

<http://www.vssd.nl/hlf/d020.htm>

Cahiers voor Fysische Chemie

0

Inleiding en index

prof.dr. G. Frens

Laboratorium voor Fysische Chemie TU Delft

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Frens, G.

Cahiers voor fysische chemie / G. Frens. - Delft : Delft University Press

0: Inleiding en index. - Ill.

Uitg. in opdracht van Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

ISBN 90-407-2107-6

NUGI 841

Trefw.: fysische chemie

© 2000 Laboratorium voor Fysische Chemie TU Delft

Eerste druk 2000

Uitgegeven door:

Delft University Press

Postbus 98, 2600 MG Delft

tel. +31 15 27 85678, telefax 015 27 85706, e-mail info@library.tudelft.nl

internet: <http://www.library.tudelft.nl/dup>

In opdracht van:

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Poortlandplein 6, 2628 BM Delft

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

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

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, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

ISBN 90-407-2107-6

Inhoud

INHOUD....	5
“Water, is dat H ₂ O?”	5
Modellering	5
Cahiers	6
Fysische chemie	6
Thermodynamische wetten en deeltjesmodellen	8
Karakteristieke tijd- en lengteschalen	9
Denkraam vs. vakkennis	10
Literatuur om erop na te slaan (per cahier ingedeeld):	11
INDEX VAN DE CAHIERS VOOR FYSISCHE CHEMIE	12

Inhoud....

“Water, is dat H₂O?”

Het is best een bijzonder moment als je bij een schoolreünie verteld hebt over de scheikundestudie en een oud klasgenoot, die notaris is geworden zegt: “Scheikunde? O, ja. Water dat is H₂O”.

Is dat niet bijzonder dan? Zelfs de notaris zegt: “Water is H₂O”. Terwijl hij toch al zijn leven lang de ervaring kent dat water nat is. Hij heeft echt geen laboratoriumproef nodig om te weten dat drinkwater bevriest als het tot onder nul wordt afgekoeld. Of dat de zee zout is en de regen zoet. Maar blijkbaar hebben de chemici er iedereen, inclusief de notaris, van weten te overtuigen dat dit allemaal logisch volgt uit hun model voor water. Het deeltjesmodel met H₂O moleculen. Dat chemische model is abstract en bedacht door wetenschappers, te beginnen bij de wet van Boyle en Gay Lussac. Een model dat vloeibaar water opvat als een verbinding uit waterstofgas en zuurstofgas. Welke notaris had zoiets kunnen verzinnen?

Modellering

Het water dat we kennen kan worden gemodelleerd in chemische termen. En blijkbaar is dat model nog te begrijpen óók. Het wordt door de mensen geaccepteerd zonder vakkennis over chemische experimenten en wiskundige formules. Volgens de chemici zou het natte water opgebouwd zijn uit deeltjes (moleculen). Alle watermoleculen zijn gelijk en ze hebben allemaal dezelfde eigenschappen. Met dat model kunnen fysisch chemici beredeneren hoe water zich gedraagt.

Het combineren van atoomsoorten in moleculen stelt de chemicus in staat om de enorme veelheid van stoffelijke verschijnselen te analyseren. Zijn begrippenapparaat (het deeltjesmodel) werkt ordenend en rubricerend. Zo blijven de dingen overzichtelijk. Maar het analyseren van allerlei verschijnselen is niet voorbehouden aan chemici in hun laboratoria. Ook een notaris in een zeilboot gaat op zoek naar een verklarend denkmodel als hij zich plotseling realiseert dat de wolken wit zijn en de lucht blauw.

Het modelleren stelt ons niet alleen maar in staat verschijnselen te analyseren en te verklaren. Het belangrijkste van een model is dat het ook resultaten voorspelt voor proeven die nog nooit zijn uitgevoerd. We kunnen dus aan de hand van een model op onderzoek uit gaan en experimenten ontwerpen die ons begrip vergroten. Bij het deeltjesmodel van de chemici lukt dat voortreffelijk. De resultaten van chemische research spreken tot de verbeelding. Vanuit het model worden direct nieuwe dingen ontdekt en ontworpen, zonder eindeloos en vruchteloos uitproberen van allerlei alternatieven.

Een notie die zich opdringt omdat (bedachte!) modellen goed werken is, dat de wetten van de natuur betrouwbaar zijn. Wie dat merkt voelt zich uitgedaagd om uit het wedstrijdverloop spelregels van de natuur af te leiden. Dat is natuurwetenschap.

Natuurwetenschap is heel nuttig, want wie de regels kent kan het spel beïnvloeden. Techniek en natuurwetenschappen zijn eigenlijk spannende denksporten waar iedereen aan mee kan doen. Iedereen mag eigen modellen bedenken. Sommige modellen zijn echter effectiever dan andere.

Het chemische model, een onderliggende structuur van deeltjes in interactie met elkaar, is overtuigend omdat het goed werkt. De vooruitgang van de geneeskunde begon ermee dat beschrijvende vakken als erfelijkheidsleer, fysiologie, farmacologie en endocrinologie moleculaire fundamenteën kregen. In ons land waren de Utrechtse hoogleraren Ernst Cohen, Kruijt en Overbeek de pioniers. Hun boekje "Inleiding tot de Fysische Chemie, de kolloïdchemie in het bijzonder, voor biologen en medici" heeft, vanaf 1924, generaties van doktoren, apothekers, veeartsen, natuurkunde- en biologieleraren vertrouwd gemaakt met de kracht van moleculaire modellen.

De Cahiers voor Fysische Chemie zijn bedoeld als een hulpmiddel in diezelfde traditie. Op het snijvlak van chemie met andere disciplines worden onverwachte feiten ontdekt. Op de grenzen van de vakken wordt de effectiviteit van verschillende denkmodellen op de proef gesteld. Chemici moeten zich niet opsluiten in hun eigen specialismen. Hun denkwijzen en modellen moeten toegankelijk zijn voor klasgenoten, vrienden en collega's. Dat kan best zonder dat we die anderen verplichten om zo lang op chemie te studeren tot ze zelf chemici geworden zijn. Voor communicatie over de grenzen van de discipline heen moeten logisch redenerende mensen elkaars denkmodel kennen.

