

Lucht, mensen en uitvindingen

Citation for published version (APA):

Schlösser, W. M. J. (1990). *Lucht, mensen en uitvindingen*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1990

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.

Lucht, mensen en uitvindingen

prof. dr. ir. W.M.J. Schlösser
emeritus hoogleraar
Technische Universiteit
te Eindhoven

22 november 1990

Een marginale situatie

Indien het proces, dat tot het ontstaan van de Aarde heeft geleid, dichter bij de zon of verder er van af had plaats gevonden, dan zou het ontstaan van een hogere vorm van leven op de Aarde waarschijnlijk niet mogelijk zijn geweest. Dichter bij de zon zou dit op aarde geleid hebben tot een uit de hand gelopen broeikasklimaat, zoals op de planeet Venus, verder ervan af tot een bevroren planeet, zoals de planeet Mars. Deze overweging leidde bij de astroficus Michael Hart in 1978 tot de gedachte van het bestaan van een zeer marginale 'Continuously Habitable Zone' in ons planetenstelsel. Dit is een nauwe band rond de zon, waarin een planeet tussen de uitersten van koken en bevriezen kan verkeren [1]. Alleen al van uit dit perspectief krijgt het bestaan van de planeet Aarde met haar dampkring en haar hogere levensvormen, een unieke betekenis. Onze planeet Aarde heeft een dampkring behouden, die de relatieve dikte heeft van een schil rond een appel. Deze dampkring wordt door lucht gevormd, waarvan 50% van de totale massa zich in de onderste 5,5 kilometer bevindt. Lucht, waarmee de mens in veel opzichten een intense verhouding heeft.

Lucht is samengesteld uit: 21% zuurstof, 78% stikstof en zeer weinig edelgassen: argon, helium, xenon, neon, krypton. Het relatieve aandeel van deze gassen in de lucht is zeer lang constant gebleven. Naar mening van deskundigen al veel langer als er mensen op aarde leven.

De nu geconstateerde en relatief snelle veranderingen in de dampkring worden door verandering in de hoeveelheid van de zogenaamde 'sporengassen' veroorzaakt. Tot deze sporengassen behoren koolstofdioxide (CO₂), zwaveldioxide (SO₂), stikstofoxiden (NO en NO₂) en fluorchloorkoolwaterstoffen (FCKW's).

Op plaatsen waar de emissies het sterkst zijn, bedraagt het volumeaandeel van SO₂ slechts een 5 miljardste deel. Dit is toch voldoende om tot zure regen aanleiding te geven.

De FCKW's veroorzaken de afbraak van de ozonlaag, maar zij vormen samen slechts 1 miljardste volumeaandeel van de dampkring.

Koolstofdioxide (CO₂) is het meest voorkomende sporengas. Het vormt een volume aandeel van een 350 miljoenste deel van de dampkring en dit gas is zeer vermoedelijk verantwoordelijk voor het broeikas-effect.

De dunne schil van de dampkring kan ook door natuurrampen, zoals inslagen van een grote meteoriet, uitbarstingen van vulkanen of atoomoorlogen ernstig worden vervuild. Hogere levensvormen kwamen daardoor op Aarde reeds tot uitsterven. Zo meent men het uitsterven van o.a. de dinosaurus te kunnen verklaren door de inslag van een grote meteoriet.

De menselijke activiteiten binnen de dampkring blijken echter ook een merkbare invloed te hebben op de samenstelling van de dampkring, vooral met betrekking tot de sporengassen. Gassen die op hun beurt een groot hefboomeffect op het klimaat hebben. Als alle mensen die nu op Aarde leven tijdelijk genoeg zouden nemen met een vierkantemeter leefruimte, dan zou men de thans levende 5,3 miljard mensen op een vierkant oppervlak met zijden van 73 kilometer kunnen onderbrengen.

Deze zelfde mensheid blijkt echter, verspreid over een veel groter gebied, het klimaat over vele honderdduizenden vierkante kilometers van het aardoppervlak te beïnvloeden, via verandering van de hoeveelheden sporengassen.

De ongreepbare en onzichtbare lucht

Met zijn zintuigen kon de mens reeds in de oertijd vaststellen, dat hij door iets dat ongreepbaar en onzichtbaar was omgeven werd. Bij een steppenbrand kon hij de brandlucht ruiken, de rook zien opstijgen en de interactie van vuur en wind waarnemen. De kracht van een storm, die bomen kan ontwortelen, maakte op hem grote indruk. Temeer daar hij het in de wind schuilend mechanisme niet begreep. Hij had behoefte aan de shaman, die hem schijnverklaringen kon leveren. Hij leefde niet als een vis in een aquarium met water, maar als een mens in een 'aerium' met onzichtbare en ongreepbare lucht. Alleen beseftte de mens in de oertijd dit nog niet.

De eerste technisch toepassing van lucht

Darwin beschreef de doelmatige toepassing van vuur, met uitzondering van de spreektaal, als wellicht de grootste menselijke ontdekking.

Het doelmatig gebruiken van vuur wordt door antropologen gezien als een indicatie voor het op Aarde bestaan van een 'intelligent' menselijk wezen. Men kan het omgaan met vuur ook als een zeer vroege, zo niet als de eerste technische toepassing van lucht zien.

Tot nu toe werd de oudste algemeen erkende indicatie van het doelbewust gebruiken van vuur rond 300.000 tot 400.000 jaren geleden gedateerd, met een vondst bij Zhoukoudian in China door Black en Weidenreich. In een grot bij Vertessollos in Hongarije werd een vondst van gelijke ouderdom gedaan.

Tussen 1984 en 1986 werd bij Swartkrans in Zuid-Afrika door Sillen en Brain een nieuwe vondst gedaan. Men meende daarmee de uitvinding van het doelmatig gebruik van vuur te kunnen dateren op 1,6 tot 1,8 miljoen jaren [2]. Auteurs die andere indicatoren accepteren, spreken van een tijdspanne van 5 miljoen jaren voor het bestaan van het verschijnsel 'Mens'.

Feitelijk en inzichtelijk weten

Bij het aanwakkeren van vuur heeft de mens destijds al geblazen en door snelle beweging van zijn handen de lucht in de vuurhaard in beweging gezet. Wellicht deed hij dit, vanuit de kennis van het feit dat deze handelingen het vuur feller deden branden. Zonder echter te begrijpen wat de eigenlijke oorzaak van dit feller branden was.

De groei van het inzichtelijk weten omtrent lucht, is in de vroegste tijden van de geschiedenis en getekende geschiedenis slecht weergegeven. Het is echter zeer wel mogelijk dat er in die periode weinig inzichtelijk weten bestond en dat het weten hoofdzakelijk op het kennen van feiten berustte.

Over het feitelijke weten met betrekking tot het 'technisch gebruiken' van lucht is meer bekend. Het als drijver gebruiken van opgeblazen varkensblazen bij het oversteken van rivieren, is een zeer vroeg beschreven en dus een zeer oude uitvinding. Leonardo da Vinci beschreef veel later de mogelijkheid om met

luchtzakken gezonken schepen van de zeebodem te lichten. In 1690 gebruikte Bakker hetzelfde middel om Hollandse schepen over zandbanken te heffen, wanneer een ondiepte het binnenvaren van de haven belemmerden. Uitvindingen blijken voor herhaling vatbaar te zijn.

Om ertsen te doen smelten moest men lucht door het vuur blazen om de daartoe noodzakelijke hoge temperatuur in de smeltkroes te realiseren. De uit een dierenhuid gemaakte blaasbalg was daarbij onmisbaar en werd reeds door Homerus in de 'Ilias' beschreven. De blaasbalg is eerder uitgevonden dan de schoorsteen, welke laatste pas na de Romeinen in de westerse cultuur verscheen.

Ktesibios en Hero 'begrepen' er al wat van.

Aan Ktesibios (ca.285-222 v.Chr.) komt de eer toe als eerste de in de lucht schuilende kracht te hebben ontdekt en daarmee machines te hebben geconstrueerd, die met behulp van deze kracht iets in beweging zetten.

