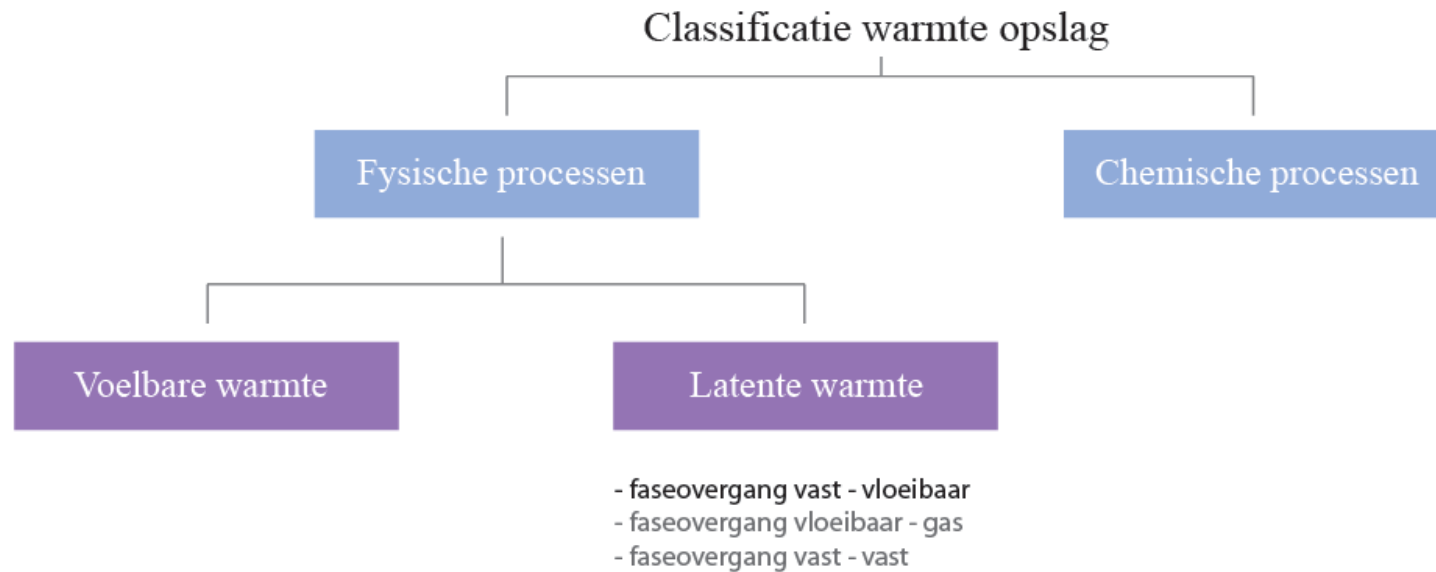
Exergie van warmte: $Ex_{Q,H} = Q_H * \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right)$



LITERATUUR ENERGIESYSTEEM



LITERATUUR OPSLAG VAN WARMTE



Naar: Mehling & Cabeza, 2008

LITERATUUR OPSLAG VAN WARMTE

Voelbare warmteopslag

Opslag van warmte door
temperatuurstijging medium

$$Q = \int_{T_i}^{T_2} m \cdot c_p \cdot dT$$

m = massa

c_p = soortelijke warmte

T_i = initiele temperatuur

T_2 = temperatuur na verwarmen

Materiaal	dT [C]	Q [kJ kg ⁻¹]
Water	+ 5	21
Beton	+ 5	5



LITERATUUR

OPSLAG VAN WARMTE

Latente warmteopslag

Opslag van warmte tijdens fase-overgang van een medium
(bij constante T)