Cahiers

De auteurs van de Cahiers voor Fysische Chemie zijn docenten van de TU Delft. Zij hebben ze geschreven voor elkaar en voor hun studenten. De cahiers bleken echter ook heel bruikbaar voor promovendi uit andere Delftse disciplines, die fysische chemie gebruikten om verschijnselen te modelleren. De aanpak kan nuttig zijn voor afgestudeerden uit andere faculteiten, waar soms opgeleid wordt uit een andere invalshoek. Verder was er steeds meer vraag naar de cahiers onder technici en wetenschappers uit de industrie en bij vakdocenten uit het HBO en VWO.

De cahiers zijn uitdrukkelijk niet bedoeld als collegedictaten of als leerboeken. Zij presenteren modellen: hoe men waarnemingen en verschijnselen kan interpreteren in termen van deeltjes en hun interactie. De auteurs zelf hadden na de studie ook eigen ervaringen met de toepasbaarheid van boekenwijsheden in wetenschap en techniek. Dat heeft hun kijk soms wat veranderd. De cahiers presenteren, als persoonlijke visie van de schrijvers, de samenhang van moleculaire modellen met statistische thermodynamica, reactiekinetiek, en de eigenschappen van polymeren, dispersies en processen.

Fysische chemie

Natuurwetten bestaan, maar niet vanzelf. Ze zijn geformuleerd door mensen. De bedoeling ervan is om waarnemingen en ervaringen met levende en dode dingen zo sa-

men te vatten dat die aan anderen kunnen worden doorgegeven.

De natuurwetten worden geacht een samenhangend en logisch consistent geheel te vormen. Daarom mogen ze ook niet met elkaar in strijd zijn. Dat is eigenlijk niet veel meer dan een idealistisch uitgangspunt, want het stelsel van wetten, dat wij kennen, is geen complete beschrijving van de natuur. Er kunnen steeds nieuwe ervaringen zijn. Er worden voortdurend nieuwe proeven, ontdekkingen en waarnemingen gedaan. Die hoeven niet te passen in het bestaande patroon van redeneringen. En dat doen ze ook niet altijd.

De verschillende natuurwetenschappen worden bovendien gekenmerkt doordat verschillende (benaderde) stelsels van regels en wetten worden gebruikt. Sommige aspecten van de natuurkunde krijgen extra nadruk, andere worden verwaarloosd. In de chemie hoor je zelden over zwaartekracht. Die is er wel, maar zijn effect op moleculen is te verwaarlozen in vergelijking met de warmtebeweging. In de klassieke mechanica liggen de verhoudingen omgekeerd. Daar verwaarloost men de warmtebeweging van zware, trage lichamen.

Fysische Chemie is het eigen stelsel van wetmatigheden dat gebruikt wordt om processen en verschijnselen te beschrijven vanuit een chemisch standpunt. Het is een Fysisch vak, want het richt zich op het grote geheel der natuurwetenschappelijke kennis. Door uit te gaan van de opbouw der materie uit veel microscopisch kleine deeltjes, probeert de fysische chemie systeem te brengen in die kennis en ze voor de chemicus toepasbaar te maken. Op de deeltjes, waar alle stoffen uit bestaan, worden in de fysische chemie natuurkundige wetten toegepast uit de elektriciteitsleer, de mechanica en de optica. Chemisch is het vak ook, want de deeltjes waar het over gaat zijn de atomen en moleculen uit de scheikunde. De fysische chemie onderzoekt hoe stoffeigenschappen samenhangen met het aantal en de interactie van de moleculen. Die interactie hangt af van de omstandigheden, en verschilt in reikwijdte en sterkte met het soort moleculen. Op die manier worden de eigenschappen van stoffen en het verloop van omzettingen chemisch beschreven en verklaard.

Natuurwetenschap begint bij empirische ervaring. Wat we zien, voelen of meten beschrijven we als 'toename van de druk', 'temperatuurdaling' of 'omzetting van de ene stof in de andere'. We kunnen dergelijke waarnemingen interpreteren door het definiëren van de *Energie* en de *Entropie*. We nemen dan aan dat de eerste en de tweede hoofdwet van de thermodynamica gelden voor alle verschijnselen. Als dat zo is vormt het een kader voor wat we meten of waarnemen waar alle verschijnselen in (moeten) passen.

Begrippen als 'druk' en 'temperatuur' verliezen op de schaal van moleculen en atomen hun oorspronkelijke, macroscopische betekenis. In de fysische chemie zijn het grootheden die te maken hebben met het gemiddelde aantal of de gemiddelde snelheid van de moleculen. Maar een dergelijk uitspraak is voor de chemie niet vrijblijvend: de interpretatie van een grootheid moet altijd consistent blijven met de experimentele waarnemingen. De verbanden die de thermodynamica beschrijft moeten gelden onaf-

hankelijk van de vraag of wij meetbare grootheden moleculair wensen te interpreteren of niet.

Er moet een betrouwbare weg ontdekt worden om van de macroscopische beschrijving te komen op een microscopische, moleculaire interpretatie van de verschijnselen. Dat lukt ons door de basisbegrippen van de thermodynamica, Energie en Entropie, te voorzien van nieuwe definities in termen van de deeltjes in het systeem. De eerste en de tweede hoofdwet blijven dan automatisch van kracht. Zij beschrijven alle waarnemingen, en de thermodynamische verbanden voor experimentele grootheden dus ook. Maar met de nieuwe definities worden de formules en de interpretatie ervan uitgedrukt in termen van deeltjes en hun eigenschappen. Op die manier wordt de experimentele wereld fysisch-chemisch beschreven in termen van: de aantallen moleculen en het volume dat ze innemen, de interactie van die moleculen met elkaar en de verdeling van de moleculen over het systeem.

We kunnen tegen deze statistisch-thermodynamische achtergrond modellen maken van experimenteel waargenomen verschijnselen en die interpreteren als de werking van fysische wetten op moleculen. Bij het ontwikkelen van nieuwe technologie brengt fysisch-chemische modelvorming ons vaak sneller op weg dan veel experimenteren. Als we weten met welke deeltjes we te maken hebben en wat de krachten zijn die op die deeltjes werken, kunnen we ook voorspellen wat de uitkomst zou moeten zijn van nog niet uitgevoerde proeven.

