

BOUWFYSICA 1

Vakgroep Bouwfysica TU Delft

© VSSD

Eerste druk 1984,

Tweede druk 1990-2007

Uitgegeven door de VSSD

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

URL met informatie over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/c011.htm>

De uitgever stelt aan docenten die dit boek in cursusverband gebruiken, desgewenst de collectie digitale illustraties ter beschikking. Een verzoek kan men zenden aan hlf@vssd.nl.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Printed in The Netherlands

ISBN-10 90-407-1150-X

ISBN-13 978-90-407-1150-3

NUR 924, 955

Trefw.: bouwfysica

Voorwoord

In de voortreffelijke VSSD-handleiding 'Bouwfysica' uit het begin der zestiger jaren, geschreven door wijlen prof.dr.ir. C.W. Kosten, werden de voornaamste gebieden van de bouwfysica, te weten verlichting, warmte en vocht en akoestiek puntig beschreven.

In de laatste 20 jaar is het vakgebied echter zo sterk uitgegroeid dat deze handleiding als collegedictaat bij het bouwfysica-onderwijs aan de afdelingen der Civiele Techniek en Bouwkunde niet meer toereikend was.

Het uitgroeien van het vakgebied is enerzijds toe te schrijven aan de gevolgen van de energiecrisis met de daaruit volgende noodzaak tot beperking van energieverliezen bij gebouwen én de wens tot benutting van 'gratis' zonnewarmte middels actieve en passieve zonnenergiesystemen, anderzijds is op basis van nieuw ontwikkelde beoordelingscriteria onder andere tot invoering van de Wet Geluidhinder overgegaan, hetgeen ook eisen stelt aan de toelaatbaar geachte geluidniveaus in de gebouwde omgeving.

Bij de vakgroep Bouwfysica van de afdelingen Civiele Techniek en Bouwkunde zijn in de afgelopen 15 jaar een aantal collegedictaten uitgekristalliseerd waarvan deze nieuwe handleiding in feite het eerste deel is.

De bedoeling van dit boek is inzicht te verschaffen in de grondregels, die bij het ontwerpen van ruimte-omsluitende constructies bepalend zijn voor het te verwachten leefklimaat en het daarbij kunnen hanteren van de elementaire basisbegrippen op het gebied van warmte, vocht, ventilatie, akoestiek en licht. Naast het gebruik als collegedictaat bij het bouwfysica-onderwijs aan de TH Delft is deze handleiding ook zeer geschikt voor gebruik op HTS-en, waar de laatste jaren een sterk toenemende belangstelling voor dit vakgebied valt te signaleren.

Ik hoop dat dit boekje een bijdrage zal mogen leveren in het wekken van de belangstelling voor de bouwfysica en het zodoende een uitnodiging tot verdere verdieping in en toepassing van het vakgebied mag vormen.

Rest mij nog slechts een woord van dank uit te spreken aan alle medewerkers van de vakgroep Bouwfysica die aan de totstandkoming van dit boek een bijdrage hebben geleverd en aan de VSSD voor de keurige verzorging van deze uitgave.

Delft, juli 1984

prof.ir. A.C. Verhoeven

Voorwoord bij de tweede druk

Naast enkele correcties bleek bij deze tweede druk een aanpassing op het gebied van de nachtelijke uitstraling noodzakelijk.

