

Wetenschappelijke vooruitgang: bestaande inzichten breder toepasbaar maken

Van specifieke formules naar algemene methode

De analogie tussen vierkant en rechthoek voor de voorgestelde verhouding tussen Carnot en Clausius

Casper Helder
Unified Energy B.V.

Aanvullende presentatie bij het voorstel voor het programma *Beyond Carnot: Operationalizing Clausius* voor [Lorentz Center](#)
Meer informatie: [CarnotX Academy](#)

17 september 2026

© 2026 Unified Energy B.V. Alle rechten voorbehouden.

Wetenschappelijke vooruitgang: meer verklaren vanuit één raamwerk

Een bredere verklaring kan bestaande kennis omvatten én nieuwe gevallen ontsluiten.

Een breder bereik

Wetenschappelijke vooruitgang kan ontstaan wanneer een raamwerk meer gevallen samenhangend verklaart. Een algemener raamwerk kan de geldige klassieke verklaring als specifiek geval omvatten.

Het doel van deze presentatie

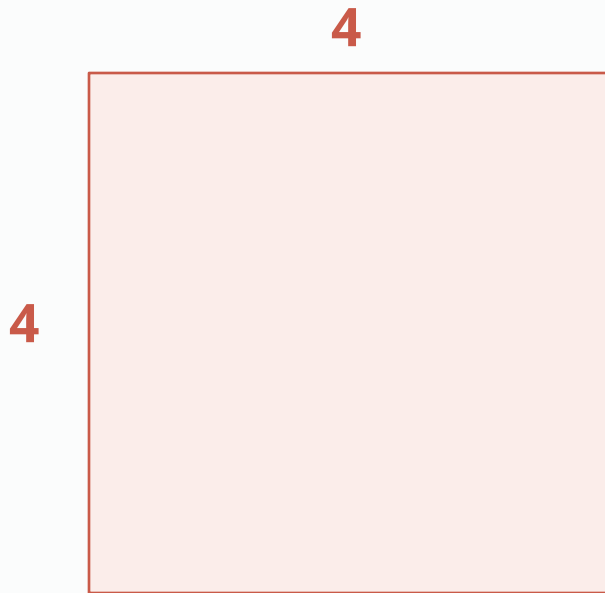
Met de analogie tussen vierkant en rechthoek de voorgestelde verhouding tussen Carnot en Clausius begrijpelijk maken: wat wordt algemener, wat blijft geldig en wat vraagt toetsing?

Bestaande kennis verbinden

Afzonderlijke deelmethoden krijgen een plaats in één algemene aanpak. Die maakt onderlinge verbanden zichtbaar en biedt een gezamenlijke basis voor analyse en berekening.

Het vierkant als klassieke referentie

Het klassieke principe voor de oppervlakte van vierkanten:
oppervlakte = de lengte van de zijde in het kwadraat



Vier gelijke zijden
Vier rechte hoeken

a = lengte van de zijde
Oppervlakte: $A = a^2 = 4^2 = 16$

Voor elk vierkant geldt exact:
oppervlakte = zijde in het kwadraat.

Van vierkant naar rechthoek: een bredere formule

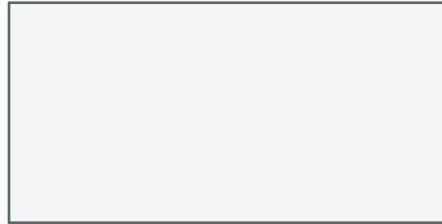
$A = a^2$ geldt specifiek voor vierkanten; a is de lengte van de zijde

Vierkanten



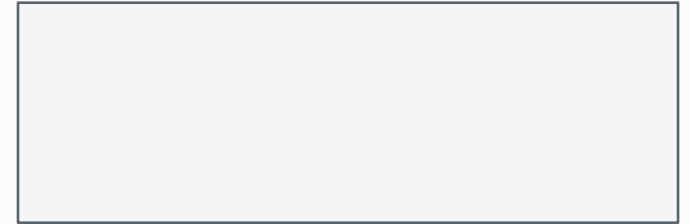
a bij a
 $A = a^2$

Verhouding 2 : 1



$2a$ bij a
 $A \neq a^2$
Vierkantformule
niet toepasbaar

Verhouding 3 : 1



$3a$ bij a
 $A \neq a^2$
Vierkantformule
niet toepasbaar

Exacte deelmethoden voor specifieke verhoudingen

Elke deelmethode berekent de oppervlakte exact binnen het bereik waarin zij geldt.

