

Warmte-overdracht in kernenergetische installaties

Citation for published version (APA):

Bogaardt, M. (1963). Warmte-overdracht in kernenergetische installaties. *De Ingenieur*, 75(35), w123-w126.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1963

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Commissie van Bijstand:

Dipl.-Ing. F. G. van Asperen, prof. ir. H. C. A. van Eldik Thieme,
Prof. ir. H. E. Jaeger, Dipl.-Ing. H. F. L. Pénard

Warmte-overdracht in kernenergetische installaties ¹⁾

621.039.534

door prof. dr. M. Bogaardt

Summary: Brief review of the heat technological aspects of nuclear reactors with an emphasis on water cooled and moderated reactors.

The importance of high specific power and high heat flux is explained, and the measures to be taken in order to obtain high specific power are indicated.

As examples of heat exchange equipment in the external reactor circuit the primary heat exchangers, the pressurizer and several other items are mentioned.

Finally, a few other reactor types are briefly considered as far as their thermodynamic characteristics are concerned.

1. Inleiding

1.1. In deze voordracht is uitgegaan van de stelling dat de warmtetechnische ingenieur een betrekkelijk veelzijdig man is en dat hij niet alleen in warmte-overdrachtsproblemen thuis moet zijn, maar eveneens in materiaalproblemen, in constructie en in regeltechniek; als gevolg daarvan komen in deze voordracht een aantal aspecten voor, die niet geheel onder het hoofdstuk warmte-overdracht alléén zijn onder te brengen.

1.2. Het principe van de werking van kernreactoren mag wel als bekend verondersteld worden: neutronen, die bij de splijting van een kern vrijkomen, worden afgeremd in de moderator en verwekken vervolgens na vangst in een uranium kern, een nieuwe splijting. Het principe van de opstelling in een reactor wordt gegeven in fig. 1.

De kernreactor is in zeker opzicht essentieel verschillend van de conventionele ketel of het fornuis. In de watergekoelde reactoren treedt praktisch geen stralingsoverdracht op. In de gasgekoelde reactoren treedt in zekere mate een geringe stralingsoverdracht op.

¹⁾ Voordracht, gehouden door ir. J. P. Simon Thomas, bij ontstentenis van Prof. dr. M. Bogaardt, voor de Sectie voor Warmtetransport en de Afdeling voor Kerntechniek van het K.I.v.I., op 17 september 1962 te Eindhoven. Zie *De Ingenieur* 1962, Nr. 33, blz. A. 455 en Nr. 43, blz. A. 580.

De warmte wordt niet overgedragen aan door pijpen stromend water, maar wordt juist in pijpvormige elementen opgewekt.

De kernreactor staat eigenlijk in principe vrij dicht bij de chemische reactor, waarin een exotherme reactie optreedt; het dichtst bij de chemische reactor staat wel de homogene waterige kernreactor of de homogene suspensie-reactor.

