Nederlands leidende rol in de aerodynamica van windenergie

Dit artikel beschrijft verschillende onderzoeksactiviteiten die plaatsvinden in de aerodynamica van windenergie. Daartoe wordt eerst het belang van de aerodynamica geschetst voor verschillende onderwerpen die relevant zijn voor windenergie. Vervolgens wordt ingegaan op een aantal lopende onderzoeksactiviteiten. Nederlandse onderzoeksinstituten blijken daarbij een leidende rol te spelen. Gerard Schepers

Algemeen wordt onderkend dat de afhankelijkheid van niet-duurzame energiebronnen (bijvoorbeeld fossiele of nucleaire) een mondiaal probleem is gezien de milieu- en klimaatbelasting die ermee samenhangen. Conventionele energiebronnen zijn bovendien eindig en vaak afkomstig uit politiek instabiele regio's. Dit leidt tot een continue onzekerheid omtrent energievoorziening en prijsniveau.
Om deze problemen het hoofd te bieden wordt er meer en meer ingezet op het duurzaam genereren van energie.

Gerard Schepers is in 1986 afgestudeerd aan de TU Delft bij de faculteit Luchtvaart en Ruimtevaarttechniek en werkt sindsdien bij het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) als onderzoeker op het gebied van windenergie. Na zijn promotie aan de TU Delft in 2012 werkt hij daarnaast parttime als lector Windenergie bij de Noordelijke Hogeschool Leeuwarden NHL.

schepers@ecn.nl

Hoewel een duurzame energievoorziening waarschijnlijk gebaseerd zal zijn op het gebruik van verschillende bronnen, is windenergie als duurzame energiebron een veelbelovende optie. Windenergie heeft onder andere relatief lage kosten en een groot potentieel. Sinds de jaren zeventig van de vorige eeuw, toen het dichtdraaien van de oliekraan door landen in het Midden-Oosten en een toenemend milieubesef leidden tot een veranderd denken over de beschikbaarheid en gevolgen van conventionele energiebronnen, heeft de ontwikkeling van windenergie een stormachtige ontwikkeling doorgemaakt. Dit wordt geïllustreerd in figuur 1 waaruit blijkt dat er wereldwijd reeds zo'n 400 GW aan nominaal windvermogen is geïnstalleerd (ter vergelijking: het Nederlandse elektriciteitsverbruik op werkdagen is in de orde van 16 GW), terwijl landen als Denemarken reeds meer dan 30% van hun elektriciteitsproductie uit wind halen.
Het door de windturbine opgewekte vermogen schaalt met het kwadraat van de rotordiameter. Tegenwoordig zijn windturbines beschikbaar met diameters tot wel 164 meter en een torenhoogte van dezelfde orde van grootte. Hierbij dient bedacht te worden dat de duurdere constructie die samenhangt met een hoge toren gecompenseerd kan worden door het feit dat de windsnelheid en dus ook de opbrengst toenemen met hoogte.
Grote windturbines worden veelal offshore geïnstalleerd, op vele tientallen kilometers uit de kust (niet zichtbaar vanaf het land), en moeten daar ook worden onderhouden. Er zijn dus vele technologische uitdagingen te overwinnen als we offshore windenergie kosteneffectief willen maken. Een van die uitdagingen betreft de aerodynamica, het vakgebied dat de stroming rondom de windturbine beschouwt.

Belang van aerodynamica

Het belang van de aerodynamica is velerlei:

Opbrengst

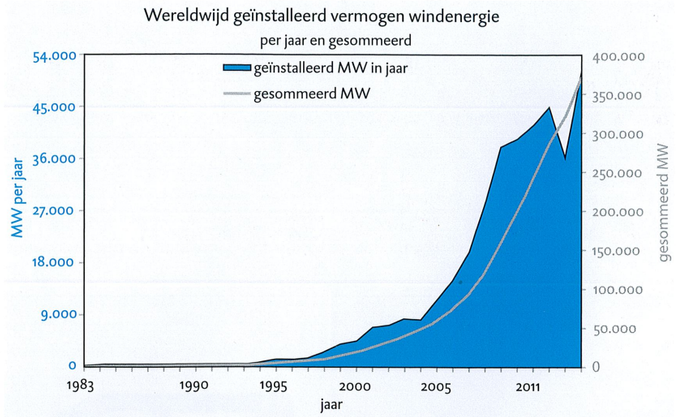
Een van de belangrijkste wetmatigheden uit de aerodynamica van de windturbine is het zogenoemde Betzmaximum. Dit bepaalt dat de vermogenscoëfficiënt (de verhouding van het windturbinevermogen gedeeld door het vermogen in de wind) nooit meer dan 16/27 ~0,59) kan zijn waarbij het vermogen in de wind gelijk is aan 0,5 ρ V^3 met ρ de dichtheid van lucht en V de windsnelheid. De afleiding daarvan is gebaseerd op de behoudswetten voor massa, impuls en energie en is te vinden in elk leerboek (zie bijvoorbeeld [2]). In de praktijk treden er diverse aërodynamische verliezen op die het daadwerkelijk opgenomen vermogen verder reduceren. Door een goed aerodynamisch ontwerp wordt getracht deze verliezen te beperken waardoor in de praktijk vermogenscoëfficiënten van ongeveer 0,5 behaald kunnen worden.

Kosten/kWh

Het zo groot mogelijk maken van de opbrengst is echter niet zaligmakend. Belangrijker is het verminderen van de kosten per kWh. Daarbij spelen naast de opbrengst ook de belastingen op een windturbine een rol. Deze belastingen bepalen namelijk hoeveel materiaal nodig is bij de bouw van een windturbine en de slijtage gedurende gebruik. Het kan dan gunstig zijn om windturbines te laten draaien op een werkpunt dat verschoven is ten opzichte van het Betzmaximum. Dat leidt weliswaar tot een iets lagere vermogenscoëfficiënt, maar daar staat tegenover dat de aerodynamische belastingen en de daarmee gepaard gaande kosten sterker afnemen dan de kosten die samenhangen met de verminderde opbrengst.

Aero-elasticiteit

Windturbineconstructies zijn flexibel en bewegen onder invloed van de belastingen die ze ondergaan. Dat heeft weer invloed op de stroming rondom het rotorblad en dus op de aerodynamische belastingen. De interactie tussen vervorming en aerodynamica wordt aero-elasticiteit genoemd. De studie daarvan is een belangrijk vakgebied omdat een windturbine vele vrijheidsgraden (en daarmee eigenfrequenties) heeft, die ook nog eens gekoppeld zijn (denk bijvoorbeeld aan de bewegingen van het blad tezamen met de bewegingen van de toren). Daarbij ondergaat een windturbine een sterke periodiciteit in belastingen (periodiek omdat de rotor met een redelijk constant toerental in een zwaartekrachts- en windveld draait).



Figuur 1 Jaarlijks en gesommeerd geïnstalleerd windvermogen wereldwijd (uit [1]).

Figuur 2 Zogeffecten in een windpark.

Samen met de periodieke belasting leiden de vele eigenfrequenties tot resonanties (opslingeringen). Deze opslingeringen worden op twee manieren gedempt: vanuit de constructie maar normaal gesproken dempt ook de aerodynamica deze bewegingen. Het is echter mogelijk dat de aerodynamische demping negatief wordt en de positieve demping vanuit de constructie gaat overheersen. Hierdoor kan er schade als gevolg van resonanties optreden.

Windparkverliezen

Windturbines worden in parken geplaatst met als gevolg dat er achter de windturbine een zog optreedt dat het vermogen van de daarachter geplaatste windturbines reduceert, zie figuur 2. De hiermee gepaard gaande verliezen kunnen in de orde van 10-15% zijn. Nauwkeurige kennis van deze verliezen is nodig om de *return on investment* van een windpark te kunnen bepalen en om regelingen te ontwerpen die de windparkverliezen reduceren. De turbine vooraan in de windstroming wordt hierbij 'afgereageld' op een lager vermogen. Dit verlies van de eerste turbine kan echter worden overgecompenseerd door het zwakkere zog dat samengaat met dit afregelen hetgeen leidt tot een meeropbrengst van de turbines achteraan de windstroming.

Geluid

Geluidshinder is een van de belangrijkste problemen bij sociale acceptatie van windturbines. De dominante geluidsbron op een windturbine heeft zijn oorzaak in de aerodynamica van de rotor. Het meeste geluid treedt daarom op aan de buitenkant van het blad waar de snelheden het hoogst zijn. Mechanisch geluid (bijvoorbeeld vanuit een tandwielkast) is voor moderne windturbines nauwelijks een probleem.