Vierkanten

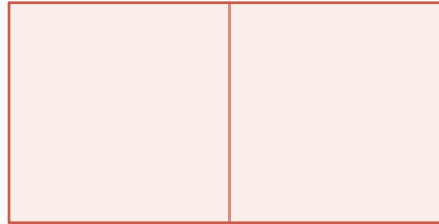


a bij a

Oppervlakte vierkant

$$A = a^2$$

Verhouding 2 : 1



2a bij a

Oppervlakte = 2 ×

oppervlakte vierkant

$$A = 2 \times a^2$$

**Geldig bij lengte =
2 × breedte**

Verhouding 3 : 1



3a bij a

Oppervlakte = 3 ×

oppervlakte vierkant

$$A = 3 \times a^2$$

**Geldig bij lengte =
3 × breedte**

Exact per verhouding — geen algemene formule voor willekeurige lengte en breedte.

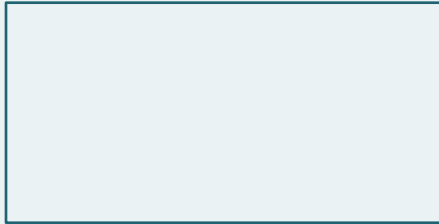
Eén algemene methode voor rechthoeken en vierkanten

Oppervlakte = lengte $\times$ breedte, voor rechthoeken én vierkanten

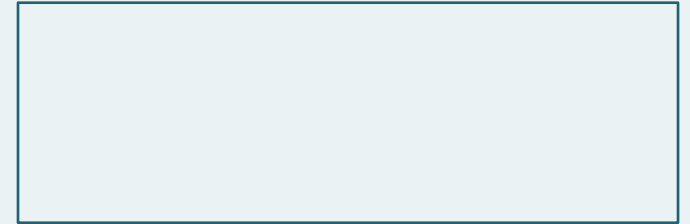
Vier rechte hoeken. Lengte l en breedte b .



$$l = b = a$$



$$l = 2b$$



$$l = 3b$$

$$\text{Oppervlakte } A = l \times b$$

Een exacte formule binnen een algemenere methode

Van een specifieke formule, via deelgevallen, naar één algemene methode.

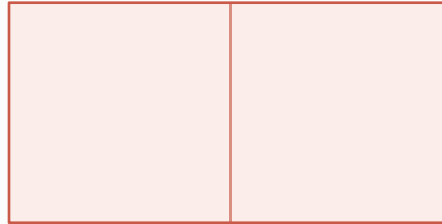
Specifieke formule



$$A = a^2$$

Exact voor ieder vierkant.
De zijde bepaalt de oppervlakte.

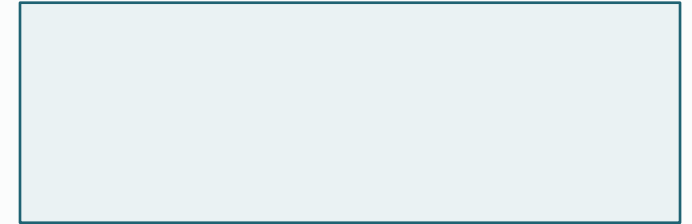
Exacte deelmethoden



$$A = 2a^2 \text{ of } A = 3a^2$$

Door rechthoeken op te delen in gelijke vierkanten volgen exacte uitkomsten voor specifieke verhoudingen.

Algemene methode



$$A = l \times b$$

Eén methode voor iedere rechthoek. Het vierkant is inbegrepen: $l = b = a$.

De specifieke formule blijft geldig. De algemene methode omvat haar én andere verhoudingen.

Van oppervlakte naar rendement

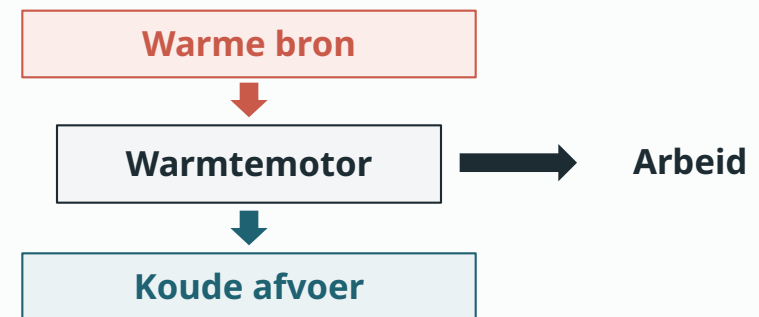
Bij vierkanten en rechthoeken zagen we hoe een specifieke, exacte formule past binnen een algemenere methode. Met die gedachte onderzoeken we nu thermodynamische cycli.