Delft, april 1990

ir. F.H. Tumbuan

Inhoud

	pag.
0. INLEIDING	7
0.1. Doel van de bouwfysica	7
0.2. Buitenklimaat	13
1. WARMTE	20
1.1. Warmtetransportmechanismen	20
1.2. De analogonmethode	25
1.3. Warmte-overgangscoefficiënt en warmtedoorgangscoefficiënt	28
1.4. Stationair temperatuurverloop in een constructie	39
1.5. Eenvoudige koudebruggen	40
1.6. Warmte-isolatie en warmte-accumulatie van dak- en gevel-constructies	41
1.7. Plaats van de isolatie in verband met mogelijk optredende temperatuurspanningen	52
1.8. Nachtelijke uitstraling	54
1.9. Zonbestraling op betonvlakken (daken)	56
1.10. Temperatuur-amplitude demping	61
2. VOCHT EN VENTILATIE	63
2.1. Inleiding vocht	63
2.2. Basisbegrippen vocht	63
2.3. Ventilatie	71
3. AKOESTIEK	75
3.1. Golven, geluid	75
3.2. Effectieve geluiddruk, gehoorgrenzen	77
3.3. Hoorbereik, octaven	78
3.4. Golfbronnen, obstakels, geluidveld	80
3.5. Akoestisch vermogen, intensiteit	81
3.6. De dB-schaal, geluiddruk-, intensiteit- en vermogenniveau	83
3.7. Resultierend geluiddrukkniveau, samengesteld geluid, maskering	87
3.8. Absorptie, nagalmtijd, galmstraal	90
3.9. Isofonen, luidheid	96
3.10. Gewogen niveau's	97
3.11. NR-krommen	100
3.12. Het equivalent geluiddrukkniveau	101
3.13. Geluidisolatie	103
Appendix 3A. Differentiaalvergelijking voor vlakke golven	105
Appendix 3B. Intensiteit van een diffuus veld	107

4. LICHT	109
4.1. Inleiding	109
4.2. Relatieve spectrale ooggevoeligheid $V(\lambda)$	109
4.3. Spectraal vermogen, het vermogenspectrum	110
4.4. Lichtstroom Φ in lumen	110
4.5. Rendement van een lamp	112
4.6. Lichtsterkte in candela	113
4.7. Luminantie en helderheid	114
4.8. Verlichtingsterkte E	116
4.9. Reflectiefactor	117
4.10. Diffuus reflecterende en diffuus stralende oppervlakken	117
4.11. Fotometrische grondwet	119
4.12. Verlichting door een oneindig lange cylinderbron	121
4.13. Algemene verlichtingsformule	122
Appendix 4A. Afleiding van de formule $\Phi = \pi LS$ voor een diffuus stralend oppervlak	124
Literatuur	125
Trefwoordenlijst	126

0. Inleiding

0.1. Doel van de bouwfysica

Onder de bouwfysica wordt verstaan het vakgebied uit de fysica, dat zich bezighoudt met alle fysische verschijnselen die van invloed zijn op:

- de behaaglijkheid in de gebouwde omgeving in de meest algemene zin,
- de energiehuishouding,
- de woonbaarheid van gebouwen uit gezondheidstechnisch oogpunt,
- de duurzaamheid van het gebouw (investerings- en onderhoudskosten).

■ *Behaaglijkheid*

Een goede definitie van het begrip 'behaaglijkheid' is moeilijk te geven. Men zou kunnen zeggen, dat de mens zich behaaglijk voelt, indien het complex van omgevingscondities zodanig is, dat hij daardoor niet gehinderd wordt bij het uitoefenen van zijn dagelijkse bezigheden. Onder 'dagelijkse bezigheden' moet daarbij worden verstaan zowel het verrichten van de dagelijkse arbeid, als de perioden van ontspanning binnenshuis of recreatie buitenshuis alsmede de noodzakelijke perioden van nachtrust.

Een aantal voorbeelden van bouwfysische eisen die door de mens ten aanzien van de behaaglijkheid in het algemeen worden gesteld zijn:

- bescherming tegen winterse kou en zomerse hitte (warmteprobleem).
- het voorkómen van tochtverschijnselen (stromings-temperatuurprobleem).
- het weren van hinderlijke geluiden afkomstig van burens of van buiten (akoestisch probleem).
- het voorkómen van oppervlaktecondensatie op muren en ruiten (vocht-temperatuurprobleem).
- het bevorderen van een goede ventilatie met verse en frisse lucht, waarmee tevens het optreden van stank moet worden voorkomen (warmte-vochtstromingsprobleem). Hierin kan eventueel de luchtverontreiniging worden betrokken.
- het optimaal benutten van de mogelijkheden van het buitenklimaat ten aanzien van bezonning, wind, etc. (speelplaatsen in de zon, prettig winkelen, etc.).
- het bevorderen van een doelmatige en comfortabele verlichting.
- het voorkómen van verblinding.