Bijzonder belangrijk is modelvorming op gebieden die nog niet goed verkend zijn. Steeds weer blijkt dat ons stelsel van wetten en regels nog verre van compleet is. Met name ontbreekt het aan een kloppend, werkend systeem van wetten voor systemen die niet in evenwicht zijn, dus voor het verloop van chemische reacties in een oplossing, voor de stabiliteit van processen in reactoren en scheidingskolommen, voor het metabolisme van levende organismen.

We kunnen echter mechanisch, thermisch en chemisch evenwicht volledig interpreteren. Zo weten we hoe de bijbehorende experimentele eigenschappen vertaald worden in moleculaire termen. Met die eigenschappen van de moleculen als een extra gegeven krijgen microscopische modellen voor experimentele waarnemingen een groot realiteitsgehalte. De uitdaging voor de moderne fysische chemie is om vanuit die kennis óók moleculair-kinetische modellen te ontwerpen voor chemische reacties en voor andere niet-evenwichtssituaties, en zo een brug te slaan naar de dynamica van de proceschemie.

Thermodynamische wetten en deeltjesmodellen

Verschijnselen, waarnemingen en resultaten van experimenten zullen zich altijd houden aan de wetten van de thermodynamica. Uit die waarnemingen, en uit Boltzmann's, stelling $S = k \ln \Omega$, wordt afgeleid welke deeltjes relevant zijn bij ieder afzonderlijk proces. Bij processen wordt entropie geproduceerd: de warmteeffecten ontstaan door herrangschikking van de deeltjes in het systeem. Chemische reacties zijn hergroepering van atomen en moleculen. Voor het geleiden van stroom in een

koperdraad zijn elektronen de relevante deeltjes. Om de smeerbaarheid van een zalf of margarine in te stellen beschouwt men de emulsiedruppeltjes. Het idee is steeds, dat de deeltjes de actie maken, maar ieder proces heeft karakteristieke tijd- en lengteschalen waaruit kan worden afgeleid welke soort deeltjes er relevant zijn. Wie waarnemingen en verschijnselen in macroscopische systemen modelleert in termen van relevante deeltjes plaatst de experimentele feiten binnen een geneste set van tijd- en lengteschalen. Met een opklimmende grootte: van de elektronen en de atomen tot aan het reactordesign en het procesontwerp.

Soms is er interactie. Tussen de deeltjes in het systeem of tussen de tijdschalen van het proces. Als het verschijnsel een tijd- of lengteschaal heeft van dezelfde orde als ook voorkomt in het onderliggende meer elementaire niveau, worden naast het aantal en de interactie van de relevante deeltjes zelf en ook kenmerken van de elementaire bouwstenen zichtbaar.

Moleculaire chemie is niet het complete deeltjesmodel. Eigenschappen van moleculen op nanometerschaal kunnen via de micrometerschaal van colloïdale verschijnselen de effecten op mesoschaal van mengen, ontmengen en roeren beïnvloeden in oplossingen, emulsies en suspensies. Op de macroschaal van procesinstallaties en procesverloop zijn alle onderliggende modellen medebepalend voor de kwaliteit van het product. Het is de kunst om niet alleen naar atomen en moleculen te blijven kijken, zelfs wanneer men als een chemicus denkt en doet. Voor ieder niveau van tijd- en lengteschalen zijn soorten relevante deeltjes te onderscheiden.

Karakteristieke tijd- en lengteschalen

In de volgorde van de Cahiers zit de gedachte van een fysische chemie met opklimmende tijd- en lengteschalen. In het eerste deeltje van de serie wordt met behulp van statistische thermodynamica de relatie gelegd van macroscopische verschijnselen naar de onderliggende deeltjesmodellen. Dit beeld wordt in het tweede cahier uitgewerkt op moleculair niveau. Voor oplossingen in evenwicht worden microscopische modellen opgezet. Een colligatieve eigenschap van een oplossing zoals de osmotische druk telt het aantal relevante deeltjes. De activiteitscoëfficiënten geven aan hoe de interacties tussen die deeltjes volgen uit het model. Die interacties zijn kenmerkend voor de chemische aard van de deeltjes. Het derde Cahier gaat uit van deeltjes met chemische eigenschappen. Het introduceert de tijdschaal voor reacties: de parameter die beschrijft dat het systeem niet meer in evenwicht is. Die tijdschaal is te voorspellen met behulp van een kinetisch model. Later, in het vijfde cahier, zal een vergelijkbare benadering terugkeren in de DLVO-theorie. Op dit colloïdale niveau zijn de tijd- en lengteschalen echter anders en wordt niet de reactiekinetiek bestudeerd maar uitvlokking en stabiliteit van de nanodeeltjes uit de colloïdchemie.

Het model voor polymeren als kettingmoleculen in Cahier 4 gebruikt schalings-theorie voor het introduceren van nieuwe supramoleculaire deeltjes: de Kuhn-segmenten en de blobs als statistische eenheden bij macromoleculaire verschijnselen. Het vijfde Cahier gaat over nog grotere deeltjes: het focuseert, met de bijbehorende grotere tijd- en

lengteschalen op de theorie van grensvlakken en colloïdale eigenschappen. Tenslotte komt in Cahier 6 de nadruk helemaal op macroscopische processen met veel deeltjes te liggen, hun tijdschalen en de bijbehorende drijvende krachten. Nu is de cirkel rond. Thermodynamica en kinetiek lopen samen in modellen voor de verstoring van het evenwicht. De discussie wordt niet beperkt tot het lineaire domein van de klassieke “fysische transportverschijnselen”. Zodoende komen ook macroscopische instabiliteiten, structuren en fluctuaties van druk, temperatuur en deeltjesconcentratie aan bod, die zich enerzijds manifesteren in chemische reactoren en processen ver van evenwicht en anderzijds bij grootschalige verschijnselen in de vrije natuur.