De meetkundige analogie



Eén formule voor vierkanten; een algemenere methode voor rechthoeken én vierkanten.

De thermodynamische vraag

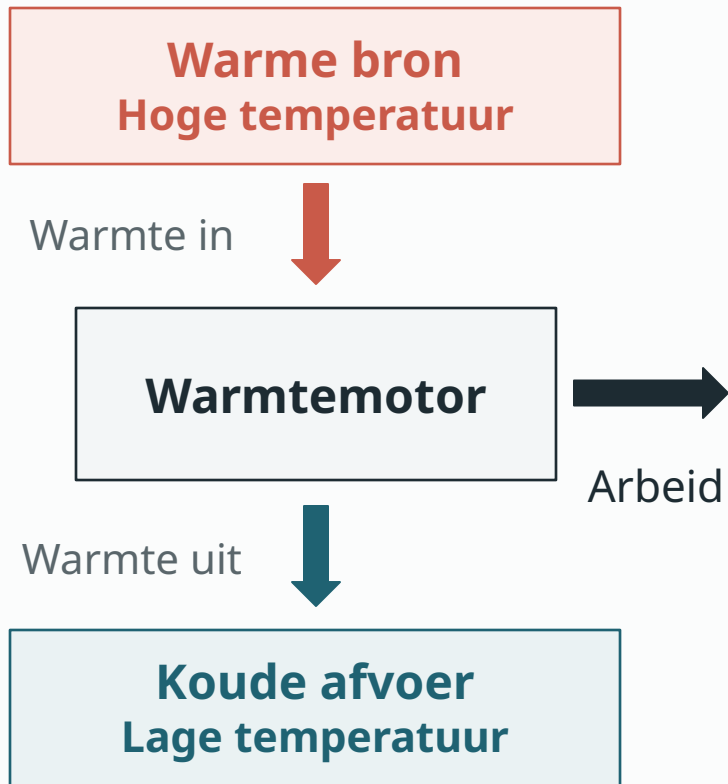


Hoe verhoudt het Carnot-rendement bij twee vaste temperaturen zich tot een algemeen raamwerk voor reversibele cycli, ook bij veranderende temperaturen?

Eerst: hoe werkt een warmtemotor en wat betekent rendement?

Hoe werkt een warmtemotor?

Warmte opnemen, netto arbeid leveren en warmte afgeven



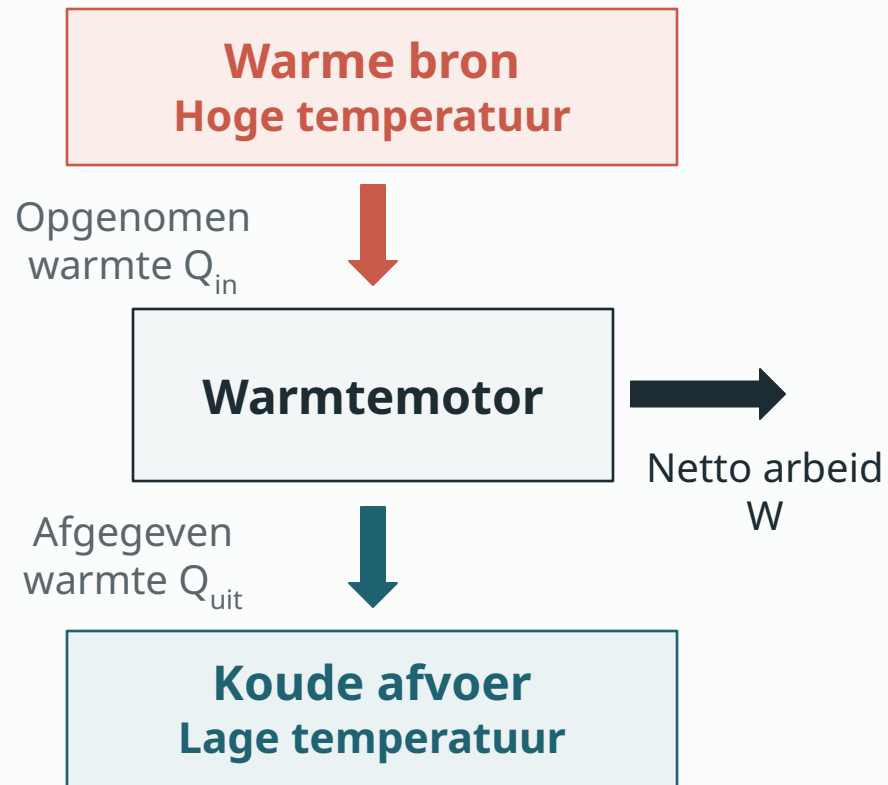
Van warmte naar arbeid

Een warmtemotor neemt warmte op, levert netto arbeid en geeft de resterende warmte af.