Uit deze voorbeelden volgt direct dat het complex van omgevingscondities, die bepalend zijn voor de behaaglijkheid, bestaat uit een wisselwerking van een aantal fysische grootheden, zoals:

● *binnenshuis:*

- de luchttemperatuur in een ruimte T_1 .
- de oppervlaktetemperatuur van de omgevende wanden, plafond en vloer, waarvoor een stralingstemperatuur T_s als maat kan worden gedefinieerd.
- de vochtigheidsgraad van de lucht.
- de luchtbeweging in het vertrek, zowel naar ruimtelijk patroon als naar snelheid, het geluidniveau ter plaatse.
- het verlichtingsniveau ter plaatse door daglicht en/of kunstlicht.

♦ *buitenshuis:*

- het geluidniveau ter plaatse ten gevolge van verkeers-, vliegtuig- en industrielawaai.
- de windsnelheid en -richting als maat voor de verstoringen van de heersende wind.
- fysische factoren waarmee optimale bezonning eventueel beschaduwning is te realiseren op plaatsen, waar dat gewenst is, zowel buitenshuis (speelplaatsen) als binnenshuis.

Zou men de mate van behaaglijkheid van het binnenklimaat in een getalwaarde willen uitdrukken, dan zou een grootheid ter beschikking moeten zijn, die alle bovengenoemde factoren in rekening brengt. Zo'n grootheid echter, zal zelf ook weer afhankelijk zijn van de aard van de bezigheden (zittend werk, handenarbeid, slapen, lopen, etc.) en de daarbij gedragen kleding en nog van een aantal psychologische effecten (bijvoorbeeld kleuren kunnen een warme of koude indruk geven). Aangezien van de samenhang tussen de *thermische behaaglijkheid* enerzijds en het welbevinden uit akoestisch en/of lichttechnisch oogpunt anderzijds nog nauwelijks kwantitatief iets te zeggen valt, is het voorlopig zinloos om te trachten een algemeen behaaglijkheidscriterium te definiëren, dat met alle genoemde aspecten rekening houdt.

Wel is het reeds mogelijk om criteria voor de thermische behaaglijkheid op te stellen, waarin de warmte- en vochttechnische parameters alsmede de invloed van de luchtsnelheid zijn verwerkt [1].

Zoals ook uit de opsomming van de van belang zijnde grootheden reeds blijkt, is de *bouwfysica* op logische wijze in de volgende gebieden in te delen:

- warmte,
- vocht,
- akoestiek,
- licht.

Naast bovengenoemde beschouwingen ten aanzien van de beoordeling van de behaaglijkheid van de mens in het binnenklimaat is een nieuw vakgebied ontstaan dat de fysische beoordeling van het buitenklimaat nastreeft, dat wil zeggen de beoordeling van de bebouwde omgeving ten aanzien van:

- verkeers-, vliegtuig- en industrielawaai,
- bezonning,
- windhinder.

Dit vakgebied, de *stedebouwfysica*, staat nationaal en internationaal in de belangstelling. Op dit gebied zal nog veel speurwerk nodig zijn om tot een verantwoorde kwaliteitsaanduiding te komen van een stad of stadsdeel, uitsluitend op grond van bouwfysische maten.