$$Q = m \cdot \Delta h_m$$

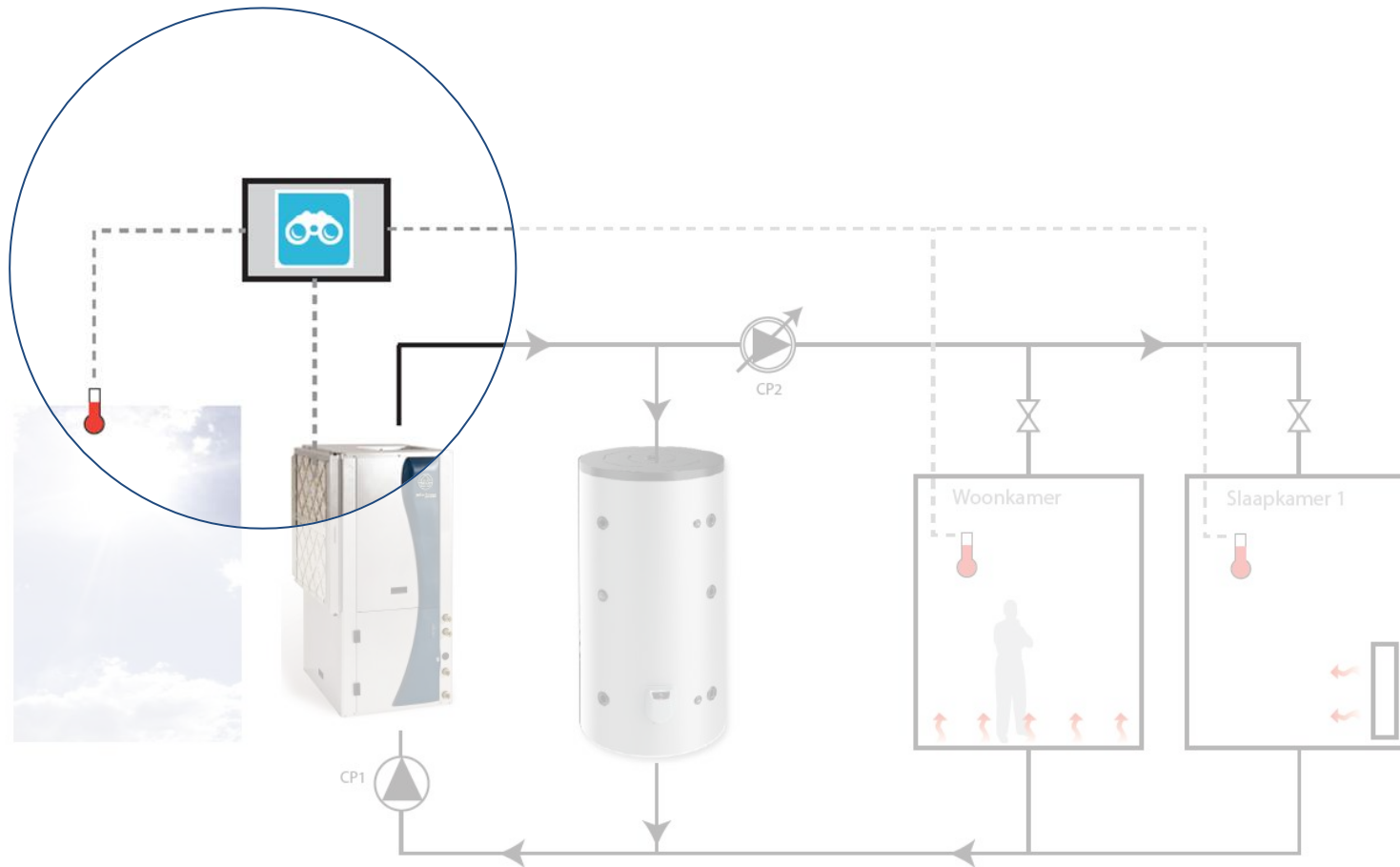
m = massa

Δh_m = smeltwarmte PCM

Materiaal	ΔT [C]	Q [kJ kg ⁻¹]
Water	+ 5	21
Beton	+ 5	5
Water (-ijs)	0	330
Paraffine	0	130
Zouthydraten	0	170



ENERGIE OPSLAG STRATEGIEËN



STRATEGIEEN OPTIMALISATIE PROBLEEM

Minimaliseren van primair energiegebruik

minimize $E_{primary}(x)$

waarin:

x = uren dat installatie in bedrijf zal zijn

Randvoorwaarde:

Minimale en maximale energie inhoud van de energieopslag

STRATEGIEEN MATLAB MODEL

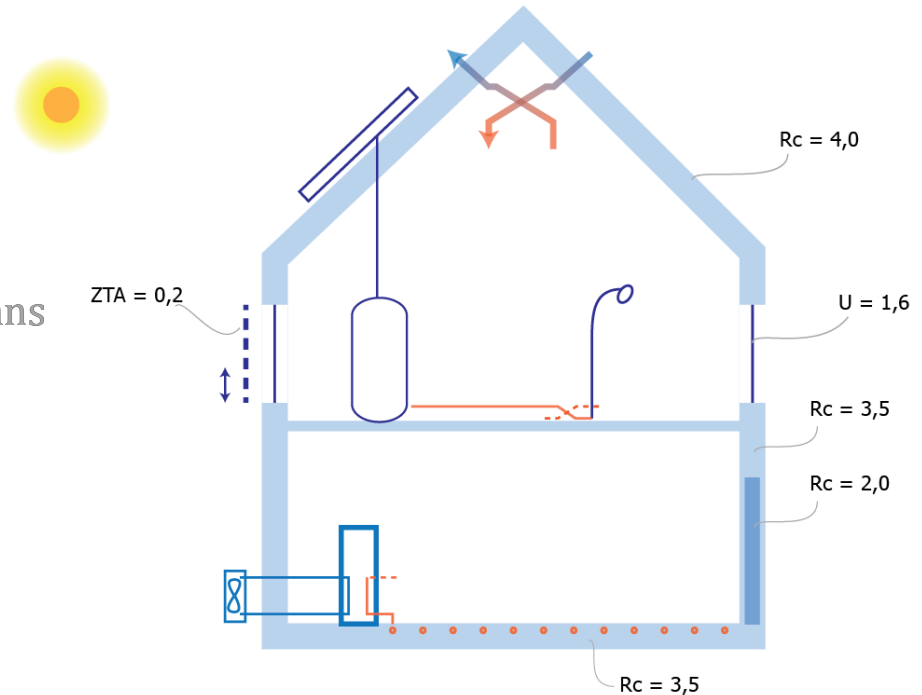
Gebaseerd op een gezinswoning
Senternovem (EPC 0,6)

Aannames:

- Semi-stationaire berekening warmtebalans (lineair systeem)
- Operationele data conform NEN7120
- Tijdstap 1 uur
- Ideale voorspelling buitencondities
- Alleen opslag in water
- Watertemperatuur buffervat uniform

Optimalisatie variabelen:

- Horizon voorspelling
- Buffer volumes



$$q_{v,10};k_{ar} = 0,7 \text{ dm}^3/(\text{s m}^2)$$

$$\text{ventilation} = 0,43 \text{ dm}^3/(\text{s m}^2)$$

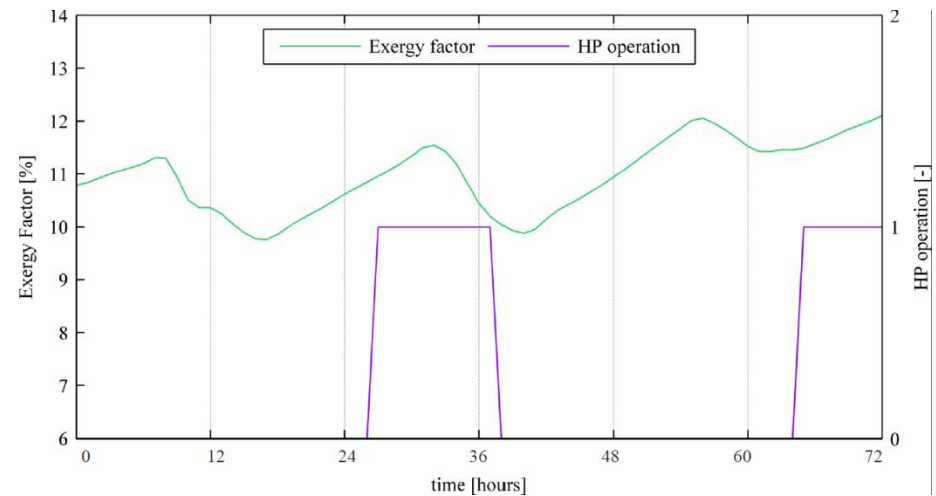
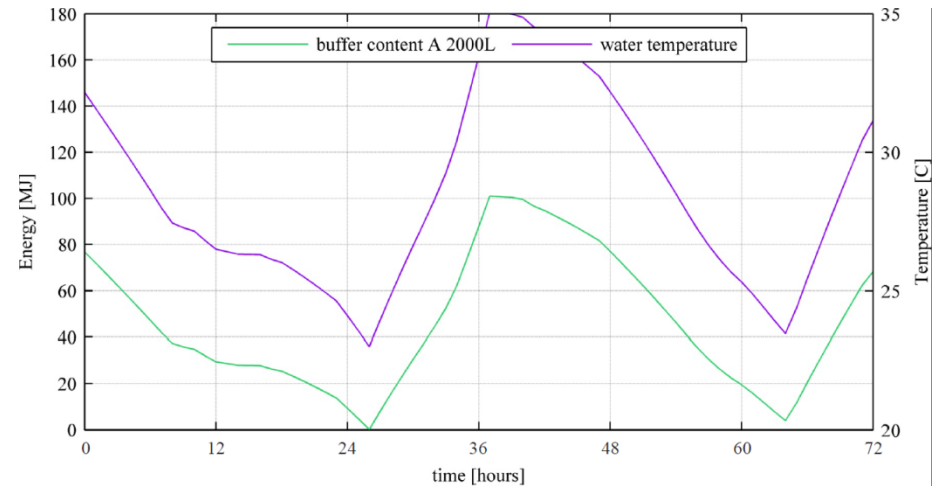
$$\text{SWM} = 550 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

STRATEGIEEN

REFERENTIE STRATEGIE A

Conventioneel

- Bedrijf afhankelijk van temperaturen buffer
- Stooklijn
- Geen exergieoptimalisatie

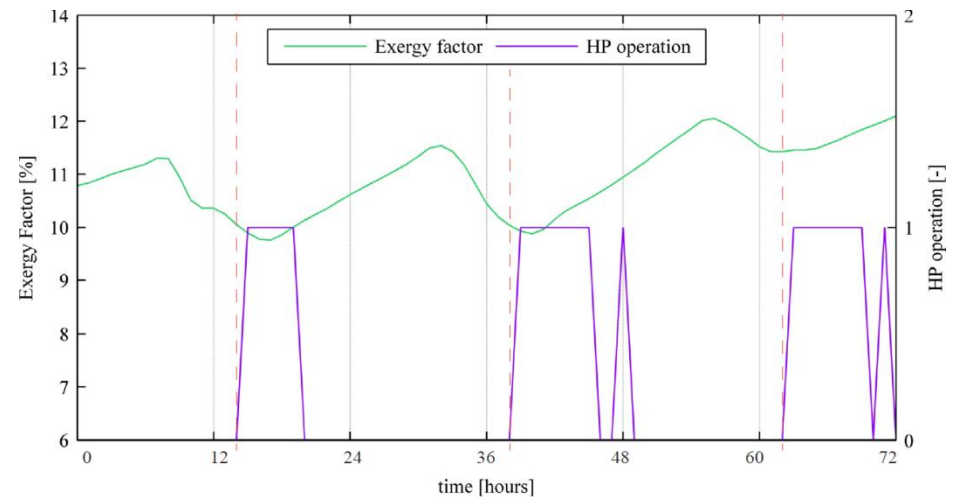
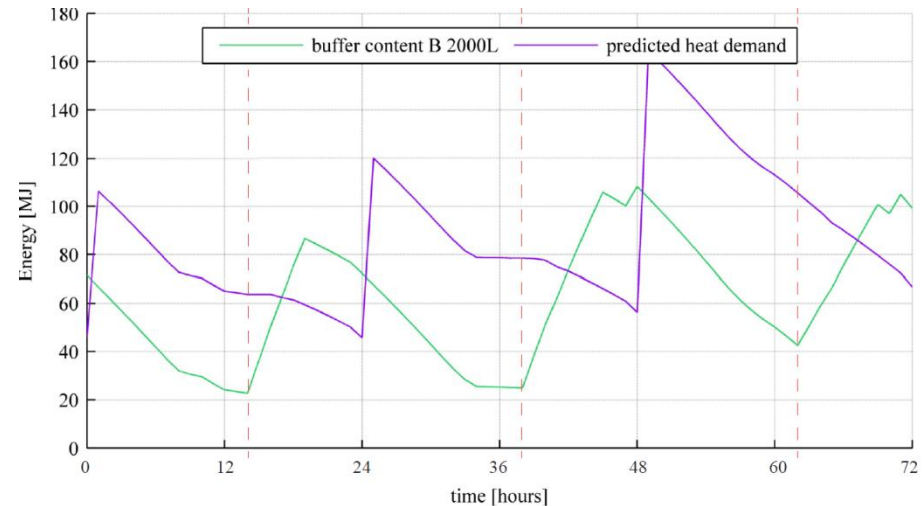