Bij de warmteoverdracht van de **warme bron** naar de warmtemotor en van de warmtemotor naar de **koude afvoer** kunnen de temperaturen **constant** zijn of **variëren**.

Wat betekent het rendement van een warmtemotor?

Welk deel van de opgenomen warmte wordt omgezet in netto arbeid?



$$\eta = \frac{W}{Q_{in}}$$

Rendement = netto geleverde arbeid / opgenomen warmte.

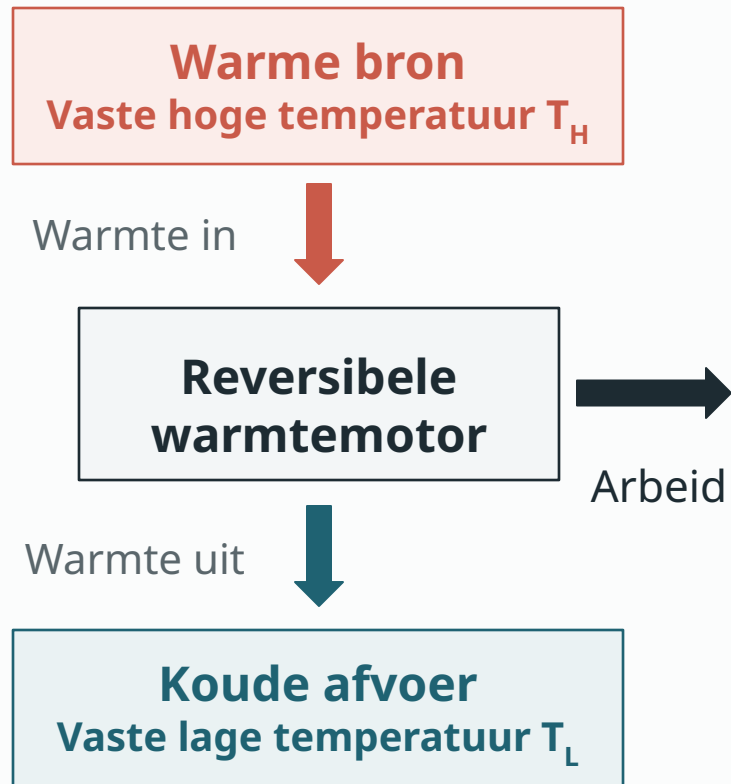
Het rendement geeft aan welk deel van de opgenomen warmte als netto arbeid beschikbaar komt.

Voorbeeld per cyclus: 100 J warmte in
40 J arbeid + 60 J warmte uit
 $\eta = 40 / 100 = 40\%$

Geldig bij constante én veranderende temperaturen van de bron en de afvoer. De volgende sheet behandelt Carnot bij twee vaste temperaturen.

Carnot: warmte-uitwisseling bij twee vaste temperaturen

Indeling naar externe warmte-uitwisseling: isotherme en niet-isotherme cycli.



Carnot behoort tot de klasse van cycli met isotherme warmte-uitwisseling

Daarmee bedoelen we hier cycli met isotherme warmteopname en warmteafgifte: tijdens elk van deze processen blijft de temperatuur constant.

Warmteopname bij T_H

De warmtemotor neemt reversibel warmte op bij de vaste hoge temperatuur.