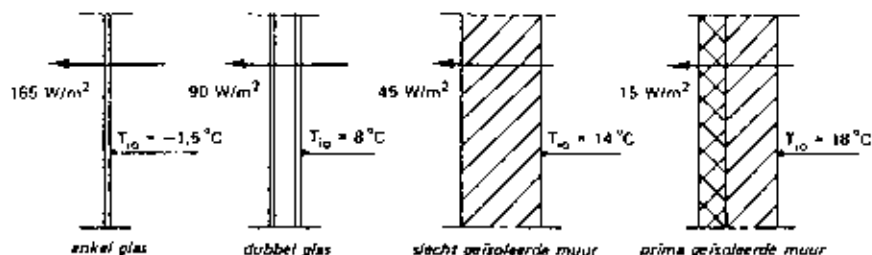
Tenslotte bestaat er een steeds groeiende belangstelling voor het gebied van de *tropische fysica*, die beoogt om voor landen met extreme zon- en lichtevoelheden bij extreme buitenluchttemperaturen zonder air-conditioning toch een aanvaardbaar binnenklimaat te verkrijgen (benutten van thermische trek, goede natuurlijke ventilatie, passende warmte-accumulatie, etc.).

Vaak komt hierbij nog de eis, dat de uit bouwfysisch oogpunt aan te brengen voorzieningen nauwelijks geld mogen kosten en uitgevoerd moeten kunnen worden met materialen ter plaatse (low-cost housing).

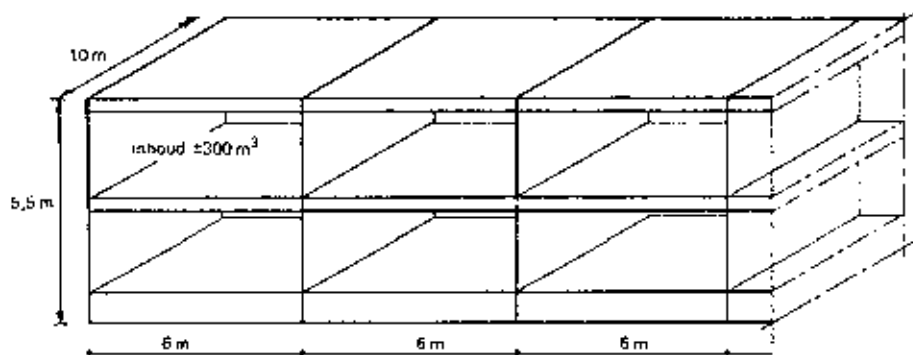
■ Energiehuishouding

De energie voor ruimteverwarming wordt doorgaans ontleend aan brandstof (aardgas of olie), soms aan elektriciteit (in ons land uit brandstof opgewekt) en in (nog) sporadische gevallen gedeeltelijk aan directe zonne-energie.

De hoeveelheid energie die nodig is om een gebouw te verwarmen hangt allereerst sterk af van de warmte-isolerende eigenschappen van de ruimte omsluitende constructies en van de mate van ventilatie, waarmee ook warmte wordt afgevoerd, zie figuur 0.1 en 0.2.



Figuur 0.1. Warmteverlies en binnenoppervlaktetemperaturen bij verschillende constructies (buitenluchttemperatuur $T_a = -10^\circ\text{C}$, binnenluchttemperatuur $T_i = 20^\circ\text{C}$).



	klasse matig		klasse goed***	
	kW	%	kW	%
glas	6,3*	36	3,5**	37
ventilatie	3,5	20	2,3	24
vloer	3,4	18	1,5	16
dak	2,2	13	1,3	14
zijmuur	2,2	13	0,9	9
totaal	17,6	100	9,5	100

*) enkel glas

**) dubbel glas

***) NEN 1068 (1964)

Figuur 0.2. Warmteverlies, opgesplitst in verschillende componenten bij een bepaalde woning die matig dan wel goed geïsoleerd is (buitenluchttemperatuur $T_a = -10^\circ\text{C}$, binnenluchttemperatuur $T_i = 20^\circ\text{C}$).