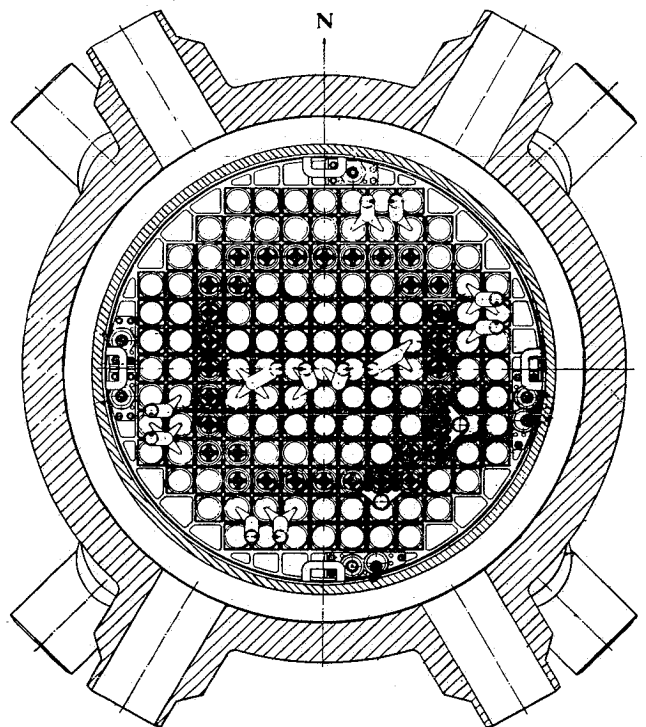


Fig. 1. Horizontale doorsnede van een drukwaterreactor. De splijtstofstaven zijn ondergebracht in vierkante bussen waarvan in de figuur de cilindrische mondstukken zichtbaar zijn.

In de vergelijking met een chemische reactor moeten wij er nog op wijzen, dat in dit geval van een autokatalytische reactie sprake is, waarvoor een nauwkeurige temperatuurbeheersing strikt noodzakelijk is.

1.3. Een belangrijk punt in de beschouwing van kernreactoren is het feit, dat de verdeling van de neutronen beheerst wordt door de normale diffusie- en transportvergelijkingen. Aan de rand van de reactor is daardoor de vermogensdichtheid gering, terwijl in het centrum een maximum optreedt. Voorts is van belang te vermelden dat de besturing van de reactor veelal geschiedt met behulp van regelstaven, waarmede tijdelijk een overschot aan neutronen wordt weggenomen, ofwel het ontstaan van een overmaat aan neutronen wordt toegelaten totdat de nieuwe, gewenste, evenwichtsconcentratie van neutronen is bereikt, waarna de regelstaaf weer zodanig wordt ingesteld, dat de vermenigvuldigingsfactor juist gelijk 1 is. Gedurende het bedrijf van een reactor verandert de samenstelling van de splijfstof en hierdoor zou, indien men geen maatregelen treft, op den duur de vermenigvuldigingsfactor niet gelijk aan 1 kunnen worden gehouden. Men voorziet in deze moeilijkheid door de reactor in de aanvang met een te grote vermenigvuldigingsfactor uit te rusten en het exces aan vermenigvuldiging door regelstaven te laten absorberen.

2. Warmtetechnische problemen aan de reactorzijde

2.1. De kernreactor onderscheidt zich als warmtebron van de conventionele ketel door zijn hogere specifieke investering, die men kan uitdrukken in guldens per kg splijtbaar materiaal of per m³ reactorinhoud of per m² verwarmend oppervlak in de reactor. Om de specifieke investering in de zin van guldens per kW geïnstalleerd vermogen binnen redelijke grenzen te brengen, moet men hoge specifieke belastingen toelaten, d.w.z. veel megawatts per m³ of per m² extraheren.

In vergelijking met conventionele installaties zijn de warmtefluxen dan ook een orde van grootte hoger, nl. in de orde van 2-3 MW/m².

Tabel 1 toont de specifieke belastingen in verschillende reactortypen.

Tabel 1.

Naam	Type	Type (MW/m ³) (MW/m ²) (MW/m ²)		
		gem.	gem.	max.
Enrico	Snel	800	2,20	3,8
Fermi				
Yankee	PWR	52	0,27	1,4
NERO	PWR	50	0,38	1,52
Savannah	PWR	20	0,22	0,97
Dresden	BWR	29	0,3	1,35
Piqua	OMR	19	0,11	0,51
Bradwell	CH	0,57	0,025	0,045