Tot zijn uitvindingen behoren onder andere een waterorgel, een wateruurwerk, een zuigperspomp en een met luchtveren werkende catapult. Ktesibios begreep blijkbaar de werking van wat wij nu een 'pneumatische accu' noemen, zowel voor het verminderen van drukschommelingen (bij het waterorgel), als voor het accumuleren van energie (bij de catapult). Men kan hem daarbij een bepaalde graad van inzichtelijk weten niet ontzeggen. In welke mate dit werkelijk het geval was zal onbekend blijven, omdat zijn geschriften verloren gingen. Zijn uitvindingen werden beschreven door zijn jongere tijdgenoot Philo van Byzantium en door de 200 jaren later levende Vitruvius (ca.25 v.Chr.).

De uitvindingen van Hero van Alexandrië, die waarschijnlijk in de eerste eeuw voor Christus leefde, doen eveneens het vermoeden rijzen dat hij over inzichtelijk weten beschikte. Zijn reactie-turbine (aeolipile), zijn afstandmeter voor de door wagens afgelegde afstanden (hodometer) en de door warme lucht automatisch opengaande en sluitende tempeldeuren, schetsen hem onmiskenbaar als een excellent uitvinder en talentvol constructeur. Opmerkelijk is ook, dat een van de

geschriften van Hero reeds de titel 'Pneumatica' droeg, hetgeen aantoont dat Hero in disciplines dacht. Toen in 1575 Hero's werken vertaald werden, bevruchtten deze nog in hoge mate de wetenschap en techniek van destijds.

Beperken we ons tot het aandrijven met lucht.

Men zou zich in de vroegste geschiedenis nog de taak kunnen stellen om de relatie tussen mens en lucht in het algemeen te beschrijven. Met het voortschrijden van de tijd wordt deze taak meer en meer ondoenlijk. De activiteiten van de mens zijn zo intens met de lucht in onze uiterst kwetsbare dampkring verbonden, dat de beschrijving van deze relatie een levenswerk zou vormen. Reden waarom ik mij hier wil beperken tot dat deel van deze relatie, waarin de mens de lucht gebruikt voor het uitoefenen van krachten en voor het overbrengen van energie, het oorspronkelijke aandachtsgebied van Ktesibios.

De bewegende lucht drijft schepen aan.

Het ontlenen van aandrijfkraft aan de wind werd het eerst op zeilschepen op grote schaal toegepast. Aan het einde van de 17e eeuw had men de wereld al omvaren en verkend door middel van aan de wind ontleende energie. Windenergie maakte het mogelijk om in de 16e en 17e eeuw de grootte van de Aarde figuurlijk te verveelvoudigen [3].

De ontwikkeling van het zeilschip vond tot aan het einde van de 19e eeuw op proefondervindelijke basis plaats. Zelfs het ontwerpen van een snelle klipper was een kwestie van geaccumuleerde ervaring van de scheepsbouwer.

Op het hoogtepunt der zeilvaart aan het einde van de 19e eeuw ontnam men aan de wind, met een volgetuigd zeilschip met een snelheid van 15 knoop varende, een nuttig voorstuwend vermogen van ongeveer 1500 kW. Dit vermogen werd ontleend aan de lucht in de grenslaag, grenzend aan het soms onstuimig in beweging zijnde scheidingsvlak van lucht en water. De grootste zeilschepen waren inderdaad in staat de wind tussen de loef- en lezijde ten dele voelbaar af te remmen. Vandaar hun naam in de Engelse volksmond 'windjammer', ontleend aan het werkwoord 'to jam = to block the passage'.

Nu vindt het ontwerp van een zeilschip op meer

wetenschappelijke basis plaats. Naast de geaccumuleerde ervaring maakt men gebruik van gedegen kennis van de stromingsleer. Moderne materialen maken het mogelijk om de consequenties van het wetenschappelijk denken te realiseren. Het ontwerpen van snelle zeilschepen en zeilvliegtuigen wordt met het voortgaan van de tijd complementair. Het zeil neemt de vorm aan van een vliegtuigvleugel, waarvan de meest effectieve stand ten opzichte van de luchtstroom door een microprocessor wordt bepaald. De magische snelheid van 100 kilometer per uur zal met zeilschepen dan ook spoedig behaald worden.

Maar ook voertuigen worden door de wind aangedreven.

Voor een zeevarend volk lag het voor de hand om ook voertuigen met behulp van de wind aan te drijven. Simon Stevin (1584-1620) ontwierp en bouwde voor Prins Maurits van Oranje een zeilwagen, om pleziertochten langs het Hollandse strand te maken. Overigens toen al geen oorspronkelijk idee meer, omdat de Chinezen reeds zeilwagens hadden om reizen in de woestijnen van China te maken. Waarschijnlijk wist Simon Stevin daar echter niets van.

Interessant is het feit dat 1847 ene 'Windwagon' Thomas met een zeilwagen in Kansas, van Westport naar Council Grove, landverhuizers vervoerde tijdens hun grote trek over de prairie. Sneller dan Indianen hen op paarden konden achtervolgen [4]. De moderne versies van zeilwagens, uit aluminium en kunststof gemaakt, bereiken op onze stranden snelheden van 100 kilometer per uur en meer.

Interessant is het ontwerp van een door de wind aangedreven voertuig, waarbij men gebruik maakt van een windturbine als energiebron. Met dit voertuig is het mogelijk om pal tegen de wind in te rijden.

De windenergie heeft echter nooit enige betekenis gekregen voor het reizen over land. Het oppervlak van het vaste land had voor dit doel een zoveel 'slechtere kwaliteit', als het oppervlak van de wereldzeeën. Op het vaste land moesten eerst wegen en spoorwegen worden aangelegd en de daarbij behorende verbrandingsmotor en stoommachine worden uitgevonden. Ook bleek de wind op het vasteland, met betrekking tot windsnelheid en windrichting, te 'onbetrouwbaar'.

Een belangrijke verbetering van de kwaliteit van het rollend transport, op gebaande en ongebaande wegen, school in de uitvinding van Dunlop, die in 1888 de met lucht gevulde band om een wiel bedacht en de toepassing van deze uitvinding commercieel realiseerde.

Windmolens worden windturbines, maar of het baat?

Het aan de bewegende lucht ontnemen van energie door middel van windmolens vond in Europa toepassing sinds het begin van onze jaartelling. De water- en de windmolens voorzagen in de middeleeuwen, samen met de mens en dieren, in de behoefte aan mechanische energie. Om te voorzien in warmte energie werd in die tijd Europa geleidelijk ontbost. Rond 1625 was er in de Nederlanden al niet veel bos meer te vinden. Een proces dat zich thans aan de randen van de Sahel, om dezelfde reden, opnieuw voltrekt.

In de 17e en 18e eeuw bouwde Holland een bloeiende economie op door het gebruik van turf voor de nodige warmte. Mechanische energie werd in die tijd overwegend ontleend aan windmolens. Aan het einde van de 18e eeuw telden de Nederlanden 10.000 windmolens. Een aantal waarvan zelfs de niet makkelijk te imponeren Napoleon Bonaparte, tijdens een bezoek aan Zaandam, onder de indruk kwam.

De herinnering aan dit glorieuze tijdperk en aan de rol die de windmolens daarin speelden, zou mede de oorzaak kunnen zijn van de ingenieursdroom om het energieprobleem nog eens met windturbines op te lossen. Echter net zomin als het met Kevlarvezels versterkte moderne zeil de toepassing van stoomturbines en dieselmotoren aan boord van schepen overbodig zal maken, net zomin zal de windturbine ook maar de geringste afbreuk doen aan de noodzaak van het vreedzaam gebruik van kernenergie. Men streeft nu bij de ontwikkeling van windturbines naar een vermogen van 1000 kW, eveneens te ontnemen aan de soms turbulente grenslaag van de dampkring. Men vergelijk dit met het voortstuwend vermogen van de reeds gememoreerde 'windjammer', die van de wereldzeeën verdween nadat meer compacte en minder onderhoud vergende energiebronnen voor schepen ontwikkeld waren [5].