Uit de figuren 0.1 en 0.2 krijgt men een goede indruk van de invloed van de isolerende eigenschappen van de afzonderlijke constructies op het totale warmteverlies; bij een goed geïsoleerde woning ongeveer 50% van het verlies bij matige isolatie. Naarmate een constructie beter isoleert en dus minder warmte naar buiten verliest, neemt ook de oppervlaktetemperatuur aan de binnenzijde van een constructie toe (zie figuur 0.1). Voor de behaaglijkheid betekent dit dat met een luchttemperatuur kan worden volstaan die lager mag zijn dan in het geval van een ruimte met lage oppervlaktetemperatuur.

Een lagere luchttemperatuur betekent weer minder warmteverlies door ventilatie naar buiten, dus extra winst. Een 1 °C lagere luchttemperatuur betekent ruwweg 7% minder warmteverlies per jaar.

Uit deze overwegingen volgt reeds het grote belang van een optimale isolatie met betrekking tot het actuele probleem van energiebeperking.

Sinds de oliecrisis is ook het zoeken naar rendabele toepassingsmogelijkheden om met behulp van directe zonnenergie het energieverbruik nog verder terug te dringen, sterk toegenomen. Het is goed hierbij te bedenken dat toepassing van zonnecollectoren in Nederland niet gauw zal betekenen dat de conventionele verwarmingsinstallatie kleiner gedimensioneerd kan worden, aangezien deze installatie in perioden met veel bewolking in staat moet blijven de gehele warmtebehoefte te leveren.

Tenslotte zij er ook vast op gewezen, dat ten aanzien van de energiebeperking niet alleen de warmte-isolatie van de ruimte-omsluitende constructie bepalend is, maar dat ook de vorm van het gebouw een belangrijke invloed op het warmteverlies heeft. De vorm van het gebouw bepaalt namelijk het totale buitenoppervlak en hoe groter dit oppervlak is des te groter de warmtetransmissie naar buiten.

Bij een iglo (met de vorm van een halve bol) is de invloed van de vorm op het warmteverlies door de constructie dan ook minimaal; een bol heeft immers van alle lichamen het kleinste oppervlak bij een bepaald volume!

In de nieuwe Nederlandse warmtenorm wordt als maatstaf voor het isolatieniveau van een gebouw als totaal de nieuwe grootte 'thermische-isolatie-index' I_t geïntroduceerd:

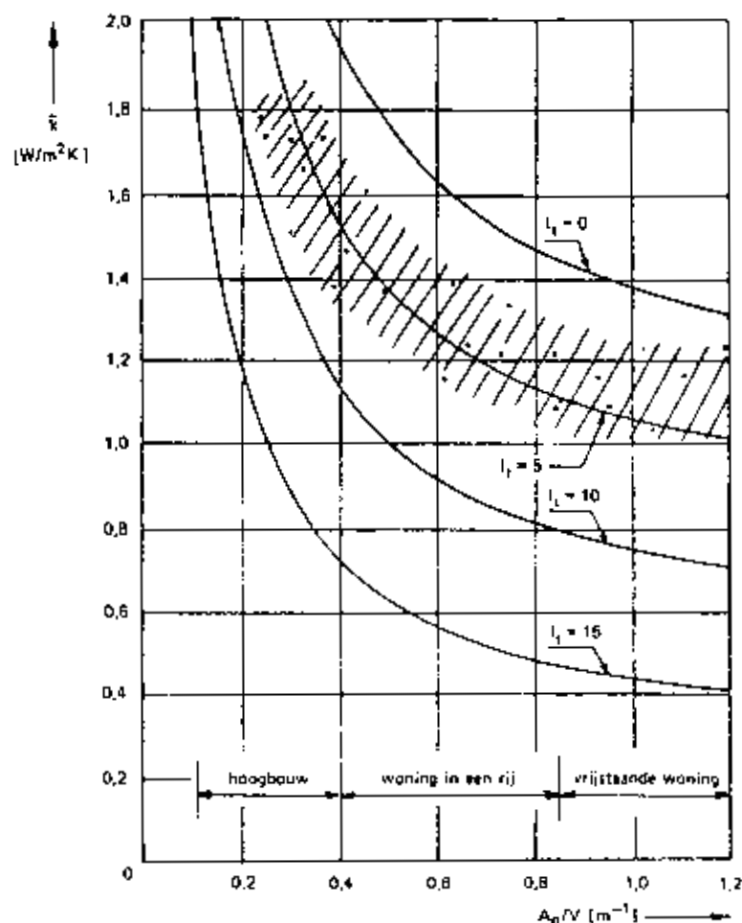
$$I_t = \frac{80\left(\frac{A_0}{V}\right)(1 - \bar{k}) + 30}{4\frac{A_0}{V} + 1}$$