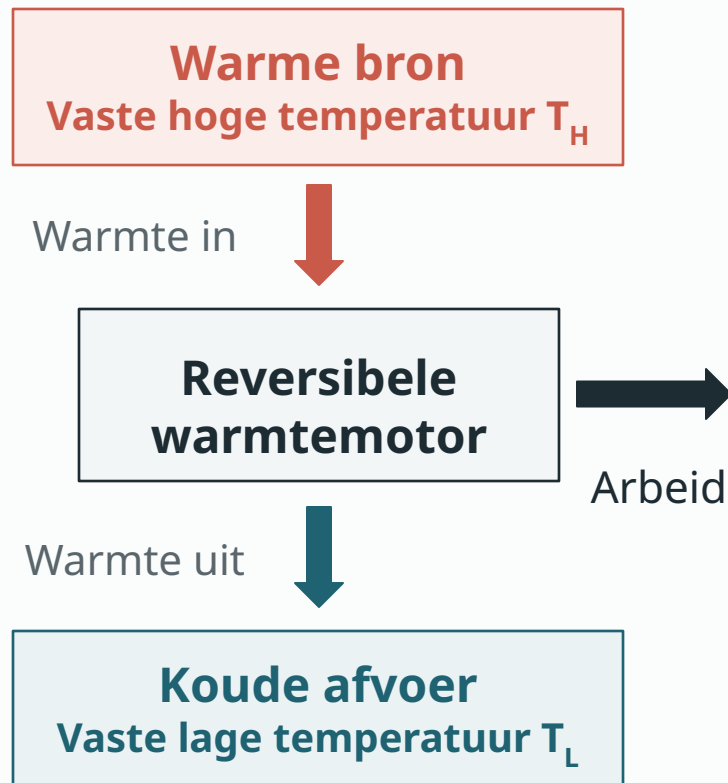
Warmteafgifte bij T_L

De warmtemotor geeft reversibel warmte af bij de vaste lage temperatuur.

Tussen deze twee temperaturen verandert de temperatuur tijdens stappen zonder warmteoverdracht.

Het klassieke Carnot-rendement

Exact bereikt door een volledig reversibele warmtemotor tussen twee vaste temperaturen.



Temperaturen in kelvin.

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Dit rendement wordt uitsluitend bereikt door volledig reversibele warmtemotoren met isotherme warmteopname en warmteafgifte bij twee vaste temperaturen.

‘Verliesvrij’ betekent: geen irreversibiliteiten in de cyclus en haar warmte-uitwisseling. Over een volledige reversibele cyclus is de integraal van Clausius gelijk aan nul. Ook het met de exergieanalyse berekende verlies aan arbeidsvermogen is dan nul.

Bij irreversibiliteiten is het rendement lager. Bij dezelfde temperaturen van de warme bron en de koude afvoer blijft de formule de bovengrens.

Typen cycli: isotherme en niet-isotherme warmte-uitwisseling

Indeling naar de externe warmteopname en warmteafgifte van de cyclus.

Isotherme externe warmte-uitwisseling

Carnot
Stirling*
Ericsson*

Niet-isotherme externe warmte-uitwisseling

Brayton · Otto
Diesel · Atkinson
Kalina · Rankine

Elke cyclus heeft **eigen formules** voor
het rendement, geldig onder de
gekozen aannames.

* Ideale cycli van Stirling en Ericsson met perfecte regeneratie.

De vormen duiden categorieën aan; het zijn geen thermodynamische diagrammen.

Een specifieke formule is geen algemene rekenmethode

Vierkant en rechthoek

$$A = a^2$$

Specifiek voor vierkanten

Exact voor een vierkant met zijde a .

Bij ongelijke lengte en breedte bepaalt a^2 de oppervlakte niet.

De formule blijft exact binnen het bereik waarin zij geldt.

Hoe beschrijven we ook de andere configuraties exact?

Carnot en niet-isotherme cycli

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{L}}}{T_{\text{H}}}$$

Exact binnen dit bereik

Exact bij reversibele warmteoverdracht op twee vaste temperaturen.

De hoogste en laagste temperatuur alleen bepalen geen reversibele referentie voor de specifieke niet-isotherme cyclus.

De voorgestelde verhouding tussen Carnot en Clausius

Van een specifieke, exacte formule naar een overkoepelend raamwerk voor vergelijking

Clausius: algemeen raamwerk voor vergelijking

**Carnot
Stirling*
Ericsson***

**Isotherme cycli:
twee vaste
temperaturen**

Omvat isotherme én
niet-isotherme cycli.

Ook bij meerdere of
veranderende
temperaturen.

* Ideale cycli van Stirling en Ericsson met perfecte regeneratie.

Gevestigde basis

Voor een reversibele cyclus:

$$\oint \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = 0$$

Voorgestelde operationalisering

Deze gelijkheid, samen met de energiebalans en het vastgelegde verloop van de warmte-uitwisseling, uitwerken tot een algemeen toepasbare benchmarkmethode.