Leonardo da Vinci formuleerde een eis.

Na de donkere middeleeuwen formuleerde Leonardo da Vinci (1452-1519) een norm voor de wetenschap, door te stellen:

"Geen door de mens verricht onderzoek kan men het predicaat 'wetenschappelijk' toekennen, als men daarbij niet de weg van de mathematische beschrijving en bewijsvoering heeft bewandeld. Men heeft geen zekerheid in de wetenschap, als men niet de wiskunde of een daarop gebaseerde wetenschap op het geconstateerde kan toepassen."

Hij eiste in feite de kwantificeerbaarheid van de in een werk gebezigde begrippen en van hun samenhangen, alvorens men het predicaat 'wetenschappelijk' aan dit werk kan toekennen. Leonardo wees indirect op de noodzakelijkheid van de mathematische modelvorming, als hulpmiddel voor de beschrijving van ons inzichtelijk weten.

Leonardo had opmerkelijke gedachten over de constructie van een valscherp, een helicopter en een vliegmachine waarmee de mens klapwiekend zou kunnen vliegen. Met deze constructies meende hij aan de lucht voor de mens nuttige krachten te kunnen ontlenuen. Deze uitvindingen waren hun tijd ver vooruit en leidden dan ook niet tot een doorbraak. Hoe fundamenteel deze drie uitvindingen ook waren, opvallend is overigens dat Leonardo meer door het water dan door de lucht geïnspireerd werd [6].

Het vacuüm leidde tot een conflict der geesten.

Het feit dat men door middel van de lucht in de dampkring krachten kan opwekken, ondervond rond 1600 voor het eerst grote wetenschappelijke belangstelling. Men kwam toen tot het inzicht, dat de mens letterlijk leeft in een zee van lucht. Doordat de aarde aantrekkingskracht uitoefent op de gassen in de dampkring, geldt de wet van Archimedes ook voor lichamen in de dampkring.

Door de luchtdruk te confronteren met een vacuüm, kan men de luchtdruk meten. De kwikbarometer van Torricelli (1643) maakte deze meting mogelijk. De barometrische hoogtemeting

door Pascal (1648) toonde aan dat de luchtdruk met de hoogte in de dampkring verandert.

De proeven met de 'Maagdeburger Bollen' van Otto von Guericke rond 1645 gaven een vingerwijzing in de richting van technische toepassingen van het verkregen inzicht. Daarbij werd aan de eis van Leonardo voldaan. Men kon numerieke waarden toekennen aan de grootte van het onderzochte fenomeen en aan de daaruit afgeleide grootheden. Men kwam tot kwantificeerbaar inzicht en men beoefende aanwijsbaar 'wetenschap'. Zo moeten 8 paarden van Von Guericke, zoals door hem geschat met een kracht van 13400 Newton aan de helft van een bol met een diameter van 0,53 meter hebben getrokken. De druk in de bol moet derhalve hoogstens ongeveer 0,6 bar hebben bedragen.

Voordat dit inzicht echter bespreekbaar werd, moest eerst de strijd om de 'horror vacui' beslecht worden. Tot dan ging men ervan uit dat de natuur een afkeer van ledige ruimten zou hebben en deze dus zou trachten op te vullen.

Aristoteles (384-322 v.Chr.) en Erasistratus (304-245 v.Chr.) formuleerden deze gedachte o.a. op grond van het met gassen en vloeistof gevuld zijn van holten in het menselijk lichaam. Galilei (1564-1642) bestreed deze ideeën en verdedigde het bestaan van kleine deeltjes materie, waar tussen vacua aanwezig waren, zoals ook reeds door Hero gesteld. De Jezuiten bestreden Galilei heftig, ondermijnden zijn wetenschappelijk gezag, maakten propaganda voor de 'horror vacui', maar moesten tenslotte zwichten voor de overtuigingskracht van de proeven van Torricelli, Pascal en Von Guericke. Tegelijkertijd hadden de Jezuiten het vertrouwen gewonnen van de keizer van China, door de juiste voorspelling van een zonsverduistering in 1629. Daardoor mochten zij de 'leer van Galilei' in China onderwijzen, terwijl Galilei zelf door de paus in Rome van ketterij beschuldigd werd.

Dat Otto von Guericke (1602-1686) zijn proef met de bollen kon demonstreren moest voorafgegaan worden door de ontwikkeling van een luchtpomp, waarmee hij de druk van ongeveer 0,6 bar, in deze bollen kon realiseren. Het afdichtingsprobleem loste hij op, door water uit een gesloten

vat te pompen. De waterkolom paste in het vat, luchtdicht als een spelingsvrije zuiger. De destijds bekende techniek van de vacuumpomp culmineerde bij Von Guericke, zoals door hem beschreven in zijn boek 'Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgica de vacuo spatio', dat pas in 1672 werd uitgegeven. Blijkbaar wachtte hij met de uitgifte ervan totdat de discussie rond de 'horror vacui' definitief beslecht was. Naast wetenschapper en ingenieur was Von Guericke, als burgemeester van Magdeburg, immers ook politicus. Opmerkelijk is het feit, dat veel van zijn werk reeds in 1657 door de Jezuïet Kasper Schott in Würzburg gepubliceerd werd. Zeer waarschijnlijk met toestemming van Von Guericke.

De uitvinding van de pneumatische overbrenging

De technische toepassing van het vacuüm werd daarna gedragen door Denis Papin (1647-1712). Hij beschreef in 1674 zijn experimenten met vacuüm in zijn boek 'Experiences du vuide'. Zijn wellicht meest belangrijke vinding is de vacuüm machine, ook wel 'atmosferische machine' genaamd. Door het condenseren van waterdamp in een cilinder veroorzaakte Papin een vacuüm. Vervolgens liet hij de dampkring op een zuiger in deze cilinder arbeid verrichten. In 1712 bouwde Newcomen een verbeterde versie van de machine van Papin. Een machine die meer arbeidsslagen per tijdseenheid kon maken en die tot in de twintiger jaren van de twintigste eeuw in de mijnbouw zou worden toegepast.

Kolin beweerde in 1972 dat de vindingen van Von Guericke, Papin en Newcomen hun tijdgenoten technisch op het verkeerde been zouden hebben gezet. Men zocht immers in het domein van lage krachtdichtheid naar constructies om werktuigen aan te drijven. Het drukverschil tussen de luchtdruk en de druk in het vacuüm zou theoretisch immers de krachtdichtheid van 1 bar nooit kunnen overschrijden. De constructeurs die in het domein van de hogere krachtdichtheid naar oplossingen zochten, zouden compacter construeren en zouden daardoor met hun constructies veel meer succes boeken. Men had volgens Kolin vroegtijdig de aandacht van de 'onderdruk' naar de 'overdruk' moeten verleggen.

Maar ook daarmee had Papin reeds in 1685 een begin gemaakt, door de constructie van een apparaat voor het transporteren van energie door middel van lucht met een hogere druk dan de atmosferische druk. Deze overbrenging werkte middels zogenaamde 'perslucht', met lucht die men met een pomp had samengeperst. Papin legde dus in 1685 reeds de grondslag voor de technische uitvoering van de pneumatische overbrenging. Maar evenals bij Pascal, wiens grondleggende gedachten voor de hydraulische overbrenging pas een jaar na zijn dood in 1662 werden gepubliceerd, werd ook het idee van Papin voorlopig in het archief opgeborgen in afwachting van de tijd voor een economische toepassing. Voor de 'Hydrauliek' werd die pas in 1795 door Joseph Bramah bedacht. De 'Pneumatiek' moest nog langer op haar eerste toepassing wachten.

Toen werd lucht het onderwerp van fundamenteel onderzoek.

In de tweede helft van de 17e eeuw begon de wetenschap zich te interesseren voor de beschrijving van de fysische eigenschappen van gassen. Robert Boyle beschreef in 1662 de samenhang van de druk en het volume van een constante hoeveelheid massa van een gas. De samenhang was door Richard Townley ontdekt en werd, onafhankelijk van Boyle, in Frankrijk door Mariotte in 1676 beschreven.