Denkraam vs. vakkennis

Met opzet zijn de Cahiers voor Fysische Chemie in het Nederlands geschreven en niet in het Engels. Wie voor het eerst gaat kennismaken met basisconcepten van een nieuw vakgebied, en niet van plan is om nog jaren verder te studeren voor het doorgronden van de finesses, mag een beroep doen op alle subtiliteiten van de eigen moedertaal om ideeën scherp te omlijnen. Wie, al lezende in de Cahiers, nieuwsgierig is geworden naar de (ongetwijfeld bestaande) strakke en formele redeneringen of de elegante afleidingen die de fysische chemie te bieden heeft, kan die vervolgens echt gaan bestuderen. Dat kan bijvoorbeeld aan de hand van de vragen die tussen de tekst van de cahiers zijn opgenomen. Men heeft, om die te beantwoorden de gedachtegang uit de cahiers nodig, en verder feitenkennis over het specifieke geval – zoals dat in gespecialiseerde literatuur staat of op college wordt verteld. Om je in een onderwerp op die manier te verdiepen zijn veel goede leerboeken en dictaten geschreven. Enkele daarvan zijn opgenomen achter in dit cahier.

De vakkennis wordt ontsloten wanneer men er op studeert met de Cahiers als denkraam. Feiten, formules en verschijnselen hebben in het verhaal hun eigen plaats en onderling verband.

Het is illustratief te weten hoe de Cahiers oorspronkelijk ontstaan zijn. Het begon met een weddenschap en met de vraag: “Kan je, in één weekend en binnen 20 pagina’s, op papier krijgen wat afgestudeerden zouden moeten weten van je vak”. Sommige Delftse docenten voelden zich uitgedaagd. Je hebt binnen die gegeven beperkingen geen tijd om allerlei ideeën van anderen na te lezen en geen ruimte om de afleidingen over te nemen van formules die je kent. Daarom moesten de auteurs hun eigen, persoonlijke, visies opschrijven die zijn daarna alleen nog wat geredigeerd.

Werkendeweg zijn zo de Cahiers voor Fysische Chemie ontstaan. Ze bleken een betrouwbare gespreksbasis over de grenzen van vakdisciplines heen. We gebruiken ze om stofeigenschappen, verschijnselen en processen te bediscussiëren (met experts uit andere vakgebieden) door ze te modelleren tot thermodynamisch verantwoorde deeltjesmodellen.

Literatuur om erop na te slaan (per cahier ingedeeld):

Cahier 1

- ◆ Kondepudi D. en I. Prigogine, *Modern Thermodynamics, From Heat Engines to Dissipative Structures*, Wiley, 1998
- ◆ Berry R.S., Rice S.A. en J. Ross, *Physical Chemistry*, Wiley, 1980.

Cahier 2

- ◆ Atkins P.W., *Physical Chemistry*, Oxford University Press, 1998
- ◆ Berry R.S., Rice S.A. en J. Ross, *Physical Chemistry*, Wiley, 1980.

Cahier 3

- ◆ Atkins P.W., *Physical Chemistry*, Oxford University Press, 1998
- ◆ Logan S.R., *Fundamentals of Chemical Kinetics*, Longman, 1996
- ◆ Hakvoort G., Peereboom M., Scholten J.J.F. en J. Schram, *Reactiekinetiek*, Delftse Uitgevers Maatschappij, 1991

Cahier 4

- ◆ Doi M., *Introduction to Polymer Science*, Clarendon Press Oxford, 1997
- ◆ Hiemenz P.C. en R. Rajagopalan, *Principles of Colloid and Surface Chemistry*, Marcel Dekker Inc., 1997

Cahier 5

- ◆ Hunter R.J., *Foundations of Colloid Science*, Volume 1 en 2, Oxford University Press, 1995.
- ◆ Hiemenz P.C. en R. Rajagopalan, *Principles of Colloid and Surface Chemistry*, Marcel Dekker Inc., 1997
- ◆ Atkins P.W., *Physical Chemistry*, Oxford University Press, 1998

Cahier 6

- ◆ Kondepudi D. en I. Prigogine, *Modern Thermodynamics, From Heat Engines to Dissipative Structures*, Wiley, 1998

Index van de cahiers voor fysische chemie

A

actief transport, 6-10
 activeringsenergie, 3-10
 activeringsenthalpie, 3-22
 activeringsentropie, 3-22
 activiteit, 2-12, 3-26
 activiteitscoëfficiënt, 2-5, 2-12, 2-18, 2-19, 3-26
 ion, 2-21
 adiabatische expansie, 1-14
 adsorbaat, 3-33
 adsorbens, 3-33
 adsorptie, 3-33, 5-14
 adsorptie-isotherm, 3-33, 5-18
 adsorptiesnelheid, 3-33
 affiniteit, reactie, 6-16, 6-17
 amfifiel molecuul, 5-17
 anion, 2-14
 anode, 2-13
 arbeid, 1-5, 6-5
 arbeidsvermogen, 1-5, 1-8
 Arrhenius wet, 3-10
 Arrhenius-plot, 3-10
 attractie
 Van der Waals, 5-12, 5-26
 attractie, Van der Waals
 polymeer, 4-18
 Avogadro getal, 1-13

B

Belousov-Zhabotinsky-reactie, 6-26
 Bénard-cel, 6-20
 betrekking van Born, 3-26
 bevochtiging, 5-12
 bewegingsvergelijking, 6-7
 bezettingsgraad, 3-33, 3-34
 bifurcatie, 6-26
 bimoleculaire reactie, 3-25
 bi-stabiel systeem, 6-24
 blob, 4-28
 Bodenstein principe, 3-16, 3-29
 enzym, 3-35
 Boissenade en de Kepper, model, 6-25
 Boltzmann
 constante, 1-13, 1-20
 verdelingswet, 2-10
 vergelijking, 1-13, 4-23
 wet, 1-13
 Boltzmannverdeling, ionen, 2-19

Born, betrekking, 3-26
 botsingsevenwicht, 3-16
 botsingsfrequentie, 3-15
 botsingskinetiek, 5-20
 botsingstheorie, 3-15
 Boyle en Gay Lussac, wet, 1-9, 1-23, 1-24
 Boyle-temperatuur, 1-28
 branching, 3-29
 Broglie-golflengte, 1-21
 Brown beweging, 5-7
 Brown-beweging, 4-7
 Brusselator, 6-27