STRATEGIEEN STRATEGIE B

Vaste aanvangstijd

Installatie schakelt aan om 14h
(exergetisch optimum)

- voorspelling van warmtevraag



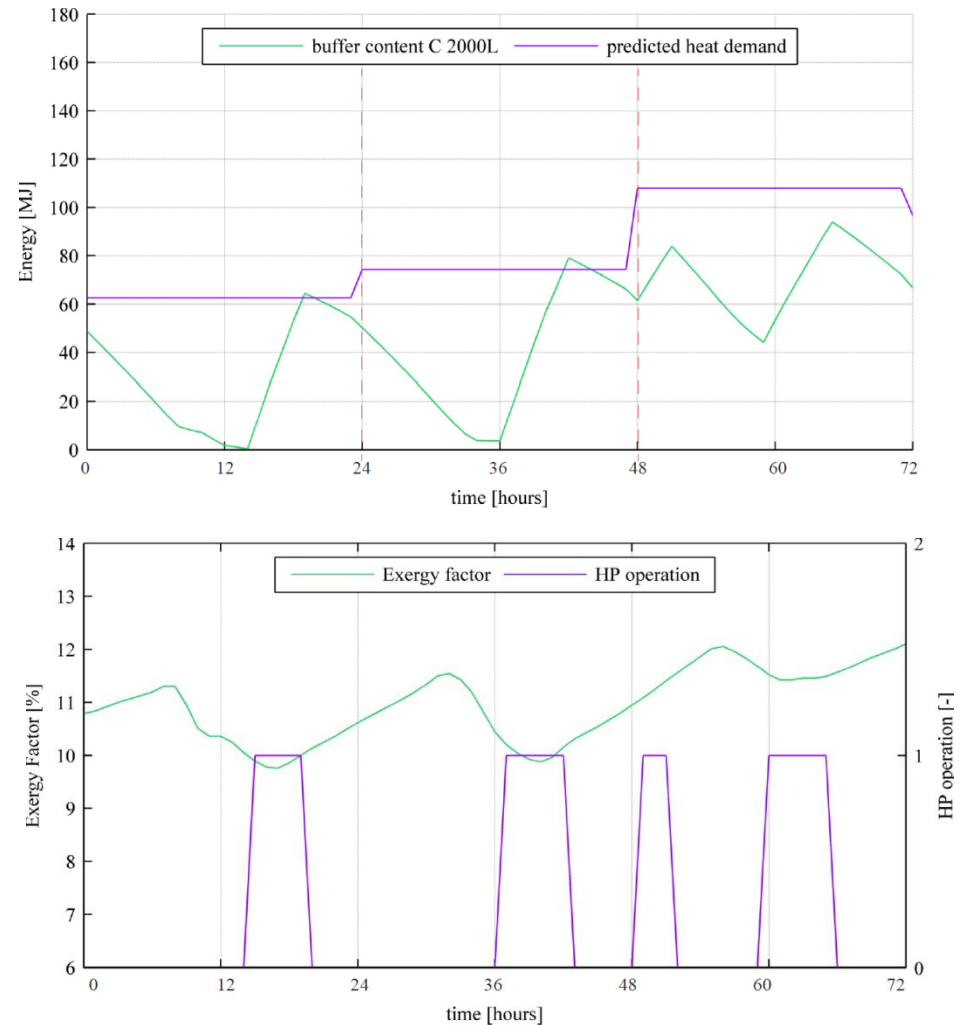
STRATEGIEEN

STRATEGIE C

Greedy – dagelijkse beslisser

Optimale bedrijfspatroon wordt
dagelijks vastgesteld,
op basis van:

- voorspelling van warmtevraag
- voorspelling condities opwekking
- Greedy optimalisatie algoritme (Vizvari, 1987)