In 1802 formuleerde Gay-Lussac de samenhang van de temperatuur en de druk van een afgesloten hoeveelheid gas. De combinatie van deze beide afzonderlijk gevonden samenhangen levert een betrekking op, tussen het volume, de druk en de temperatuur van een gas, die men dus eigenlijk de Wet van Townley-Boyle-Mariotte-Gay Lussac zou moeten noemen. Deze toestandsvergelijking van de lucht, geïntroduceerd in de toen tot ontwikkeling komende thermodynamica, maakt veel gedragingen van de lucht verklaarbaar en dus voorspelbaar, maar ook berekenbaar.

Ook de stroming van lucht ondervond belangstelling en in 1743 publiceerde Johann Bernoulli een op 1732 geantedateerd werk, waarin de samenhang van druk en snelheid in een luchtstroom werd beschreven. Hij pleegde hiermee bewust plagiaat van het door zijn zoon in 1738 gepubliceerde. Zijn zoon Daniel legde in

zijn werk de grondslag voor de energievergelijking van vloeistof- en gasstromen. Het was echter Euler die in 1754 de inzichten van Daniel Bernoulli als eerste in een mathematische betrekking weergaf. Hierdoor is het juist deze betrekking voortaan de Wet van Bernoulli-Euler te noemen [7].

In 1766 ontdekte Cavendish de waterstof, in 1774 Priestley de zuurstof en Lavoisier ontdekte dat verbranding en ademhaling gepaard gaan met chemische reacties, waarbij 'levenslucht' zich verbindt met een brandbare stof. Ook ontdekte hij dat lucht uit twee hoofdbestanddelen bestaat, waarvan slechts een zich bij verbranding bindt. Onder het voorwendsel dat de Revolutie geen behoefte had aan genieën, verloor Lavoisier in 1794 zijn hoofd onder de guillotine.

In 1811 publiceerde Avogadro de regel, dat gelijke volumes van verschillende gassen, bij dezelfde druk en temperatuur, evenveel moleculen bevatten. Op de vraag hoeveel er dat dan wel waren, werd pas aan het begin van de 20e eeuw een antwoord gegeven.

Aan het einde van deze lange periode van wetenschappelijke bezinning had men de aard van lucht doorgrond en haar eigenschappen gekwantificeerd. De ingenieurs konden zich meer dan ooit profileren als toepassers van het uit wetenschappelijk denken gewonnen inzicht. De nu aangebroken industriële 19e eeuw bood daartoe ruim de gelegenheid.

Hete lucht leidde tot avonturen.

"Was kann wohl Närrischers und Lächerliches erdacht werden, als wenn man in der Luft fliegen, fahren und schwimmen will."

Johann Andrea Agricola
(ca.1494 - 1566)

Aan de rand van het technische gebeuren werd de belangstelling voor lucht en voor gassen die 'lichter dan lucht' waren merkbaar, door de inspanningen voor de eerste gedocumenteerde menselijke ballonvaarten. Aan het einde van de 18e eeuw was

de tijd rijp voor het beginnen van een luchtvaart tijdperk, een mijlpaal in de geschiedenis van de relatie tussen mens en lucht.

De monnik Roger Bacon zou omstreeks 1300 in zijn werk 'Secrets and art of nature' reeds de weg geschetst hebben naar de heteluchtballon. Als vader van de gedachte van de ballonvaart wordt echter meestal de Jezuïet Francesco de Lana de Terzi (1631-1687) genoemd, die in 1670 een luchtvaartuig schetste, waarin vier luchtledige bollen een bootvormige gondel met mast en zeil droegen. De discussie omtrent het al of niet bestaan van het vacuüm was immers beslecht in het voordeel van het vacuüm. De Lana mocht dus over de toepassing van het vacuüm schrijven. Tot zijn geluk was er destijds geen sponsor, die hem tot uitvoering van zijn plan aanspoorde. Roger Bacon stelde reeds meer dan drie eeuwen voor De Lana, dat de bollen met 'etherische lucht of met vloeibaar vuur' gevuld moesten worden.

Als eerste ballonvaarder wordt de Jezuïet Bartolomeu Lourenco de Gusmao (1685-1724) genoemd die, op 8 augustus 1709 in Lissabon aan het hof van de koning Johannes de Vijfde, een miniatuur ballon zou hebben laten varen. In hoeverre het bericht juist is, dat Gusmao ook zelf in een ballon zou zijn opgestegen, kan helaas niet worden vastgesteld.

De Amerikaan Jim Woodman schreef in 1977 het boek 'Nacza', waarin hij stelde dat de Indianen in Zuid-Amerika ceremoniële opstijgingen zouden hebben gemaakt met heteluchtballonnen [8]. Volgens Woodman zou Lourenco de Gusmao, zelf van Braziliaanse afkomst, 'voorkennis' hebben ontleend aan de luchtvaarttechniek van zijn Indiaanse voorouders.

Van groot inzichtelijk weten getuigt in deze samenhang de door Galileo Galilei (1564-1642) uitgevonden 'thermometre lente', die ook van verschillen in dichtheid gebruik maakt, maar nu om temperaturen te meten met in een vloeistof zwevende glazen ballonnen.

De gebroeders Montgolfier bedachten en maakten een heteluchtballon en Pilatre de Rozier mocht er op 15 oktober 1783 als eerste mens mee opstijgen. Enkele weken later, op 1

december 1783, gevolgd door Charlier in een met waterstof gevulde ballon. Het verschil in dichtheid van de gassen in en buiten de ballon werd benut voor het opwekken van draagkracht als tegenkracht voor de zwaartekracht. Voor het eerst steeg de mens er, naar dag en uur gedocumenteerd, mee op in de dampkring van de aarde.

Van de gebroeders Montgolfier kan men niet zeggen dat zij door een teveel aan inzichtelijke kennis gehinderd werden. Zij meenden dat wolken door een elektrisch effect in de lucht zweefden. Zij verkondigden ook dat hun ballonvaarten alleen maar mogelijk zouden zijn, indien de ballon gevuld werd met de rook van een vuur van stro en schaapswol, met het zogenaamde Montgolfier-gas. Of zij deze stelling aanhingen om de concurrenten te misleiden, of uit wanbegrip, is niet bekend.

Gedurende 200 jaren waren de 'lichter dan lucht' ballonnen een speelbal der winden. Bij de start wist men niet waar de landing plaats zou vinden. Door nauwe samenwerking met meteorologen wisten Henk en Evelien Brink met Willem Hageman in 1986 de Atlantische Oceaan met een ballon over te steken, met een van te voren aangekondigde bestemming. Aan het verzoek om op Schiphol Airport bij Amsterdam te mogen landen, kon 's ochtends om 8 uur om technische redenen niet worden voldaan. De landing vond daarom enkele tientallen kilometers buiten de luchthaven plaats. Hiermee was de eerste doelvlucht met een 'onbestuurbare ballon' over een afstand van 4500 kilometer volbracht. Deze unieke prestatie was mogelijk door de nauwe samenwerking tussen de ballonvaarders en de meteorologen. Deze laatsten toonden zich top-experts in het voorspellen van de stroombanen van kleine deeltjes (lees: ballonnen) in de dampkring.

De kennis van de luchtstromingen om de aarde blijkt een hoog peil te hebben bereikt. Ook in dit opzicht heeft de mens een bijzonder inzicht in de gedragingen van de lucht verworven. Hetgeen van de kennis van de stromingen in de diepte van de oceanen nog niet in gelijke mate kan worden gezegd.

Het echtpaar Brink vestigde in 1988 een wereldrecord door met een helieluchtballon 50 personen in een cabine met twee etages op te tillen. De door deze ballon ontwikkelde record hefkracht

bedroeg daarbij ongeveer 4,5 ton. Deze prestatie is vergelijkbaar met de hefkracht van 'le Grand Ballon Captif', een gasballon van Giffard op de wereldtentoonstelling in Parijs (1878), die 52 passagiers kon tillen.

Besturen kon ook op een andere manier.