C

C^* (overgangskoncentratie), 4-21
 c.m.c., 5-18
 capillaire depressie, 5-13
 capillaire kracht, 5-5
 capillariteit, 5- wetten, 5-15
 cappillaire zuiging, 5-13
 chaosregeling, 6-33
 chaostechnologie, 6-30
 chaotische toestand, 6-30
 chemische potentiaal
 gesloten systeem, 1-22
 niet-ideale oplossing, 2-19
 chemische reactie, 3-5
 chemisorptie, 3-32
 coagulatie concentratie, kritische, 5-22, 5-27
 coëfficiënt
 fenomenologische, 6-9
 stoichiometrische, 6-16
 colligatieve eigenschappen, 2-9
 colloïd, 5-5
 electrocratisch, 5-23
 hydrofoob, 5-23
 lyofoob, 5-23
 colloïdstabiliteit, 5-24
 conformatie, 4-11
 constante
 Boltzmann, 1-13, 1-20
 Faraday, 2-15
 contourlengte, 4-9
 convectie, 6-21
 correlatiefunctie, 4-13, 4-16
 correlatielengte, 4-21, 4-23, 4-29
 corresponderende toestanden, 1-28
 Coulomb, wet, 2-20
 kritische
 micelvormingsconcentratie, 5-18

Curie en Prigogine, principe, 6-10

D

D.L.V.O. theorie, 5-26
 dampspanning, oplossing, 2-9
 Debije en Hückel theorie, 3-26
 Debije en Hückel, theorie, 2-19
 Debije-lengte, 2-22, 5-28
 reciproke, 2-20
 denaturatie, 4-11
 depletie flocculation, 5-29
 desorptie, 3-33
 detailed balancing, 3-13
 diffusie, 1-25, 4-29
 polymeer, 4-26
 diffusiecoëfficiënt, 1-26, 2-10, 5-8
 polymeer, 4-29
 polymeersmelt, 4-30
 diffusiemodel, von Smoluchowski, 3-25
 diffusiestroom, 5-20
 dilatantie, 5-32
 dipoolmolecuul, 3-25
 disperse systeem, 5-20
 dissipatie, 1-5, 6-20
 dissipatiefunctie, 6-8
 dissipatiestructuur, 6-19, 6-22
 dissociatieconstante, 2-18
 dissociatiegraad, 2-18
 distributiefunctie
 ideale keten, 4-11
 segmenten, 4-13
 druk, 1-16, 1-22, 1-24
 gesloten systeem, 1-22
 Laplace, 5-12
 oppervlakte-, 5-18
 osmotische, 2-9, 2-10, 2-18
 polymeer, 4-24
 polymeeroplossing, 4-20
 semi-verdund, 4-22
 dubbellaag
 dikte, 5-28
 elektrische, 5-14, 5-26
 -potentiaal, 5-26
 -repulsie, 5-26

E

Eadie en Hofstee vergelijking, 3-36
 Eilers en Korff, regel, 5-28
 Einstein, viscositeitsvergelijking, 4-26, 5-9
 eiwit, 4-6

- elasticiteitsmodulus, 4-31
 elektro-capillairkromme, 5-14
 elektrode, 2-13
 elektrodereactie, 2-13
 elektroforese, 5-30
 elektroforesesnelheid, 5-30
 elektroforetische remming, 2-23
 elektrokatalyse, 3-34
 elektrolytoplossing, 2-13, 2-18
 elektro-osmose, 5-30, 6-8
 emulsiepolymerisatie, 3-29
 encounter, 3-24
 energie, 1-5, 1-6, 1-13, 6-5
 attractie-, 5-26
 chemische, 1-11
 elastische, keten, 4-19
 elektrische, 1-8
 equipartitie-, 1-25
 gesloten systeem, 1-21, 1-22
 Gibbs (vrije), 1-9, 3-5
 oppervlakte, 5-11
 Helmholtz (vrije), 1-9, 1-23, 2-8
 gesloten systeem, 1-22
 ideale keten, 4-12
 kluwen, 4-12
 niet-ideale keten, 4-19
 interactie-, 2-7, 4-18
 inwendige, 1-8
 kanonisch ensemble, 1-21
 kinetisch, 1-25, 1-28
 kinetische, 5-7
 oppervlakte-, 1-8, 5-11, 5-14
 potentiele, 5-27
 repulsie-, 5-26
 solvatie-, 2-7
 ion, 3-25
 vibratie-, 3-21
 wet van behoud, 1-5, 1-6
 energiediagram, potentiële, 5-23
 energie-diagram, potentiële, 5-27
 energie-oppervlak, potentiële, 3-19
 energierendement, 6-5
 ensemble, 1-16
 groot-kanonisch, 1-17
 kanonisch, 1-17, 1-18, 1-22
 microkanonisch, 1-17
 enthalpie, 1-9
 oplos-, polymeer, 4-24
 entropie, 1-6, 1-13
 gesloten systeem, 1-21, 1-22
 ideale keten, 4-12
 kanonisch ensemble, 1-21
 kluwen-, 4-12
 Kolmogorov-, 6-33
 entropieproductie, 1-7, 3-7, 6-5, 6-8, 6-11, 6-17
 evenwichtstoestand, 6-14
 koppeling, 6-17
 minimale, 6-13
 reactie, 6-16
 enzym, 3-35
 enzymatische activiteit, 3-36
 enzymkatalyse, 3-35
 equipartitie-energie, 1-25
 ergodenhypothese, 1-17
 evenwicht, 3-5, 6-5
 lokaal, 6-5
 thermodynamisch, 6-14
 ver van, 6-19
 evenwichtsconstante
 geactiveerd complex, 3-21
 ion, 3-26
 transition state, 3-21
 evenwichtsthermodynamica, 1-5, 1-7
 evenwichtstoestand, 1-8, 6-14
 evenwichtvoorwaarde, 1-9
 evolutie criterium, 6-14, 6-21
 excess rate of entropy production, 6-19, 6-24
 excluded volume, 4-9
 exergie, 6-22
 extensieve grootheid, 6-5
 extensievevector, 4-8, 4-11
 extent of reaction, 3-9
 extent of the reaction, 6-16
 Eyring, theorie, 3-18
- F**
- Faradayconstante, 2-15
 feed-back mechanisme, 6-24
 fenomenologische coëfficiënt, 6-9
 fenomenologische vergelijking, 6-9, 6-12
 Fick, wet, 1-26, 5-20
 fixed point, 6-31
 fluïde-bed-reactoren, 6-34
 flux, 6-7, 6-11
 Fourier, wet, 6-9
 frequentie, vibratie, 3-20
 frictieconstante, polymeersmelt, 4-30
 fysisch transportverschijnsel, 6-7, 6-9
 fysisorptie, 3-32
- G**
- gasconstante, 1-13
 gasmodel, ideaal, 1-24, 1-25
 gastheorie, kinetische, 3-15
 Gaussverdeling, 4-11
 geactiveerd complex, 3-12, 3-17, 3-19
 geïsoleerd systeem, 1-17
 geleiding, 2-22
 geleidingsvermogen, 2-15, 2-18, 2-22
 gereduceerde massa, 3-15
 gesloten systeem, 1-17, 1-18
 chemische potentiaal, 1-22
 druk, 1-22
 energie, 1-22
 entropie, 1-22
 getal van Avogadro, 1-13
 Gibbs
 (vrije) energie, 1-9, 3-5
 oppervlakte, 5-11
 adsorptiewet, 5-14
 ensemble-methode, 1-16
 postulaten, 1-16
 Gouy en Chapman, theorie, 5-15, 5-26
 grensvlakchemie, 5-15
 grensvlakenergie, 5-15, 5-26
 grensvlakspanning, 5-11
 groot-kanonisch ensemble, 1-17
 gyratiestraal, 4-9
- H**
- halveringstijd, 5-21, 5-22
 Hamaker vergelijking, 5-12, 5-26
 Hamakerconstante, 5-12, 5-27
 Helmholtz (vrije) energie, 1-9, 1-23, 2-8
 gesloten systeem, 1-22
 ideale keten, 4-12
 kluwen, 4-12
 niet-ideale keten, 4-19
 Henry, wet, 2-9
 hoofdwet van de thermodynamica
 eerste, 1-6
 tweede, 1-7, 6-11
 hoogteverdeling, barometrische, 5-9
 hydrodynamische straal, 4-27
- I**
- ideaal gas, 1-23
 model, 1-24, 1-25
 initiatie, 3-28
 instabiel systeem, 6-19
 Intensieve grootheid, 6-5
 intensiteit, lichtverstrooiing, 4-16
 interactie
 gasmoleculen, 1-27
 ionen, 2-20
 keten, 4-19
 interactie-energie, 2-7, 4-18
 intermoleculaire interactie, keten,