waarin

A_0 = totale buitenoppervlak van het gebouw

V = het volume van het gebouw.

In figuur 0.3 is het verband weergegeven tussen de gemiddelde warmtedoorgangcoëfficiënt \bar{k} en de verhouding A_0/V voor verschillende waarden van I_t . Hieruit is te zien dat naarmate de verhouding A_0/V voor een gebouw groter wordt, het gebouw beter geïsoleerd moet worden.



Figuur 0.3. Verband tussen de gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt \bar{k} en de verhouding A_0/V voor verschillende waarden van I_1 . Het gearceerde gebied geeft globaal het gebied van het huidige woningbestand aan.

■ Bewoonbaarheid en duurzaamheid

Naast de eisen die aan de behaaglijkheid worden gesteld bestaan ook eisen uit gezondheidstechnisch oogpunt (bijv. schimmelvorming, uitdrogen van de slijmvliezen bij een te lage vochtigheidsgraad, voldoende afvoer van geproduceerd CO_2 , etc.) en fysische eisen die aan de constructie gesteld worden uit overwegingen van duurzaamheid. Voorbeelden van dergelijke eisen zijn:

- het voorkómen van scheuren in constructies door temperatuurspanningen,
- het voorkómen van afvriezing en rotting door inwendige condensatie,
- het voorkómen van mufte (grond)lucht door onvoldoende ventilatie van kruipruimten,
- het voorkómen van bouwschade in het algemeen.

In tegenstelling tot de tegenwoordig wel eens verkondigde bewering dat de bouwfysica een tijdverschijnsel zou zijn, is ze een logisch gevolg van de principiële wijzigingen die zich na de Tweede Wereldoorlog in het bouwproces hebben voltrokken. Zij wordt beheerd door 'keiharde' fysische wetten die niet veronachtzaamd

mogen worden.

Hoewel in feite het gehele bouwproces geëvolueerd is (zie tabel 0.1), zijn het vooral de gevels die grote veranderingen hebben ondergaan. Uit tabel 0.2 blijkt dit overduidelijk, wanneer men de glasoppervlakken vroeger en nu vergelijkt. Uit deze verschillen volgt voor vele gebouwen de noodzaak van 'air-conditioning', daar deze bouwwerken anders in de zomer vrijwel onbewoonbaar zijn.

	vroeger	nu
functionele eisen aan bouwwerken gesteld	van eeuw tot eeuw vrijwel ongewijzigd	verhoging van de eisen: <ul style="list-style-type: none"> ■ extra comfort eisende bewoners ■ verlichting en klimatisering van bedrijven ■ specifiek nieuwe eisen (TV-studio)
materialen en constructies	grote continuïteit (zware materialen, klassieke constructies)	nieuwe, lichte en handzame materialen (belangrijk i.v.m. warmtedoorgang en tevens voor de akoestische isolatie)
produktietechnieken	grote continuïteit (handwerk met eenvoudig gereedschap)	nieuwe produktiemethoden (prefabricage)
herhaling	geen massaproductie (éénmalige bouwopgave), bij schade geen calamiteit	<ul style="list-style-type: none"> ■ zeer grote bouwopgaven ■ massaproductie van woningen en scholen