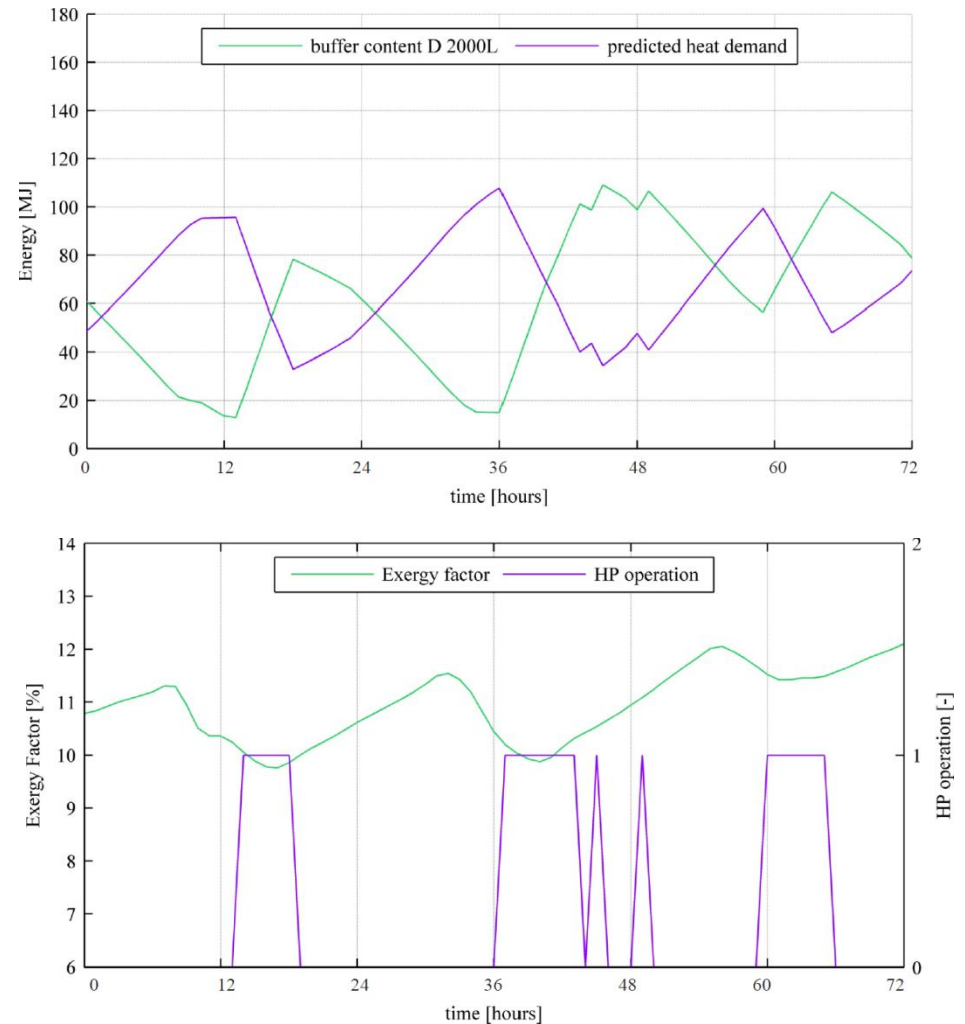


STRATEGIEEN STRATEGIE D

Greedy – continue beslisser

Optimale bedrijfspatroon wordt elke tijdstap opnieuw vastgesteld, op basis van:

- voorspelling van warmtevraag
- incl. huidige energiehoud buffer
- voorspelling condities opwekking
- Greedy optimalisatie algoritme