Men ziet dat voor de PWR, waarvoor als voorbeeld gekozen is een scheepsreactor, waaraan het R.C.N. op dit moment werkt, een relatief lage maximale warmteflux wordt opgegeven, nl. 1,52 MW/m². Dit bedrag zal echter aanzienlijk kunnen worden verhoogd, wanneer de bestaande PWR-reactor meer en meer wordt ontwikkeld in de richting van wat men een nucleaire doorpompetel zou

kunnen noemen. Wij zullen zo dadelijk zien welke factoren de maximale warmteflux bepalen. De gemiddelde warmtestroomdichtheid in de reactor is in het algemeen ongeveer een factor 4 lager dan de piekwaarde, hetgeen samenhangt ten eerste met de hierboven gesignaleerde ruimtelijke verdeling van het vermogen en ten tweede met het optreden van zgn. 'hot spot' factoren, dat zijn factoren die nog eens in het bijzonder aanleiding geven tot het optreden van lokale pieken in de vermogensverdeling.

2.2. Van de factoren, die de maximale warmteflux bepalen, wordt hieronder een opsomming gegeven, waarbij wij tevens zullen zien welke maatregelen wij kunnen treffen om tot een gunstiger gemiddelde warmtestroomdichtheid in de reactor te komen.

De temperatuurverdeling in een splijstofstaaf is in principe geschetst in fig. 2.

Men ziet dat – uitgaande van een gemiddelde watertemperatuur – een stijging optreedt naar de wand van de splijstofbekleding, vervolgens een stijging door de bekleding heen, een verdere temperatuursprong over de spouw tussen de bekleding en het splijstofmateriaal en tenslotte een stijging in het slecht geleidende splijstofmateriaal zelve. Het is duidelijk dat het totale temperatuurverschil van het water tot aan het hart van de splijstofstaaf bepaald wordt door de warmtestroomdichtheid aan het oppervlak van de splijstofstaaf. Men is nu beperkt in deze maximale harttemperatuur door de smelttemperatuur van de splijstof, die in het geval van uraniumoxyde ca. 2600 °C bedraagt. Op zichzelf zou het smelten van de splijstof in het hart geen bezwaar zijn, ware het niet dat dan de gasvormige splijtingsproducten, die in de splijstof opgeslagen worden, vrij zouden komen en bij de heersende temperatuur een zodanige gasdruk in het element zouden veroorzaken, dat de splijstofbekleding zou bersten. Men kan nu de toelaatbare warmteflux verhogen door een aantal maatregelen:

- een andere splijstof kiezen, die beter de gasvormige splijstofproducten vasthoudt en een hoger smeltpunt heeft;
- de geproduceerde gassen steeds afvoeren;
- het materiaal van de hulzen verbeteren.

Een tweede wijze om tot hogere gemiddelde waarden van de warmteflux in de reactor te komen, is te zorgen dat de vermogensverdeling in elke willekeurige doorsnede van de reactor wordt afgevlakt. Dit is onder meer te bereiken door aanpassing van de steek van de splijstofstaafjes of door variatie in de plaatselijke verrijking. Een verdere bijdrage tot het afvlakken van de vermogens-

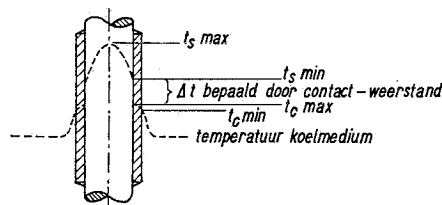


Fig. 2. Het temperatuurprofiel van een splijstofstaaf met bekleding.

t_s = harttemperatuur van de splijstof;

t_c = bekleding-temperatuur;

Δt = temperatuurval over de spouw tussen splijstof en bekleding.

verdeling wordt geleverd door het vermijden van regelstaven; een regelstaaf die uit zijn directe omgeving neutronen wegvangt, zal in het algemeen in de iets verder afgelegen omgeving pieken in de vermogensverdeling veroorzaken.