- 4-19
ion, 2-13, 2-18, 3-25
ionsnelheid, 2-14
irreversibel proces, 1-6, 1-7, 3-7
isotherm proces, 1-6
- K**
- kanonisch ensemble, 1-17, 1-18, 1-22
kansverdeling, ideale keten, 4-11
karakteristieke functies, 1-8
katalysator, 3-23, 3-32
 industriële, 3-37
katalyse, 3-23, 3-32
 enzym, 3-35
 heterogeen, 3-32
 homogeen, 3-32
kathode, 2-13
kation, 2-14
Kelvin vergelijking, 5-11
keten, 4-6
 chemische, 4-6
 ideaal, 4-7, 4-11, 4-22
ketenmodel, 4-6
ketenreactie, 3-28
kinetiek, 3-5
 formele, 3-5, 3-9
 thermochemische, 3-6, 3-12
kluwentropie, 4-12
kluwenmolecuul, 4-11
Kohlrausch
 tweede wet, 2-22
Kohlrausch, wet, 2-15, 2-18
Kolmogorov-entropie, 6-33
kookpuntsverhoging, 2-9
kracht, capillaire, 5-5
kracht, drijvende, 6-7, 6-11
Krieger en Dougherty viscositeit, 5-9
kritische coagulatie concentratie, 5-22, 5-27
kruiseffect, 6-9
Kuhnlengthe, 4-9
Kuhn-model, 4-7
- L**
- ladingsnulpunt, 5-15
Langevin vergelijking, 5-7
Langmuirisotheem, 3-33, 3-34
Laplace-druk, 5-12
Legendre-transformatie, 1-9
lengte, kinetische keten, 3-29
circulairfrequentie, 4-15
golfvector, 4-15
lichtverstrooiing, 4-15
limit cycle, 6-28, 6-32
- limiting law, 2-21
Lindemann, unimoleculaire reactie, 3-16
Lineweaver-Burkeplot, 3-36
Lippmannvergelijking, 5-14
Lippmann-vergelijking, 1-10
lumping, 3-30
- M**
- macromolecuul, 4-5
macroscopische grootheden, 1-24
Mark-Houwinkrelatie, 4-28
Maxwell-relaties, 1-9
mengentropie, 1-26, 2-7, 2-9
meta-stabiel systeem, 6-19
micel, 5-18
Michaelis Mentenvergelijking, 3-36
microkanonisch ensemble, 1-17
microtoestand, 1-13, 1-19
mobiliteit, 2-14
mobiliteitswaarden, 2-16
model van Boissenade en de Kepper, 6-25
moleculaire grootheden, 1-24
moleculariteit, 3-12
monomeer, 4-5
multicomponentreactie, 3-28, 3-29
- N**
- Nernst
 verdelingswet, 2-9
 warmtetheorema, 1-6
netwerk, 4-21
Newtonse (niet-) vloeistof, 5-31
niet-ideaal gas, 1-27
niet-idealiteit, polymeer, 4-18
niet-lineariteit, reactie, 3-30
- O**
- Onsager relatie, 6-9
ontaardingsgraad, 1-13, 1-16
open systeem, 1-17
opervlakte-actieve stof, 5-17
oplosbaarheid, 2-13
 deeltjes, 5-11
oplosbaarheidsproduct, 2-13
oplosetropie, polymeer, 4-23
oplosmiddel, aprotisch, 2-17
oplosmiddelkwaliteit, 2-5, 2-8
oplossing, 2-5
 dipoolmolecuul, 3-25
 elektrolyt-, 2-13, 2-18
 ideaal, 2-5, 2-8, 2-12
 ideaal verdund, 2-12
 ion, 3-25
 niet-ideaal, 2-5, 2-12, 3-26
 niet-ideale
 chemische potentiaal, 2-19
 polymeer
 geconcentreerd, 4-22
 semi-verdund, 4-21, 4-28
 verdund, 4-20
 verzadigde, 2-8
opervlaktedruk, 5-18
opervlakte-energie, 1-8, 5-11, 5-14
opervlaktespanning, 5-11, 5-17
 dynamische, 5-19
orde
 stationaire toestand, 6-14
 steady state, 6-14
orde, reactie, 3-9
Oregonator, 6-27
oscillatie, chemische, 6-24
Oseen, wet, 4-26
osmose, 2-9
 electro-, 5-30
 elektro-, 6-8
osmotische druk, 2-9, 2-10, 2-18
 polymeeroplossing, 4-20
osmotische waarde, 2-9, 2-11, 2-18
Ostwald, verdunningswet, 2-18
Ostwald-rijping, 5-11
overall orde, 3-9
overgangstoestand, 3-12, 3-17, 3-19
oxidatie, 2-13
- P**
- partiaalorde, 3-9
Peltier-effect, 6-10
perpetuum mobile, 1-5
plasmareactie, 3-25
plastic, 4-23, 4-29
point of zero charge, 5-15
Poisson, wet, 2-19
Poisson-Boltzmannvergelijking, 2-20
polymeer, 4-5
polymeerketen, 4-6
 chemische, 4-6
 ideaal, 4-7, 4-11
 niet-ideaal, 4-18
polymeerketenmodel, 4-6
polymeerkunde, 4-32
polymeeroplossing
 geconcentreerd, 4-22
 semi-verdund, 4-21, 4-28
 verdund, 4-20
polymeersmelt, 4-22, 4-29
polymeersysteem, geconcentreerd,