De ontwikkeling van het bestuurbare luchtschip bestrijkt ruwweg een periode van 100 jaren. Belangrijk was daarbij de uitvinding van de luchtschroef, een ander belangrijk product van inzichtelijk weten omtrent het gedrag van lucht. De luchtschroef gaf aan het luchtschip een snelheid ten opzichte van de lucht. Het roer van het luchtschip kon daardoor een stuurkracht opwekken.

De 'propellor', zoals de voortstuwcr ook wel genoemd werd, maakte niet alleen het bestuurbare luchtschip tot een realiteit maar diende ook als middel tot aandrijving van de later uitgevonden 'zwaarder dan lucht' vliegtuigen.

Het luchtschip kent een aantal pioniers met namen zoals Henri Giffard (1852), Tissandier (1883), Krebs en Renard (1884), Santos-Dumont (1898) en Zeppelin (1900). Giffard was de eerste die met succes een bestuurbare luchtschip aandreef, met een driebladige luchtschroef met een diameter van 3,40 meter die ongeveer 110 omwentelingen per minuut maakte.

Aan de pionier Graf Zeppelin komt de eer toe, met zijn luchtschepen regelmatig passagiersvluchten tussen de continenten te hebben gemaakt. Hierdoor werd de relatie van mens en lucht zo 'vertrouwd', dat de mensheid daarna rijp was voor de enorme ontwikkeling die het luchtverkeer met 'zwaarder dan lucht' vliegtuigen na de laatste wereldoorlog nam.

De hefkracht van de door Zeppelin ontworpen luchtreuzen bereikte tenslotte waarden in de orde van grootte van 200 ton.

En nog is de ontwikkeling van het luchtschip niet beëindigd.

Nieuwe materialen bieden nieuwe mogelijkheden. Het boek van Balaskovic en Moizard is in dit opzicht inspirerend [9].

Onvriendelijke toepassingen van perslucht

Ktezibios paste perslucht reeds toe in zijn katapult, waarmee hij zware projectielen over een respectabele afstand kon werpen.

Von Guericke ontwierp de eerste gedocumenteerde luchtbuks.

Deze luchtbuks werkte, hoe kan het anders bij deze uitvinder, met onderdruk. Spoedig daarna waren er al compagnieën die bewapend waren met luchtbuksen, waarvan het kruid niet nat kon worden. Deze buksen werkten met overdruk en dus met een hogere krachtdichtheid.

Tijdens de Eerste Wereldoorlog ontwikkelde de Roemeense uitvinder Constantinescu een mortier voor het Engelse leger, waarmee projectielen met een massa van 90 kg over een afstand van 1,5 kilometer naar de Duitse loopgraven werden geschoten, nadat met de hand een persluchtaccumulator op een druk van 2000 bar gebracht was. Deze mortier verraadde zijn positie niet door mondingsvuur. Hetgeen in de loopgravenoorlog een groot voordeel was [10].

Tegenwoordig is de onderzeeboot met atoomraketten een van de meest vernietigende wapensystemen, die door de mensheid bedacht werden. De lancering van raketten vanuit een onder het wateroppervlak varende onderzeeboot, vindt met behulp van perslucht of stoom plaats. Een relatief geringe overdruk ten opzichte van de op lanceerdiepte heersende hydrostatische druk is voldoende om een raket met een massa van 60.000 kg, met een diameter van 2,10 meter, hoog boven het wateroppervlak te doen 'springen', voordat de raketmotor gestart wordt.

Samengeperste lucht schept mede de industriële infrastructuur door persluchtnetten.

Het is belangrijk om te beseffen dat in de tweede helft van de 17e eeuw een begin werd gemaakt met het scheppen van de infrastructuur waarop de industriële activiteiten zouden rusten. Hierbij werd dikwijls gebruik gemaakt van de mogelijkheid om met lucht krachten uit te oefenen en energie over te brengen.

Het doen stromen van lucht, voor het ventileren van mijngangen en tunnels, was een zaak van geringe krachtdichtheid. De voor het ventileren benodigde relatief lage drukken konden met ventilatoren beheerst worden. De ventilator met schroefbladen van Hales (1740) vormde in deze ontwikkeling voor de mijnbouw een mijlpaal. De door een stoommachine aangedreven ventilator van James Watt (1777) had als luchtverdrijver een zuiger in een

cilinder.

De aanleg van de 13 kilometer lange Mont Cenis tunnel (1857-1871) vroeg om de oplossing van het probleem om energie naar het bouwfront in de tunnel te brengen. Aanvankelijk dacht men dit probleem op mechanische wijze met stalen kabels op te lossen. Randolph beschreef in 1856 in een voordracht te Glasgow de geslaagde perslucht aandrijving van een pomp in een gasrijke mijn bij Govan. In dit zelfde jaar gaf men aan Grandis, Sommeiller en Grattoni in Frankrijk de opdracht tot een voorstudie om de energie in de vorm van perslucht in de Mont Cenis tunnel te transporteren. In de praktijk waren daarna de ervaringen met dit persluchtsysteem niet al te indrukwekkend, maar het werd tot aan de voltooiing van de tunnel toegepast. De betekenis van de Mont Cenis tunnel voor de infrastructuur van Europa beseft men door te bedenken, dat deze tunnel het spoorwegnet van Frankrijk en Italië met elkaar verbond, over een afstand van 2200 kilometer een onafgebroken verbinding scheppend van Calais tot Brindisi. Bij de aanleg van de St.Gotthard tunnel, die in 1882 gereed kwam, besloot men weer tot de toepassing van een pneumatisch systeem voor de energievoorziening en dit keer met overtuigend succes.

In de mijnbouw en tunnelbouw speelden persluchthamers en persluchtboren, sinds de eerste pneumatische steenboor van Bruxton (1844), een grote rol in het voor een aanvaardbare prijs voortdrijven van het bouwfront. De dagelijkse voortgang bepaalde overwegend de kosten van de mijngang of van de tunnel. Deze voortgang werd mede bepaald door de tijd die nodig was voor het boren van een gat van 1 meter diepte. De hiervoor benodigde tijd werd van 144 minuten in 1870 teruggebracht tot 30 seconden in 1990. Omstreeks 1970 was daartoe wel een overgang van pneumatiek naar hydrauliek noodzakelijk.

Het transport van gesteente en van arbeiders bood gelegenheid voor het toepassen van perslucht bij laadmachines, schudgoten, treinen, naast de toepassing bij persluchthamers, boormachines en boorwagens voor het hanteren van zware boormachines. De tegen explosies intrinsiek veilige persluchtsystemen konden zich in deze toepassingen, ondanks hun bedenkelijk laag

energetische rendement, tot op heden handhaven.

De noodzaak van een infrastructuur voor de op industrie georiënteerde grote steden vroeg om een netwerk voor de verdeling van energie over de afnemers. Na de ervaring in de tunnelbouw zag men hiertoe in een pneumatisch netwerk de oplossing. In 1888 krijgt de Compagnie Parisienne de l'Air Comprimé een concessie voor de duur van 40 jaren, om Parijs van een persluchtnet te voorzien. Aanvankelijk installeerde men een compressorvermogen van 1500 kW, in het jargon van toen 2000 pk. In 1891 installeerde men 8000 pk en in 1890 nog eens 2000 pk. De druk in dit systeem bedroeg 6,5 bar [11]. Het persluchtnet van Parijs is nog steeds een lucratieve voorziening. De oorzaak van het succes in Parijs school in het grote aantal van kleine ondernemers in deze stad. Thuisnaaisters, tandartsen, liften in grote woonhuizen, buizenpost en tapkasten in bistro's vormden samen dit grote aantal afnemers van perslucht.

Toen luchtmotoren met expansie tijdens de arbeidsslag tot toepassing kwamen, werd voorverwarming van de perslucht noodzakelijk om ijsvorming tegen te gaan.

De voorverwarmingsketel leverde nuttige warmte en de koude geëxpandeerde lucht kon voor koeling worden gebruikt. De cogeneratie van energie is dus zeker geen vinding van onze tijd. In navolging van Parijs bouwden ook steden zoals o.a. Birmingham (1888), Rixdorf en Buenos Aires een persluchtnet, zij het dan met minder blijvend succes.