In hetzelfde kader past een systematische verlaging van de zgn. 'hot spot' factoren, dat zijn dus de factoren, die worden gehanteerd om rekening te houden met plaatselijk opgedrukte pieken in de vermogensverdeling; zoals gezegd: de regelstaven zijn mogelijke boosdoeners. Andere oorzaken kunnen zijn: de niet uniforme verdeling van splijstof en moderator, en niet gewenste variaties in de splijstofverrijking. Door zorgvuldig ontwerp zal men deze factoren tot relatief lage waarden kunnen terugbrengen. Tenslotte kan de toelaatbare warmteflux worden beperkt door het optreden van hydraulische instabiliteiten in de reactorkoelkanalen. In het geval van een drukwaterreactor, waarin geforceerde circulatie wordt toegepast, zal men – evenals in de ketelbouw – in het algemeen zulke instabiliteiten wel weten te voorkomen; aanpassing van de indredeweerstand van het kanaal is een vanouds bekend patentmiddel. In het geval van de kokend water reactoren met natuurlijke circulatie – dat zijn reactoren voor grote vermogens – zal men terdege rekening moeten houden met het optreden van instabiliteiten. Afgezien van het aspect van de nucleaire terugkoppeling, waarop hier niet nader wordt ingegaan, is het gemakkelijk in te zien dat in een instabiele toestand van het stromingskanaal doorbranden van de splijstofhulzen zal optreden, indien de toelaatbare warmteflux is overschreden. In dit verband kan men opmerken, dat het koken in de reactor op twee wijzen bijdraagt tot het opvoeren van de verhouding tussen gemiddelde warmteflux en maximale warmteflux:

- doordat een afvlakking van de vermogensverdeling teweeg wordt gebracht, en
- doordat het koken ertoe medewerkt de hot spot factoren te verlagen.

In de moderne drukwaterreactor wordt dan ook lokaal koken toegelaten, maar het is een kwestie van zeer zorgvuldige ontwikkeling wanneer men de drukwaterreactor en de kokend water reactor tenslotte tot een enkel type wil synthetiseren.

Het koken in een drukwaterreactor leidt aanstonds tot een aantal problemen, waarvan hieronder enkele worden genoemd.

- De drukval over een koelkanaal wordt verhoogd.
- De plaatselijke geproduceerde bellen zullen door radiale menging van het koelwater ten dele weer verdwijnen; gevraagd wordt: in welke mate.
- Wanneer drukfluctuaties in het systeem voorkomen, zullen daarmee fluctuaties in de dampfractie in de reactor gepaard gaan, men dient de overdrachtsfunctie systeemdruk – drukval over een kanaal nauwkeurig te kennen.
- De stromingsverdeling in de niet-stationaire toestand zal nauw samenhangen met het karakter van de zojuist genoemde overdrachtsfunctie. Instabiliteiten in de stromingsverdeling moeten worden vermeden.
- Men dient de 'hot spot' factoren zorgvuldig te onderzoeken en vooral na te gaan het effect van vervormingen van de elementen en van de aangebrachte roosters tussen de splijstofstaafjes. Indien een systeem met natuurlijke circulatie wordt toegepast, moet hieraan nog worden toegevoegd:

— Hydraulische instabiliteiten moeten worden vermeden.

En passant kan men hier nog aan toevoegen dat – gezien de hierboven geschetste problemen – het gebruik van water als koelmiddel wel het meest aangewezen is.

Het voordeel dat de toepassing van organische koelmiddelen biedt in de vorm van een hogere uitlaattemperatuur bij lagere werkdruk wordt al gauw teniet gedaan door de veel minder gunstige thermodynamische eigenschappen van de organische vloeistof (veel hoger pompvermogen) en vooral door de ontleding van de vloeistof, die aanleiding geeft tot vervuiling van het warmtewisselend oppervlak. Het zal hierdoor moeilijk zijn tot zeer hoge waarden van de warmteflux te komen.