- 4-21
 polymerisatiereactie, 4-5
 postulaten van Gibbs, 1-16
 potentiaal, 5-27
 chemische, 2-19
 elektrische, 2-19, 2-20
 ionenatmosfeer, 2-20
 Stern-, 5-28
 stromings-, 6-8
 zeta, 5-30
 potentiële energie-oppervlak, 3-19
 preëxponentiële factor, 3-10
 principe
 Curie en Prigogine, 6-10
 principe van Bodenstein, 3-16, 3-29
 enzym, 3-35
 principe van Sabatier, 3-33
 proces, 6-5
 chemisch, 6-16
 scalair, 6-10
 procesparameter, 3-6
 propagatie, 3-28
 pseudocomponent, 3-30
 pseudo-orde, 3-16
- R**
- randhoek, 5-13
 random systeem, 6-32
 random walk, 4-9, 5-8
 Raoult, wet, 2-9
 Rayleigh theorema, 6-8
 reactant, oplossing, 3-24
 reactie, 3-5
 Belousov-Zhabotinsky, 6-26
 bimoleculaire, 3-25
 chaotische, 3-28
 elementaire, 3-12
 entropieproductie, 6-16
 gekoppelde, 6-17
 Lindemann, 3-16
 multicomponent-, 3-29
 niet-lineariteit, 3-30
 oscillerende, 3-28, 3-30, 6-24
 termoleculaire, 3-15
 unimoleculaire, 3-15
 reactiecoördinaat, 3-20
 reactiedynamica, 3-6, 3-13
 reactiekinetiek, 3-5
 complexe, 3-28
 reactiemechanisme, 3-12, 6-16
 reactienetwerk, 3-28
 reactie-orde, 3-9
 reactiesnelheid, 3-9, 3-10, 3-15, 6-16
 dipoolmolecuul, 3-26
 enzym, 3-36
 geactiveerd complex, 3-21, 3-23
 heterogene katalyse, 3-34
 ion, 3-26
 pseudo orde, 3-16
 transition state, 3-21, 3-23
 reactiesnelheidsconstante, 3-9, 3-10
 bimoleculair in oplossing, 3-25
 diffusiemodel, 3-25
 geactiveerd complex, 3-21
 harde bollen, 3-22
 ion, 3-26
 transition state, 3-21
 reactievergelijking
 bruto, 3-5
 stoichiometrische, 3-5
 reductie, 2-13
 regel
 Eilers en Korff, 5-28
 Schulze en Hardy, 5-22
 Walden, 2-16
 relatie van Stirling, 1-14
 relaxatie-effect, 2-23
 relaxatietijd, 5-8
 reptatie, 4-29
 reptatietijd, 4-30
 repulsie, dubbellaag, 5-26
 repulsie, polymeer, 4-18
 repulsie-energie, 5-26
 reversibel proces, 1-6, 1-7
 reversibiliteit, microscopisch, 3-13
 Reynolds-getal, 4-26
 RRKM benadering, 3-17
 ruimtelading, 2-19
- S**
- Sabatier, principe, 3-33
 scalair proces, 6-10
 schalingsargument, 4-22
 scheidingsmethoden, 2-11
 schiften, 5-29
 Schulze en Hardy, regel, 5-22
 sedimentatiesnelheid, 5-8
 segmentconcentratie, 4-21
 segmentdichtheid, 4-13
 semi-permeabel, 2-10
 shear thickening, 5-32
 shear thinning, 5-31
 smelt, 4-29
 Smoluchowski (von), botsingen, 5-21
 Smoluchowski (von),
 diffusiemodel, 3-25
 snelheid
 elektroforese-, 5-30
 ion, 2-14
 polymeerkluwen, 4-27
 proces, 6-7, 6-11
 sedimentatie-, 5-8
 uitvlok-, 5-21, 5-22
 snelheidsbepalende stap, 3-12
 solubility parameter, 2-8
 solvatatie, 2-7
 solvatatie-energie
 ion, 3-25
 solvatie-energie, 2-7
 stabiel systeem, 6-19
 stabilisatie
 sterische, 5-28
 stabiliteit
 colloidale, 5-24
 dispersie, 5-28
 stabiliteitscriterium, steady state, 6-21
 stationaire toestand, 1-7, 3-6, 6-12, 6-13, 6-17
 labiel, 6-19
 meta-stabiel, 6-19
 orde, 6-14
 stabiel, 6-19
 steady state, 1-7, 3-6, 6-12, 6-13, 6-17
 labiel, 6-19
 meta-stabiel, 6-19
 orde, 6-14
 stabiel, 6-19
 Stern-potentiaal, 5-28
 Stirling relatie, 1-14
 stochastisch systeem, 6-33
 stoichiometrie, 3-12
 stoichiometrische coëfficiënt, 6-16
 stoichiometrische
 reactievergelijking, 3-5
 stofbalans, 3-9
 stofeigenschap, 6-8
 Stokes wet, 4-26, 5-7
 straal
 gyratie-, 4-9
 hydrodynamische, 4-27
 strange attractor, 6-32, 6-33
 stromen, 6-7
 stromingspotentiaal, 6-8
 stroom, elektrolytoplossing, 2-15
 structuurfactor, 4-14, 4-16
 surface force, 5-5
 surfactant, 5-17
 suspensietechnologie, 5-30
 systeem
 geïsoleerd, 1-17
 gesloten, 1-17, 1-18
 open, 1-17