Tabel 0.1. Principiële wijzigingen in het bouwproces.

	vroeger	nu
glasoppervlak	25-40%	60-100%
bescherming tegen zon beschaduwing	markiezen (buiten) veel	Venetian blinds (binnen) weinig (hogere bouw en meer open stadsaanleg)
bouwconstructie	zwaar	licht (weinig warmte-accumulatie)
blootstelling aan wind ventilatiemogelijkheden	weinig ruim voldoende	veel (als bij beschaduwing) weinig
verlichting	weinig (400 lux)	veel (800 lux of meer)
blootstelling aan lawaai	weinig, bovendien door toepassing van zware materialen: goede geluidisolatie	veel, verkeers-, vliegtuigen industrielawaai. Bovendien vergt toepassing van lichte constructies een zorgvuldige overweging om goede geluidisolatie te halen

Tabel 0.2. Bouwfysische gevolgen van de wijzigingen in de bouw.

Van oudsher werd gebouwd volgens het 'trial and error'-systeem. Dit betekende dat als basis van vakmanschap de ervaring diende, dat wil zeggen de empirisch verworven kennis van wat wel en niet kon. Deze ervaring werd van generatie op

1. Warmte

1.1. Warmtetransportmechanismen

Om enig inzicht te verkrijgen in het mechanisme van het warmtetransport door en in een constructie is het nodig enkele grootheden nader te belichten. Warmte kan op drie manieren worden getransporteerd (overgedragen), namelijk door:

- convectie,
- straling,
- geleiding.

Bij warmte-overdracht door *convectie* wordt de warmte door een stromend medium (bijv. lucht) meegevoerd. Boven een radiator stijgt de warme lucht op en circuleert door het vertrek.

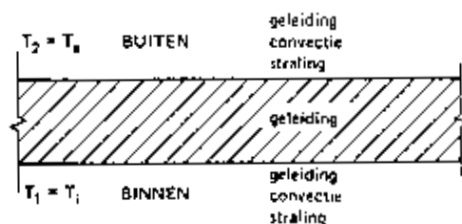
Men spreekt over *straling* indien het transport plaatsvindt in de vorm van elektromagnetische golven van 4 tot $50\mu\text{m}$; een transportmedium is niet nodig. Zo bereikt de zonne-energie de aarde in de vorm van straling.

Over *geleiding* spreekt men als het transport plaatsvindt in een materiaal van molecuul op molecuul. In de vaste materie van een materiaal is deze vorm van transport de enige mogelijke.

Naast genoemde drie mechanismen bestaat ook nog de mogelijkheid van warmtetransport via verdampen en condenseren. Bij verdampen wordt plaatselijk warmte onttrokken, die elders bij condenseren weer als condensatiewarmte kan vrijkomen.

Warmtestroomdichtheid

In het algemeen kan men zeggen dat een warmtestroom zal optreden wanneer media met verschillende temperaturen aan elkaar grenzen. Wanneer een homogene constructie de scheiding vormt tussen twee ruimten met constante temperatuur T_1 en T_2 (men noemt dit een stationaire toestand) waarbij T_1 hoger is dan T_2 , zal er warmte stromen van de ruimte met temperatuur T_1 naar de ruimte met temperatuur T_2 (figuur 1.1).



Figuur 1.1. Warmte-overdrachtsmechanismen bij een betonplaat, die de scheiding vormt tussen binnen en buiten. Voor de binnentemperatuur T_i is aangenomen dat deze hoger zal zijn dan de buitentemperatuur T_a .

In het geval van figuur 1.1 vindt de warmte-overdracht plaats van de binnenlucht (temperatuur T_i) naar de plaatconstructie door middel van geleiding, convectie en eventueel straling afkomstig van aangrenzende vlakken of gebouwen. Daarna wordt de warmte door middel van geleiding door de plaatconstructie gevoerd (convectie en straling zijn hierbij niet mogelijk), waarna er tenslotte weer over-