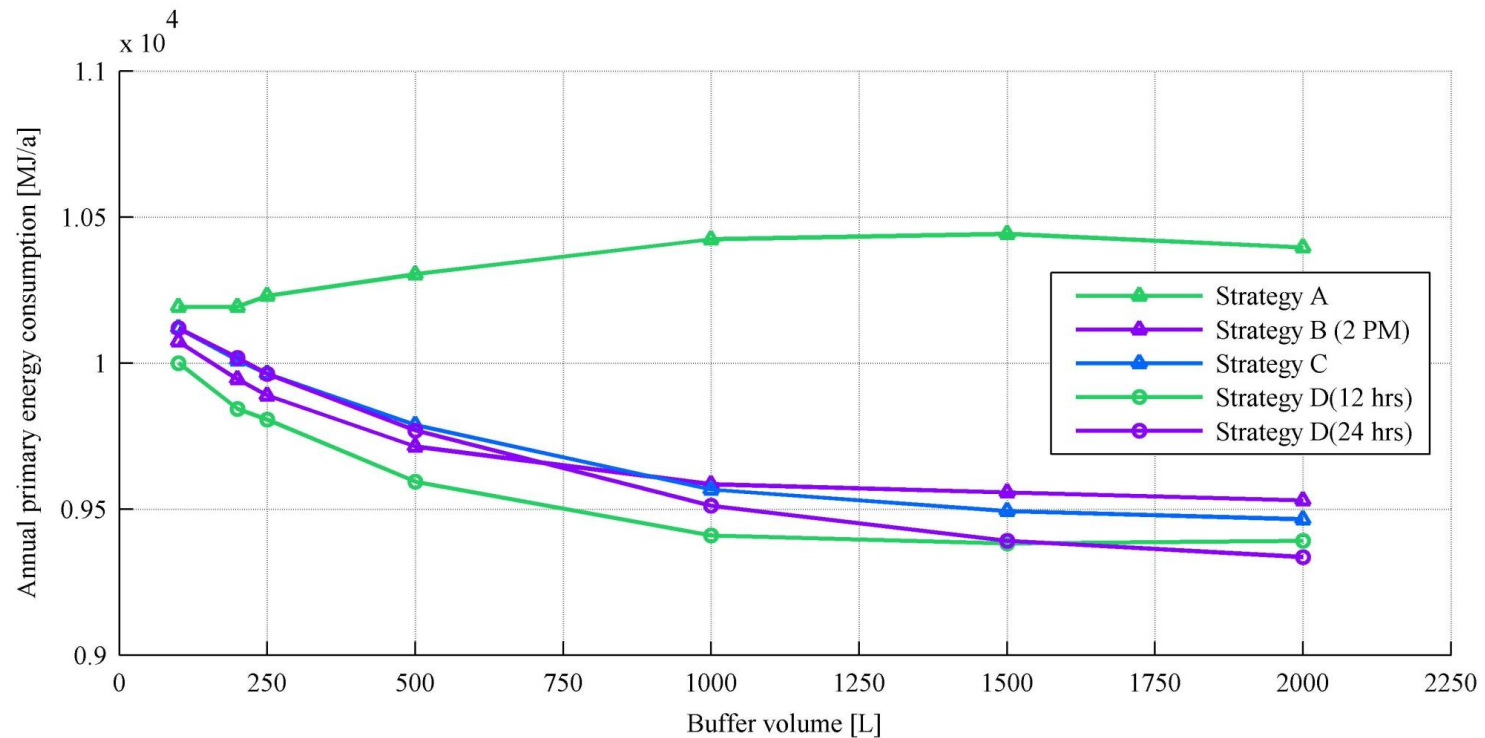
RESULTATEN



RESULTATEN

JAARLIJKS ENERGIEGEBRUIK

Jaarlijks (primair) energieverbruik voor ruimteverwarming in MJ



RESULTATEN

OPTIMALISATIE T.O.V. REFERENTIE

Lager Primair energiegebruik en aantal draaiuren warmtepomp

- Jaarlijkse reductie 4-12 % (best: strategie D in combinatie met grote opslagvolumes)

Meer aan/uitschakelingen

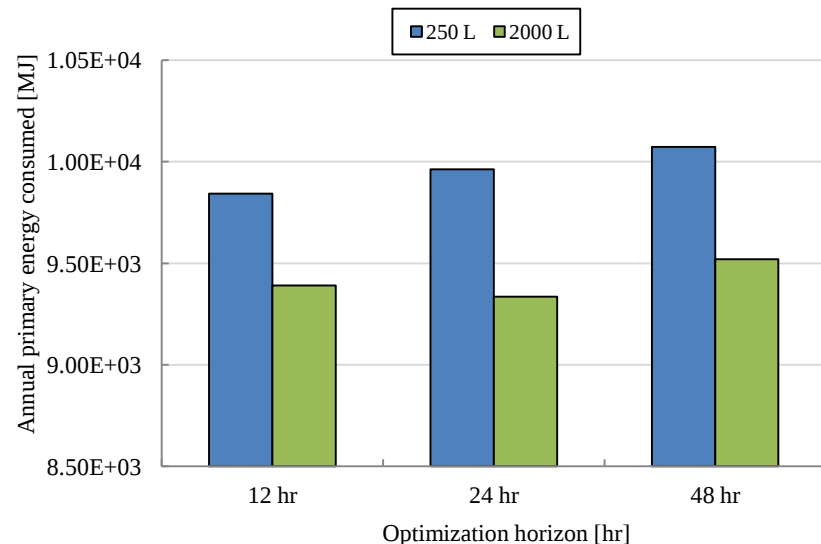
- 2-3 maal meer schakelingen dan strategie A

Lager geïnstalleerd vermogen warmtepomp

- Gelijkblijvende besparingen bij reductie van 25%

Optimale termijn voor optimalisatie

- Kleine buffers 12 uur
- Grote buffers 24 uur



RESULTATEN

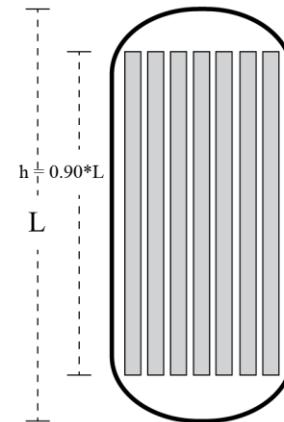
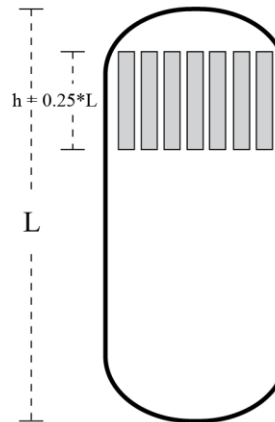
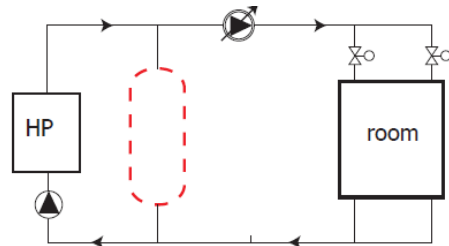
GEDETAILLEERD MODEL

Dynamische gebouwsimulatie software TRNSYS

- Gedetailleerde berekening warmtevraag gebouw
- Invloed gedrag vloerverwarming en temperatuurregeling
- Niet-ideale voorspelling
- Thermisch gelaagd buffervat, incl. latente warmteopslag

Latente warmteopslag

- Grote energiehoeveelheden
- Compact buffervat
- PCM in modules
- Zouthydraten, $T_{pc} 29^{\circ}\text{C}$



RESULTATEN USE CASES

Case	Volume [L]	Lengte modules [% v bufferhoogte]	Diameter [mm]	Energie dichtheid [Vol% PCM]	Energie inhoud [MJ]
A1	200	25	33	15	18,0
A2	200	90	33	30	25,0
B	500	- (alleen voelbaar)	-	-	~ 25,0
C1	600	25	53	15	50,0
C2	600	90	53	30	72,0
C3	600	90	53	50	108,0