3. Warmtetechnische problemen buiten de reactor

Buiten de reactor liggen de warmtewisselingsproblemen veel meer op conventioneel terrein; in het algemeen zal men daar veel minder geïnteresseerd zijn in zeer nauwkeurige kennis van warmte-overdrachtsgetallen en van stromingsverdelingen. In hoofdzaak zijn de volgende soorten apparaten te noemen.

3.1. Warmtewisselaar

De warmtewisselaar van een drukwaterreactor wordt gekenmerkt door de hoge druk van het primaire water, 140 atm werkdruk. Als gevolg daarvan worden relatief dikke pijpen toegepast, waarbij de warmteweerstand in hoofdzaak wordt geleverd door de pijpwand. Eveneens zal men in deze warmtewisselaars zeer dikke pijplaten aantreffen.

Een andere karakteristiek van de warmtewisselaars is het betrekkelijk lage temperatuurniveau, waardoor met stoom van matige kwaliteit genoeg moet worden genomen. In het algemeen heeft het geen zin boven 40 atm uit te gaan; in de huidige reactoren is dat verzadigde stoom. Een bijzondere eis, die men aan de hoofdwarmtewisselaars van een PWR moet stellen, indien het gaat om toepassing als scheepsreactor, is dat men in staat moet zijn snelle vermogenswisselingen te volgen zonder dat ontoelaatbaar vochtige stoom aan de turbine wordt geleverd. Bijzondere aandacht moet dus worden gericht op het ontwerp van de stoomdrogers.

Een interessante ontwikkeling is die, welke gaat in de richting van het oververhitten van de secundaire stoom. Deze oververhitting kan in principe – zij het in zeer bescheiden mate – worden uitgevoerd met behulp van het primaire reactorwater. Wanneer de reactoruitlaattemperatuur tot 315° kan worden verhoogd, is het zonder meer mogelijk stoom te leveren van 40 atm en 280-290 °C, dat is met 50-60° oververhitting. Men moet dan echter nog meer op de stoomkwaliteit letten i.v.m. corrosie in de oververhitter.

Een tweede mogelijkheid is de interne oververhitting, waarbij de secundaire stoom terug wordt geleid naar de reactor om daar te worden oververhit. Men ontmoet dan echter een aantal reactorfysische en reactordynamische problemen annex met materiaalproblemen, met name waar het betreft de bekleding van de splijstofstaafjes. Natuurlijk kan men ook nog denken aan oververhitting met behulp van fossiele brandstoffen, maar daarover praat een kerntechnicus niet gaarne.

3.2. Drukgenerator

De drukgenerator is een van elektrische verwarmings-elementen voorzien vat, dat dient tot het in stand houden van de systeemdruk. De temperatuur van het water in de drukgenerator is de verzadigingstemperatuur, welke behoort bij de werkdruk van het systeem. Indien bij vermogensvariëaties de temperaturen in het primaire systeem variëren, zal daarmee het volume van de waterinhoud van het primaire systeem variëren en bepaalde hoeveelheden water zullen dus naar of uit de drukgenerator stromen. De dampruimte boven de vloeistofspiegel in de drukgenerator zal dan groter of kleiner worden, hetgeen resulteert in een variatie van de systeemdruk. Is de systeemdruk te hoog, dan wordt automatisch zoveel water in de dampruimte gespreid als nodig is om de oorspronkelijke druk te herstellen.

Is de druk te laag geworden, dan zorgen de elektrische verhitters voor vorming van een adequate hoeveelheid damp. Voor het correcte ontwerp van een drukgenerator moet men daarom in de eerste plaats weten welke hoeveelheden water naar of uit het vat zullen stromen, maar tevens op welke wijze en hoe snel verdamping in de drukgenerator plaatsvindt, m.a.w. men moet de stroming in het vat beheersen.

3.3. Andere warmtetechnische toestellen

Andere warmtewisselingsapparaten zijn de warmtewisselaars voor de noodkoeling, voor de restkoeling, voor het reinigingscircuit, e.d. Het gaat merendeels om betrekkelijke conventionele problemen.