Ook in de vervoerstechniek vindt perslucht haar toepassing, maar hoe oorspronkelijk is een nieuw idee?

In 1824 patenteert John Vallance de pneumatisch aangedreven trein. Andraud laat in 1833 de eerste trein op perslucht tussen Parijs en Versailles rijden. Technisch verbeterde uitvoeringen van door perslucht aangedreven locomotieven blijven rijden tot de sluiting van onze steenkolenmijnen, omstreeks 1960.

Aan de openlegging van de USA werd een begin gemaakt door de aanleg van transcontinentale spoorlijnen. Spoedig kregen de treinen daar zulke grote lengten, dat er bij het remmen geweldig

hoeveelheden kinetische energie in bedwang gehouden moesten worden. Het remmen van lange treinen kon daarbij met onbeheersbare dynamische effecten gepaard gaan, als het in werking treden van de remmen door de lengte van de trein niet op elke wagon op het juiste moment plaats vond.

De pneumatische rem bood gelegenheid om op de juiste wijze te remmen, zij het niet dan na het toepassen van enkele fundamenteel nieuwe ideeën.

Ook al construeerde Stephenson een met stoom bekrachtigde rem, het op de locomotief met tegenstoom remmen kwam desondanks in zwang. Al werkte dit laatste systeem op den duur ten koste van de levensduur van de stoomcilinder. Om deze cilinder tegen oververhitting te beschermen, injecteerde Le Chatelier in 1865 stoom en water.

Daarnaast werden in Frankrijk en in Engeland vacuümremmen gebruikt. Men zocht de oplossing dus alweer in het domein van de lage krachtdichtheid, in het domein van de onderdruk. Dit leidde tot grote remcilinders en desondanks tot relatief kleine remkrachten.

George Westinghouse sloeg in 1869 dan ook de andere weg in door de ontwikkeling van de overdrukrem, die werkte als er luchtdruk in de remleiding werd toegelaten. In 1872 introduceerde hij een overdrukrem die 'omgekeerd' werkte.

Deze rem werd gelicht door overdruk en viel in als deze overdruk wegviel. Deze rem had bovendien het fail-safe effect om bij het verlies van een wagon automatisch te remmen, door de dan optredende leidingbreuk in de remleiding.

Bij het langer worden van de treinen werd de invloed van de pneumatische capaciteit van de remleiding op de looptijd van een drukgolf in deze leiding merkbaar. Om de oplossing van dit probleem te vinden, schreef de Master Car Builders Association in de USA in 1887 een prijsvraag uit voor een verbeterd remsysteem.

Westinghouse schreef op deze prijsvraag in met een remsysteem, dat een huwelijk vormde tussen de pneumatiek en de electrotechniek. Hij verdeelde de trein in vier secties, elk voorzien van een autonoom werkend pneumatisch remsysteem en elk afzonderlijk elektrisch geactiveerd. Hij kon de remmen van de verschillende secties daardoor op verschillende

tijdstippen laten invallen, waardoor het dynamisch gedrag van de trein beheersbaar werd. Dit was voor de pneumatiek een historisch, maar als zodanig daarbuiten een voorlopig onopgemerkt blijvend gebeuren. De betrouwbaarheid van de electro-pneumatische rem liet echter te wensen over. Haar doorbraak kwam pas met de komst van de electrisch aangedreven treinen. Om in een nog later stadium op haar beurt door de elektrische en de electro-hydraulische rem te worden verdrongen.

Het is een verdienste van Veldman om er op te wijzen, dat niet Westinghouse de eerste was, die een combinatie van pneumatiek en electrotechniek tot toepassing bracht. Volgens Veldman moet deze vinding worden toegeschreven aan de orgelbouwer Barker, die in 1867 de luchtventielen in een orgel electro-magnetisch bediende [12].

Ook tot het transporteren van informatie bood lucht mogelijkheden.

De mens maakte bij het gebruik van spreektaal in de oertijd reeds gebruik van lucht als transportmiddel voor de over te brengen informatie. In relatie tot lucht, is de spreektaal volgens Darwin wellicht de eerste onbewuste uitvinding van de mens. Iedereen kan daarbij meeluisteren en dat is niet altijd de bedoeling. Ook kan omgevingslawaai de kwaliteit van de over te brengen informatie negatief beïnvloeden. Het in een buis spreken, bijvoorbeeld tussen de brug en de machinekamer van een schip, kon deze nadelen ten dele opheffen.

In 1853 bouwt Clark in Londen het eerste buizenpoststelsel. In feite werd er in dat stelsel materie getransporteerd in de vorm van een stuk papier, waarop een niet-afluisterbare boodschap geschreven stond. Als dit papier de vorm van bankbiljetten aanneemt, worden deze systemen voor banken van grote betekenis en dat zijn ze nu nog steeds.

Westinghouse ontwikkelt in 1879 een op perslucht werkend seinstelsel voor de spoorwegen en stelt er ook de wissels mee. Ruimdenkend kan men daarin ook systemen zien, die

informatie transporteren.

In Parijs, waar men over een persluchtnet beschikken kon, stonden rond 1890 negen duizend door perslucht aangedreven uurwerken. Het informatie-transport aspect bestond bij deze uurwerken uit een drukpuls in het persluchtnet, waarmee men op gezette tijden de uurwerken gelijk zette.

Er zijn echter ook andere manieren om energie over te brengen.

De pneumatische overbrenging zag het einde als overbrengingssysteem voor grotere energiestromen dagen, door de opkomst van de elektrische overbrenging aan het begin van de 20e eeuw. In 1904 zijn er dan ook nog maar weinig luchtmotoren in gebruik. Het huwelijk tussen de pneumatiek en de electrotechniek heeft dan echter al plaats gevonden in de electro-pneumatische kleppen. Het fenomeen 'electriciteit', dat de pneumatiek zou verdringen, zou een halve eeuw later voor een herleving van de belangstelling voor de pneumatiek zorgen. In de oorzaak van de neergang, school de oorzaak van de herrijzenis in een later tijdperk, onder de naam van 'electro-pneumatiek'. De pneumatische overbrenging trok zich tijdelijk terug in de mijnbouw, in munitiefabrieken en in andere plaatsen, waar zij om veiligheidsredenen door de elektrische overbrenging onvervangbaar bleek te zijn.

Zweven als een vogel

Rond het begin van de laatste eeuwwisseling kwam een heel belangrijke relatie tussen mens en lucht tot ontwikkeling. Reeds lang had de mens van vliegen gedroomd. De sage van Daedalus wordt nu nog steeds verteld. Leonardo da Vinci beschreef een constructie waarmee hij meende klapwiekend te kunnen vliegen. Waaghalzen springen daarna, met vleugels van textiel gemaakt, van bruggen en van torens. Alle pogingen om als een vogel te vliegen eindigen uiterst vrolijk of uiterst droevig. Rond 1670 zou de slotenmaker Besnier de eerste, slecht gedocumenteerde, maar bemande zweefvlucht hebben uitgevoerd.

De Engelse pionier Sir George Cayley schreef reeds in 1809 een geschrift met de titel 'Aerial Navigation'. Daarin deed hij de thans niet meer aangevochten voorspelling:

"Wij zullen in staat zijn ons zelf en onze gezinnen en hun have en goed veiliger door de lucht dan op het water te vervoeren, en met een snelheid van 30 tot 150 kilometer per uur. Om dit tot stand te brengen is slechts een energiebron nodig die in een bepaalde tijd in verhouding tot zijn gewicht meer arbeid levert dan het dierlijke spierstelsel".

Dat we nu met hogere snelheden vliegen kan Cayley niet verweten worden. Hij kon destijds nog niet weten dat snelheid, evenals afstand, relatieve begrippen zouden worden.

Interessant is het feit dat Sir Cayley ook de uitvinder van de heloluchtmotor geweest is. In 1816 nam de Schotse predikant Robert Stirling op deze motor een patent.