Geen nieuwe natuurwet

Van reversibele cyclus naar rendement

Carnot: twee vaste temperaturen

Gevestigde afleiding

Voor reversibele warmte-uitwisseling bij twee vaste temperaturen.

$$\eta_{\text{rev}} = f \left(\frac{Q_{\text{in}}}{T_{\text{H}}} - \frac{Q_{\text{uit}}}{T_{\text{L}}} = 0 \right)$$

Dit geeft:

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_{\text{L}}}{T_{\text{H}}}$$

f staat voor de volledige wiskundige operationalisering van de gelijkheid, inclusief energiebalans, gespecificeerde warmte-uitwisseling en randvoorwaarden.

Q_{in} en Q_{uit} zijn positieve warmtehoeveelheden. T_{b} is de lokale absolute temperatuur waar de warmte de cyclusgrens passeert.

Rendement is één toepassing binnen het voorgestelde algemene raamwerk voor reversibele cycli.

Van gelijkheid naar rendement

De stap via f

De gelijkheid beschrijft de reversibele warmte-uitwisseling.

De energiebalans verbindt warmte met arbeid.

De volledige wiskundige uitwerking geeft het rendement.

Van reversibele cyclus naar rendement

Carnot: twee vaste temperaturen

Gevestigde afleiding

Voor reversibele warmte-uitwisseling bij twee vaste temperaturen.

$$\eta_{\text{rev}} = f \left(\frac{Q_{\text{in}}}{T_{\text{H}}} - \frac{Q_{\text{uit}}}{T_{\text{L}}} = 0 \right)$$

Dit geeft:

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_{\text{L}}}{T_{\text{H}}}$$

f staat voor de volledige wiskundige operationalisering van de gelijkheid, inclusief energiebalans, gespecificeerde warmte-uitwisseling en randvoorwaarden.

Q_{in} en Q_{uit} zijn positieve warmtehoeveelheden. T_{b} is de lokale absolute temperatuur waar de warmte de cyclusgrens passeert.

Clausius: ook bij veranderende temperaturen

Voorgestelde operationalisering

Ook voor reversibele warmte-uitwisseling bij veranderende temperaturen.

$$\eta_{\text{rev}} = f \left(\oint \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T_{\text{b}}} = 0 \right)$$

Rendement is één toepassing binnen het voorgestelde algemene raamwerk voor reversibele cycli.

Van thermodynamische basis naar voorgestelde methode

Carnot: specifieke referentie

Het Carnot-rendement wordt exact bereikt bij volledig reversibele warmte-uitwisseling op twee vaste temperaturen.

Clausius: algemene basis

De gelijkheid van Clausius voor reversibele cycli geldt ook bij niet-isotherme warmte-uitwisseling.

Voorgestelde operationalisering

Deze gelijkheid, samen met de energiebalans, warmte-uitwisseling en randvoorwaarden, uitwerken tot een algemeen toepasbare benchmarkmethode.

Carnot blijft behouden als specifiek geval binnen het voorgestelde algemene raamwerk voor reversibele cycli.

Welke gevolgen kan dit hebben voor onderwijs en engineering, als de methode onafhankelijk wordt bevestigd en meerwaarde biedt?

Mogelijke impact op onderwijs en engineering

Als de voorgestelde methode wordt bevestigd en aantoonbare meerwaarde biedt, kan de doorwerking breed zijn.

Onderwijs en vakliteratuur

Ruim 300 unieke boektitels kunnen inhoudelijk worden geraakt door de voorgestelde modernisering van de thermodynamische cyclustheorie.

Voorlopige schatting binnen dit project; impact afhankelijk van validatie.

Analyse en ontwerp

Kan ingenieurs helpen gericht te optimaliseren op energie-efficiëntie: verbrandingsmotoren, energiecentrales, kerncentrales, warmtepompen en koelsystemen.

Meerwaarde te toetsen per toepassing.

De Lorentz-workshop: onafhankelijke toetsing

Drie vragen voor de toetsing: onafhankelijke reconstructie, vergelijking en afbakening.

1 Klopt de afleiding?

Onafhankelijk reconstrueren en controleren.

Aannames en de grenzen waarbinnen de methode geldig is expliciteren; tegenvoorbeelden zoeken.

2 Wat voegen de methoden toe?

Vergelijken met bestaande methoden.

Rekenvoorbeelden voor isotherme en niet-isotherme cycli onderzoeken. Aanvullende inzichten vaststellen.

3 Welke gevolgen zijn aantoonbaar?

Onderbouwen wat resultaten betekenen voor onderwijs en vakliteratuur.

Doorwerking naar analyse en ontwerp toetsen en open vragen afbakenen.