T

Tafel vergelijking, 3-35
 tenside, 5-17
 terminatie, 3-28
 terugkoppelingsmechanisme, 6-24
 theorema
 Nernst warmte-, 1-6
 Rayleigh, 6-8
 theorie
 absolute reactiesnelheid, 3-18
 D.L.V.O., 5-26
 Debije en Huckel, 3-26
 Debije en Hückel, 2-19
 Gouy en Chapman, 5-15, 5-26
 theory of rate processes, 3-18
 thermische verlies, 1-6
 thermodynamica, 1-5
 chemische, 1-11
 evenwichts-, 1-7
 irreversebele, 6-5
 irreversibele, 1-7
 niet-evenwichts-, 1-7, 6-5
 statistische, 1-12
 transition state, 3-20
 thermostatica, 1-7
 θ temperatuur, 4-19, 4-20, 4-25
 θ condities, 4-8
 toestandsfunctie, 3-22
 toestandsgrootheden, 1-7, 1-8
 toestandsruimte, 6-31
 toestandssom, 1-19, 3-21
 toestandsvariabelen, 1-8
 toestandsvergelijking, 1-9
 totaalorde, 3-9
 transition state, 3-12, 3-17, 3-19
 theory, 3-18, 3-19
 transmissiecoëfficiënt, 3-21
 transportgetal, 2-14, 2-16
 transportverschijnsel, fysisch, 6-7, 6-9
 turn over number, 3-37

U

uitgesloten volume, 4-18
 -effect, 4-20
 uitvlokking, 5-20
 langzame, 5-22
 uitvloksnelheid, 5-21, 5-22

V

Van 't Hoff, wet, 2-9, 2-10
 Van 't Hoff wet
 polymeeroplossing, 4-20
 Van der Waalsattractie, 5-12, 5-26
 Van der Waals-vergelijking, 1-27
 verdelingsfunctie, segmenten, 4-13
 verdelingswet
 Boltzmann, 2-10
 Nernst, 2-9
 verdunningswet, Ostwald, 2-18
 vergelijking
 Boltzmann, 1-13, 4-23
 Eadie en Hofstee, 3-36
 fenomenologische, 6-9, 6-12
 Hamaker, 5-12, 5-26
 Kelvin, 5-11
 Langevin, 5-7
 Lippmann, 1-10, 5-14
 Michaelis Menten, 3-36
 Poisson-Boltzmann, 2-20
 Tafel, 3-35
 Van der Waals, 1-27
 vermogen, 1-6
 verstrooiingsvector, 4-15
 vertragingsfactor, vlokking, 5-22, 5-23
 vervalconstante, 3-21
 vervorming, 4-31
 vibratie-energie, 3-21
 viriaalcoëfficiënt, tweede, 4-20, 4-25
 viriaal-coëfficiënt, tweede, 1-28
 viscositeit
 intrinsieke, 4-26
 Krieger en Dougherty, 5-9
 polymeer, 4-26
 polymeersmelt, 4-30, 4-31
 suspensie, 5-9
 viscositeitsvergelijking, Einstein, 4-26
 viscositeitvergelijking, Einstein, 5-9
 vlokking, langzame, 5-22
 vorderingsgraad, 3-9
 vormingsenergie
 geactiveerd complex, 3-22
 transition state, 3-22
 vriespuntdaling, 2-9
 vrije weglengte, 1-24, 1-25
 vulkaancurve, 3-33

W

Walden, regel, 2-16
 warmte, 1-5, 6-5
 gereduceerde, 1-6
 warmtebeweging, 1-25
 warmtetheorema van Nernst, 1-6
 weglengte, vrije, 1-24, 1-25
 wet
 Arrhenius, 3-10
 behoud van energie, 1-5, 1-6
 Boltzmann, 1-13
 Boyle en Gay Lussac, 1-9, 1-23, 1-24
 corresponderende toestanden, 1-28
 Coulomb, 2-20
 Fick, 1-26, 5-20
 Fourier, 6-9
 Gibbs adsorptie, 5-14
 Henry, 2-9
 Kohlrausch, 2-15, 2-18
 Kohlrausch (tweede), 2-22
 Oseen, 4-26
 Poisson, 2-19
 Raoult, 2-9
 Stokes, 4-26, 5-7
 Van 't Hoff, 2-9, 2-10
 Van 't Hoff
 polymeeroplossing, 4-20
 Young, 5-12
 wetten, 5-15
 wetten van grensvlakchemie, 5-15
 Wien-effect, 2-23
 wrijving, 1-5, 6-7
 wrijvingskracht, bewegend deeltje, 5-7
 wrijvingsterm, 6-7

Y

Young, wet, 5-12

Z

Z-criterium, 6-21
 zeepmicel, 5-18
 zeta (ζ) potentiaal, 5-30
 Z-functie, 6-21

χ interactieparameter, 4-24
 δ parameter, 6-30