4. Andere reactoren

Er is tot dusverre hier bijna uitsluitend sprake geweest van watergekoelde reactoren. Er zijn natuurlijk nog veel

andere typen in ontwikkeling, waarvan ik er hier heel in het kort enkele wil noemen.

4.1. *De gasgekoelde lage druk reactor, type Calder Hall*
Uit het voorafgaande zal nu duidelijk zijn, dat de lage-gasdruk leidt tot lage specifieke vermogens en tot hoge specifieke investeringen. In deze reactoren wordt natuurlijk uranium als splijtstof gebruikt.

4.2. *Hoge druk gasgekoelde reactoren, type Dragon*
In deze reactoren wordt helium gebruikt als koelmiddel bij een druk van 40 atm. In het algemeen is de ontwikkeling van deze reactoren zeer moeilijk en ik heb de indruk dat veiligheidsproblemen voor deze reactoren zeer moeilijk zijn op te lossen. In verband met de hoge temperatuur van het gas uit de reactoruitlaat, bijv. 800 °C, kan men zich afvragen of hier de gasturbine een kans gaat krijgen, zij het in een indirecte cyclus. Anderzijds moet worden erkend, dat men met stoom van hoge temperatuur ook bijzonder aantrekkelijke rendementen kan bereiken.

4.3. *De organisch gemodereerde reactor, type Piqua*
Hierin dient een organische vloeistof, een mengsel van terphenylen als moderator en als koelmiddel. Zoals reeds uiteengezet zijn hoge rendementen bereikbaar, maar het lijkt wel dat de specifieke investering eveneens hoog wordt.

4.4. Snelle reactoren

Het koelmiddel is hier vloeibaar natrium of een Na-K eutecticum. Er zijn hoge warmtefluxen haalbaar. Uiteraard kan de uitlaat-temperatuur van natrium hoog worden gekozen, zodat stoom van uitstekende kwaliteit kan worden geproduceerd. Een aantrekkelijk alternatief is nog het primaire natrium-circuit zijn warmte te laten afgeven aan een kwik-circuit, waarin een kwikdamp-turbine is opgenomen.

Warmtetechnische aspecten bij kernenergiecentrales ¹⁾

621.039.534

door prof. ir. D. G. H. Latzko

Summary: *Thermal aspects of nuclear power stations.*

A comparison between the economics and the technical principles of fossile and nuclear power generation systems shows one of the main design goals of the latter to be: maximum heat extraction from the reactor core combined with maximum conversion efficiency of this heat to mechanical power. By dividing the heat transfer process into three distinct phases, viz. within the fuel element, from fuel element to coolant and from coolant to steamcycle, the inherent limitations and sometimes conflicting requirements for achieving the aforementioned goal are brought out and discussed for various reactor coolants.

¹⁾ Voordracht, gehouden voor de Sectie voor Warmtetransport en de Afdeling voor Kerntechniek van het K.I.v.I., op 17 september 1962 te Eindhoven. Zie *De Ingenieur* 1962, Nr. 33, blz. A. 455 en Nr. 43, blz. A. 580.

1. Inleiding

Het zal voor velen een bekend feit zijn, dat kernenergiecentrales op het ogenblik wel technisch aanvaardbaar, maar niet economisch concurrerend kunnen worden gebouwd en daarom voor elektriciteitsmaatschappijen een weinig aantrekkelijk produktiemiddel vormen. In het onderstaande zal getracht worden uiteen te zetten hoe de kans op inhalen van deze achterstand der kernenergiecentrales in belangrijke mate bepaald wordt door warmtetechnische aspecten, en worden nagegaan welke mogelijkheden de constructeurs ter beschikking staan om deze aspecten in voor de kernreactoren gunstige zin te wijzigen. Hiertoe lijkt het allereerst gewenst, even iets te zeggen over de *kostenstructuur* van kernenergetische en met fos-