De noodzaak van een energiebron met een hoog specifiek vermogen, werd ons bevestigd in een gesprek met de goed getrainde jeugdige wielrenner, die met een vliegfiets van McCready in 1979 over het Kanaal vloog. Deze prestatie bracht hem aan de grens van het menselijk prestatievermogen en van nagenoeg complete lichamelijke uitputting.

Halverwege de 19e eeuw nam de Franse pionier Charles Alphonse Penaud de fakkel van Cayley over. Met zijn partner Paul Gachot ontwierp Penaud in 1876 een vliegende vleugel die sterk afweek van het concept van Sir Cayley, met een intrekbaar onderstel, een gesloten cockpit met een uitgebreid instrumenten bord en met een automatische piloot. Ook beschreef Penaud de verticale luchtstromingen, waarmee vogels snel hoogte kunnen winnen. Zonder zelf ooit te hebben gevlogen beschreef hij thermiek, hellingstijgwind en golfvormige stromingen aan de lezijde van hoge obstakels, zoals bergruggen. Uit ongenoegen om zijn miskennis pleegde het genie Penaud in 1880, op dertigjarige leeftijd, zelfmoord.

De koetsier van Sir Cayley zou reeds omstreeks 1850, weliswaar met tegenzin, een zweefsprong van 270 meter over een vallei in Yorkshire hebben uitgevoerd. In het jaar 1867 maakte de Franse scheepskapitein Jean Marie Le Bris een zweefvlucht over een afstand van 200 meter vanaf een hoogte

van 60 meter. In de USA noemt men John Montgomery als eerste Amerikaanse zweefvlieger, omdat deze pionier sinds augustus 1883 vele vluchten maakte vanaf de Otay Mesa ten zuiden van San Diego.

Otto Lilienthal (1848-1896) is dus zeker niet de eerste 'zwaarder dan lucht' vliegenier geweest, omdat hij pas in 1891 zijn eerste zweefsprong maakte. Vast staat echter, dat Lilienthal aan het 'zwaarder dan lucht vliegen' een wetenschappelijke grondslag gaf, door zijn metingen van de grootte van luchtkrachten aan draagvlakken met gewelfde profielen. Ook formuleerde hij begrippen zoals vliegpolaire, evenals het draag- en het weerstandsgetal. Lilienthal legde de grondslag voor de mathematische beschrijving van een deel van de kennis van de mens van het gedrag van lucht, overeenkomstig de door Leonardo da Vinci geformuleerde eisen [13]. Tegenwoordig zijn de vliegtuigen van deze pioniers vervolmaakt tot zeilvliegtuigen uit nylon, aluminium en staaldraden.

Opvallend is de grote belangstelling voor de vogelvlucht bij Leonardo da Vinci, Cayley, Penaud en Lilienthal. Tot nu toe werd de zweefvlucht van de vogel door de mens nagebootst en in kwaliteit zelfs overtroffen. Bij de klapwiekvlucht wekt het binnendeel van de vleugel draagkracht en het buitendeel de voortstuwkracht op. De vlucht van een door de mens aangedreven en bestuurd klapwiekend luchtvaartuig laat nog op zich wachten. Een onbemand vliegend model van een klapwiekende pteranodon, een reptiel uit de oertijd, werd door McCready reeds met succes gerealiseerd.

Een energiebron met een groot specifiek vermogen maakt de motorvlucht mogelijk.

Ook de motorvlucht kent verschillende namen van pioniers die de eerste bemande motorvlucht zouden hebben uitgevoerd.

Noemen we als eerste Felix du Temple, die in 1874 vloog met een Stirlingmotor als energiebron.

Daarna noemt de geschiedenis Gustav Weissaupt (Whitehead) met vermoedelijk een vlucht op 14 augustus 1901 en Karl Jatho, die op 18 augustus 1903 zou hebben gevlogen.

De gebroeders Wright maakten hun eerste motorvlucht op 17 december in 1903. Om hun vliegtuig tegen de luchtweerstand voorwaarts aan te drijven, moesten zij voldoende lucht naar achteren versnellen. Als constructeurs van rijwielen maakten zij daartoe gebruik van een zelf vervaardigde lichte verbrandingsmotor en van twee luchtschroeven. De motoren van de motorfietsen leverden destijds te weinig vermogen en de automobielmotoren waren te zwaar [14].

Zowel bij zweefvliegtuigen als bij motorvliegtuigen vertonen de luchtkrachten, die door de draagvlakken worden opgewekt, in een opzicht overeenkomst. De krachtdichtheid, dat wil zeggen de kracht per eenheid van vleugeloppervlak, is relatief gering. De over het draagvlak van een zeilvliegtuig gemiddelde draagkracht bedraagt niet meer dan 60 N/m^2 , hetgeen met een gemiddeld over het draagvlak optredend drukverschil van $0,0006 \text{ bar}$ overeen komt. Bij een vol beladen Boeing 747-400 is deze waarde tijdens een stationaire vlucht weliswaar ongeveer 125 maal groter, maar het gemiddelde drukverschil bedraagt ook niet meer dan $0,0762 \text{ bar}$. De Boeing 747-400 heeft een maximale startmassa van bijna 400.000 kg .

De luchtfilm met een dikte van ongeveer 1 millimeter tot ongeveer 1 meter vinden we in luchtlagers, transportsystemen en hovercrafts. Ook hier wordt een grote draagkracht aan een gering luchtdrukverschil ontleend. Met een drukverschil van 6 bar kan men een draagkracht van tientallen tonnen per vierkantemeter ontwikkelen.

Met de luchtvaart hangt de 'herhaalde' uitvinding van het valscherp door Lenormand in 1783 samen. Leonardo da Vinci had de parachute namelijk al eeuwen eerder uitgevonden. Ontelbare mensenlevens zijn door deze vinding soms aanzienlijk verlengd. Tijdens de Eerste Wereldoorlog werd de parachute aan de oorlogsvliegers aanvankelijk niet ter beschikking gesteld, omdat men dacht dat het afbreuk zou doen aan hun moed.

Ook hier constateren we opnieuw, dat uitvindingen in de tijd en in de geografische ruimte voor herhaling vatbaar zijn. De vraag "Hoe oorspronkelijk is een uitvinding?" dient zich telkens weer

aan.

Massa fabricage van producten voor een groot aantal consumenten

Na de Tweede Wereldoorlog ontwikkelde de in aantal exponentieel toenemende mensheid zich tot een samenleving van consumenten van energie, materie en informatie. Voedsel wordt hygiënisch verpakt in grote hoeveelheden en in vele varianten in de supermarkten aangeboden. De materie wordt in fabricage processen tot producten variërend van scheermes tot automobielen gevormd. Informatie stromen worden door kranten, tijdschriften en boeken, maar ook door radio en televisie, als water over een rijstveld, over de mensheid verdeeld. Het antwoord schuilt in de automatisering van de fabricage van alle denkbare en van alle nu nog niet bedachte producten.

Voor het construeren van de daartoe optimale productiemiddelen kan de constructeur kiezen uit mechanische, elektrische, hydraulische of pneumatische overbrengingen voor het overbrengen van energiestromen van de energiebron naar de last. Dit kunnen kiezen van de optimale overbrenging is uitgegroeid tot een vakgebied, dat inmiddels de naam van 'Aandrijftechniek' heeft verworven.

Ook in dit vakgebied is een intensieve relatie tussen mens en lucht tot stand gekomen in de subdiscipline van de 'Pneumatische aandrijftechniek', met een groet een Hero van Alexandrië ook wel met 'Pneumatiek' aangeduid. De gemakkelijk in hun werking te begrijpen bouwstenen van de 'Pneumatiek' blijken een grote aantrekkingskracht uit te oefenen op de constructeur van geautomatiseerde productiemiddelen. Dit blijkt uit de steeds groeiende omzet van deze bouwstenen op de wereldmarkt. De nadelige eigenschap van verkwistend met energie omspringen, werd de pneumatische overbrengingen tot nu toe nog niet al te kwalijk genomen.