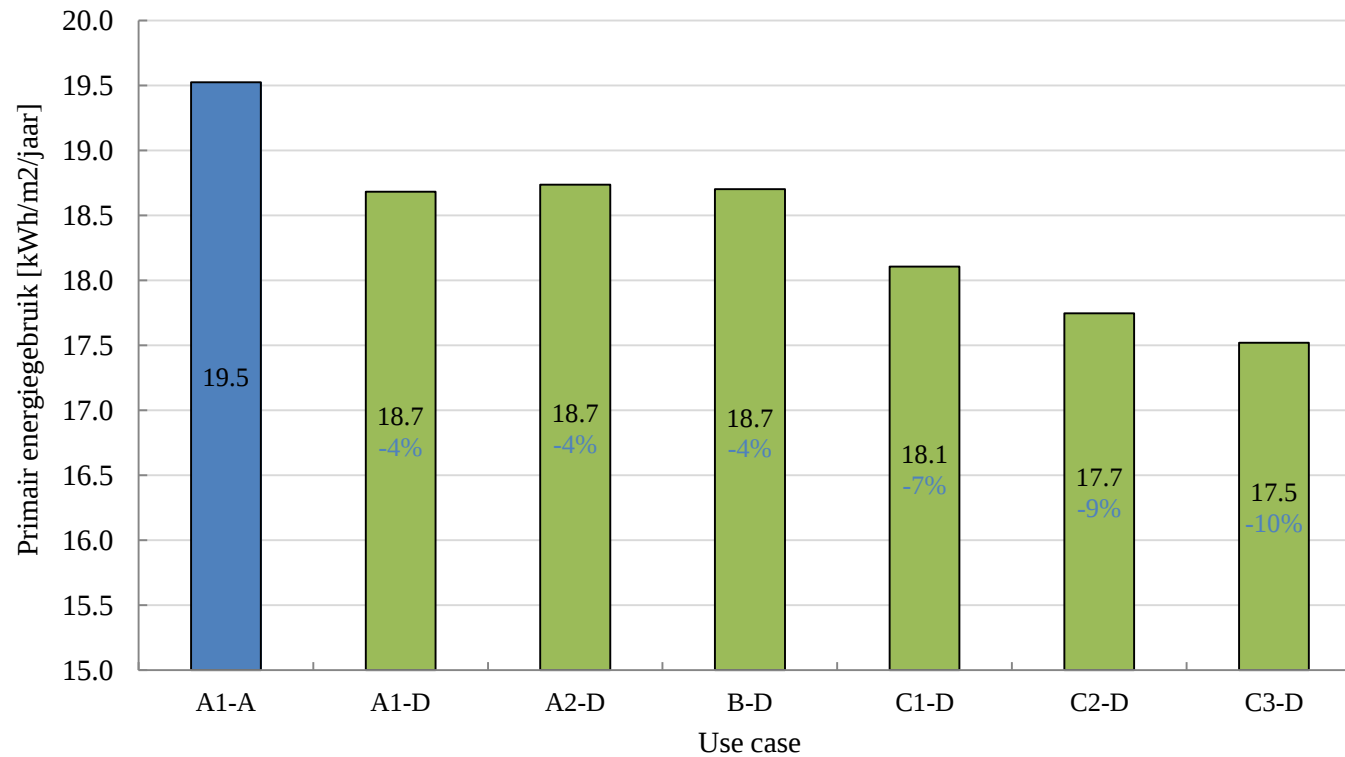
Vergelijking regelstrategie A en D

- Strategie A alleen in combinatie met case A1

RESULTATEN

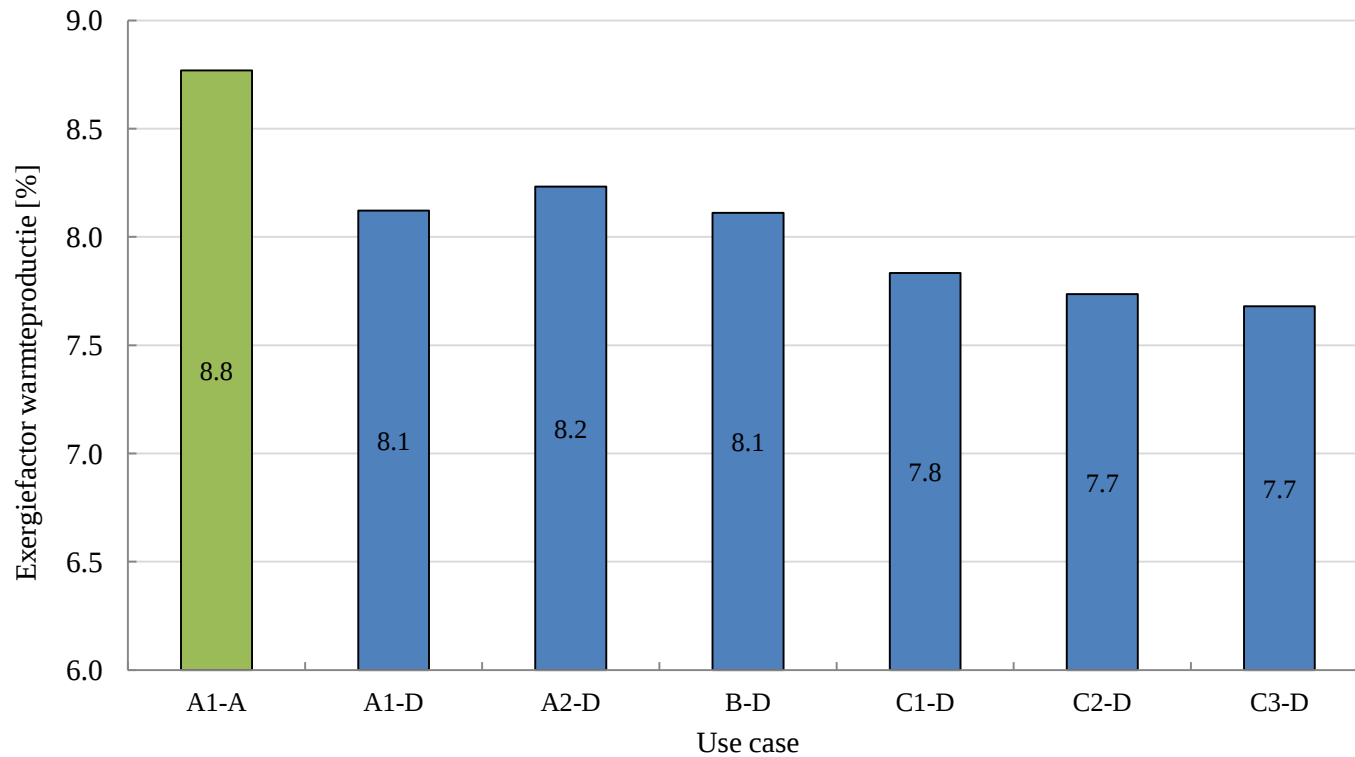
JAARLIJKS ENERGIEGEBRUIK

Jaarlijks (primair) energieverbruik voor ruimteverwarming in kWh/m²



RESULTATEN EXERGIE WARMTEPRODUCTIE

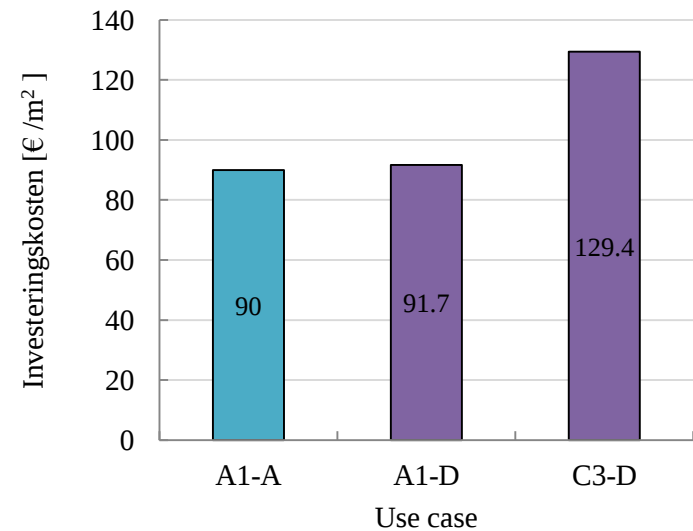
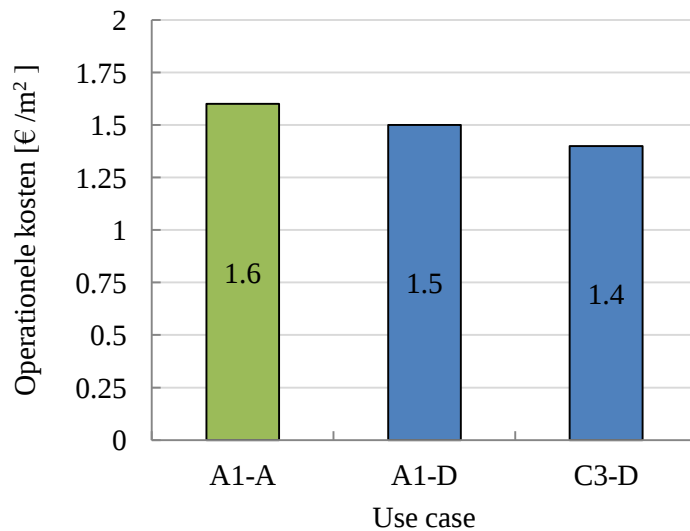
Jaargemiddelde exergiefactor voor warmteproductie



RESULTATEN

ECONOMISCHE HAALBAARHEID

Case - strategie	Volume [L]	Meerinvestering
A1-A	200	-
A1-D	200	Software
C3-D	600	Software Grotere opslagcapaciteit



A close-up, artistic photograph of a spiral-bound notebook, showing the metallic spiral binding and the texture of the paper. The image is in a cool, blue-toned color palette.

CONCLUSIES

BEANTWOORDEN ONDERZOEKSVRAAG

What could be the energetic consequences of short term storage of low quality heat, applied in a contemporary Dutch dwelling with an air-source heat pump?

Korte termijn warmteopslag in combinatie met een regelstrategie volgens exergieprincipes kan de energetische prestatie van een warmtepomp verbeteren. *Minimaliseren van exergie* van de warmteopwekking betekent een *reductie in primair energiegebruik voor ruimteverwarming* en een *toename in benutting van laagwaardige omgevingswarmte*. Om te kunnen profiteren van dagelijkse fluctuaties in omgevingswarmte is compacte latente warmteopslag nodig.

CONCLUSIES

Exergiebewuste strategieën voor warmteopslag verduurzamen een energie systeem met warmtepomp door:

.. een lager primair energiegebruik

- tot 10% minder hoogwaardige energie input jaarlijks

.. vervangen door een groter aandeel omgevingswarmte

- 25 % reductie in geïnstalleerd vermogen mogelijk

.. resterende hoogwaardige energievraag kan grotendeels duurzaam opgewekt worden zonder (de-)centrale elektriciteitsopslag

- tot 60% van de bedrijfsuren tussen 10:00u en 18:00u (+500%)

Aandachtspunten:

- verbeteren nauwkeurigheid voorspelling
- hoge investeringskosten

CONCLUSIES

AANBEVELINGEN VERVOLGONDERZOEK

- Meer nauwkeurige voorspelling van warmtevraag
- Toepassing regelstrategie D op andere warmtebronnen:
 - Restwarmte
 - Passieve benutting zonnewarmte
 - Hoge temperatuur collectoren
- Toepassing regelstrategie D voor opslag andere tijdsduur of schaal:
 - Seizoensfluctuaties bodemopslag collectief

Thank you for your attention!