Ook de pneumatische overbrenging kreeg, evenals de elektrische en hydraulische voor de automatisering van productiemiddelen, een nog grotere betekenis door de samenvoeging met elektrische en elektronische bouwstenen.

Hierdoor werden de door een computer bestuurd automatische productiesystemen uitvoerbaar. Krachten, verplaatsingen en verplaatsingssnelheden kunnen door de computer worden gedictieerd, om vervolgens door de overbrenging te worden gerealiseerd. Voor het uitvoeren van deze opdrachten beschikken de overbrengingen over verschillende talenten en verschillende eigenschappen.

Bij nadere beschouwing van de pneumatische componenten blijkt dat er weinig of geen nieuwe fundamentele vindingen nodig waren om de geweldige groei in de omzet van de 'electro-pneumatiek' wereldwijd mogelijk te maken. Het huwelijk tussen het pneumatische bestanddeel van deze componenten en de electrotechniek werd immers reeds lang geleden door de orgelbouwers gesloten. De solenoidklep van de orgelbouwer en van Westinghouse kreeg een facelift, goed voor een omzet van miljoenen guldens.

De vindingen van de micro-electronica werden eveneens door een ander technisch vakgebied ter beschikking gesteld. De massafabricage van goedkope pneumatische componenten van hoge kwaliteit verdient bewondering, maar deze wijze van fabricage profiteerde van haar eigen voortbrengsels. De electro-pneumatiek vormt immers een belangrijk bestanddeel van de produktiestraten waarop de pneumatische componenten worden gefabriceerd. De pneumatiek veroorzaakte in de produktietechniek een snelle evolutie. Een schijnbare revolutie die haar eigen kinderen niet verslond, zoals echte revoluties gewoonlijk doen, maar die waarlijk de kunst verstond haar voortbrengsels in te zetten ter ondersteuning van de door haar teweeggebrachte omwenteling.

Het huwelijk tussen de pneumatiek en de electronica heeft nog steeds plaats door middel van een bewegend mechanisch onderdeel. Door een electro-magnetisch veld wordt een mechanisch onderdeel, een klep of een schuif, verplaatst. Hierdoor wordt de doortocht van een opening in een pneumatische stuur- of regelcomponent veranderd. Het gevolg is een verandering in de druk of in de massastroom van de lucht die door deze opening stroomt. Met een veranderende druk kan men een in grootte veranderende kracht uitoefenen. Hiermee

zijn we dan weer aangekomen bij datgene waarom het in de technische relatie tussen mens en lucht zo dikwijls gaat: het zeer beheerst uitoefenen van een in grootte veranderlijke kracht met een bewegend aangrijpingspunt.

De vooruitgang van de automatisering van electro-pneumatische systemen wordt op dit moment beheerst door de vaardigheid in het toepassen van gestructureerde software. Nadat de voor deze automatisering benodigde hardware, de electro-pneumatische en mechanische componenten, de vereiste betrouwbaarheid bieden, hangt het succes meer en meer af van het abstracte 'denken in structuren' van de programmeur. De sleutel tot succes verschuift daarbij van de constructeur naar de programmeur, welke laatste met welhaast het doorzettingsvermogen van de alchemist telkens weer tracht het tot nu toe schijnbaar onmogelijke te realiseren.

Er zou een constructieve doorbraak tot stand komen, als men het in pneumatische kleppen nu nog noodzakelijkerwijze bewegende mechanische onderdeel overbodig zou maken. De lucht zou direct gevoelig moeten zijn voor een elektrisch signaal.

Bij de hydraulische overbrenging zijn vloeistoffen boven de horizon verschenen, die deze gevoeligheid vertonen. Dit zijn de zogenaamde electro-rheologische vloeistoffen. Bij deze vloeistoffen veranderen de fysische eigenschappen onder invloed van een verandering in de sterkte van een magnetisch veld of in de grootte van een elektrische spanning.

In de pneumatiek werd gedurende enige jaren onderzoek verricht naar de eigenschappen van zogenaamde statische componenten. Dit zijn pneumatisch schakelende componenten waaraan bewegende mechanische onderdelen ontbreken. Deze werden aangeduid met de naam 'fluidic componenten'. Bij deze componenten blijft men echter met oorzaak en gevolg in het domein van de lucht. Een veranderlijk signaal van een energetisch zwakke luchtstroom beïnvloedt de grootte of richting van een luchtstroom van een hoger energieniveau. Wellicht zou men fundamenteel onderzoek moeten verrichten aan 'electro-fluidische componenten' om de voor de pneumatiek

gewenste nieuwe wegen te vinden.

Het schetsen van de toekomst is gewaagd.

Op dit punt gekomen beschrijven we niet meer hetgeen geweest is, maar dat wat zou moeten komen. Dit is juist nog te verantwoorden. Een stap verder en we zouden in de kristallen bal van de toekomst trachten te kijken. Dit ligt echter niet in onze bedoeling. De toekomst is moeilijk te voorspellen, omdat zij verandert, zodra ook maar iemand over haar denkt en omdat er zovelen over de toekomst denken, is de toekomst onvoorspelbaar. Hierdoor wordt de indruk gevestigd, dat de toekomst meer fantasie heeft dan de mens.

Hier nu komen we aan het einde van onze reis door de tijd, waarin wij gedachten ontwikkelden over de verhouding van de mens tot de hem omgevende lucht. Nadat de mens zich bewust werd van het bestaan van lucht, bestudeerde hij haar eigenschappen. De daarbij verkregen feitelijke en inzichtelijke kennis werd toegepast voor het opwekken van krachten en voor het overbrengen van energie met behulp van lucht. Vele standbeelden van uitvinders stonden langs de weg van onze reis in de tijd. Niet alleen door de steeds toenemende technische activiteiten van de mens, maar alleen al door de toenemende aantallen mensen op aarde treden er sluipende veranderingen op in de dunne luchtfilm die de aardbol omgeeft. Het handhaven van een leefbaar klimaat op aarde zal tot een van de meest belangrijke taken voor toekomstige generaties van ingenieurs en uitvinders behoren. Laten we beseffen dat het onze aarde misschien wel per toeval gegund was om een dunne luchtfilm te behouden, een luchtfilm dunner dan een schil om een appel.

Aan het einde van deze gedachten over de relatie tussen mens en lucht, daarbij de menselijke vindingen overdenkend, kan men het eens zijn met Albert Einstein, die als een uitvinder die zich over het uitvinden zelf verwondert, in 1953 schreef:

*"The astonishing thing is
that these discoveries were made at all."*

LITERATUUR

- [1] Trefil, J.S., A scientist at the seashore,
Macmillan Publishing Company, New York.
Collier Books edition 1987.
- [2] Sillen, A., C.K. Brain, Ancestors: Old Flame,
Natural History, April 1990.
ISSN 0028 - 0712.
- [3] Boorstin, D.J. The Discoverers,
Vintage Books, Random House,
New York, 1985.
- [4] Martin, Gene & Mary,
Trail Dust,
Martin Associates, Manitou Springs, Co.
- [5] Allen, O.E., The Windjammers,
Time-Life Books Inc. 1978.
- [6] Reti, L., Leonardo da Vinci
Het Spectrum, Utrecht/Antwerpen, 1974.
- [7] Hutton, S.P., The saga of the singing kettle,
University of Southampton,
Inaugural lecture, 1972.
- [8] Woodman, J., Nacza. Journey to the sun.
Bertelmann Verlag, Muenchen, 1977.
- [9] Balaskovic, P., F. Moizard,
Les Ballons du Futur,
Seci Editeur, France, 1983.
- [10] Constantinesco, G.,
Sonics.
Lecture before the Society of Engineers
London, 6th april 1959.
- [11] Ouden, A. den, Een stadpersluchtnet.
De Ingenieur, december 1988, p.44.
- [12] Veldman, H., De Geschiedenis van de Pneumatiek,
Afstudeerverslag,
T.U. Eindhoven, 1990.
- [13] Halle, G., Otto Lilienthal,
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1976.
- [14] Setright, L.J.K., The Power to Fly,
George Allen & Unwin, London, 1971.

Aangeboden door FESTO B.V.
November 1990.