Huidig en toekomstig onderzoek aan de aerodynamica van windenergie

Op het gebied van aerodynamica heeft Nederland een grote naam, die vooral wordt hooggehouden door het Energieonderzoek Centrum (ECN) en de

Figuur 3 Uitzicht op het ECN-testpark vanuit een van de turbines. Foto: ECN.

Figuur 4 New Mexico-experiment in de Duits-Nederlandse Windtunnel. Foto ECN.

TU Delft. Deze instellingen coördineren een aantal grote internationale projecten [3, 4] en beschikken over unieke testfaciliteiten. Zo heeft de TU Delft diverse windtunnels onder andere voor het doormeten van bladprofielen (de dwarsdoorsnede van het stromingsprofiel om een windturbineblad). De vorm van zo'n bladprofiel bepaalt in hoge mate de prestatie van een windturbine. Belangrijk hierbij is dat deze profielen een hoge draagkracht en lage weerstand leveren, niet alleen in schone maar ook in vervuilde toestand. Vervuiling door insecten, zand et cetera kan namelijk leiden tot significant vermogensverlies. De door de TU Delft ontworpen (en gemeten) profielen worden wereldwijd in een zeer groot aantal windturbines toegepast.

Een unieke faciliteit van ECN is een eigen testpark dat bestaat uit vijf windturbines met een vermogen van 2,5 MW en een diameter en torenhoogte van tachtig meter, zie figuur 3. Aan dit testpark wordt veel zogonderzoek uitgevoerd dat van belang is voor het minimaliseren van bovengenoemde windparkeffecten.

Ook hebben zowel ECN als de TU Delft een grote naam als het gaat om ontwikkelen van aerodynamische modellen die geïmplementeerd zijn in ontwerpsoftware die door fabrikanten wordt gebruikt om het optimale windturbine-ontwerp te maken en te bepalen welke belastingen er gedurende de levensduur op een windturbine optreden, zie [2].

De grootste onzekerheid in windturbine-ontwerpsoftware zit in de aerodynamische rekenmodellen die aan dergelijke software ten grondslag liggen. Dit heeft te maken met het feit dat de zogeheten Navier-Stokesvergelijkingen, de vergelijkingen voor de snelheidscomponenten en de druk in een stroming, sterk niet-lineair zijn, hetgeen ze (schijnbaar?) onoplosbaar maakt. Een directe numerieke oplossing van de Navier-Stokesvergelijkingen is nog niet mogelijk vanwege de excessieve rekentijden die daarmee gepaard gaan.

Het is derhalve een uitdaging om de aerodynamische rekenmodellen te vertalen naar zogenoemde engineeringrekenmodellen die enerzijds rekenefficiënt zijn maar toch dusdanig veel fysica bevatten dat ontwerpberekeningen met voldoende nauwkeurigheid worden uitgevoerd. Als invoer voor deze engineeringmodellen worden windtunnelmetingen aan bladprofielen gebruikt. Hierbij dient echter bedacht te worden dat aerodynamica schaalafhankelijk is via het zogenoemde Reynoldsgetal. Het Reynoldsgetal geeft de verhouding van drukkrachten ten opzichte van visceuze krachten via $\rho V L/\mu$ met μ de viscositeit, V de snelheid, L een karakteristieke afmeting en ρ de luchtdichtheid.

Deze schaalafhankelijkheid maakt dat het Reynoldsgetal voor grote turbines hoger dan 15 miljoen kan zijn terwijl het Reynoldsgetal in de windtunnel, waar de schaal van het meetobject veel kleiner is, veelal lager is dan 6 miljoen. Dit maakt het moeilijk de prestaties van een grote turbine te voorspellen door middel van windtunnelmetingen aan schaalmodellen. Uiteraard kan het Reynoldsgetal in de windtunnel worden verhoogd door de snelheid te verhogen, maar boven de 100 m/s treden er compressibiliteitseffecten (Macheffecten) op waardoor de stroming niet meer representatief is. Een andere mogelijkheid om een representatief Reynoldsgetal in een windtunnel te verkrijgen is het verhogen van de druk. Daartoe zijn recent metingen uitgevoerd in de zogenoemde hogedrukfaciliteit van de Duits-Nederlandse tunnel in Göttingen (Duitsland) waarin een druk van 80 bar kon worden aangebracht leidend tot een Reynoldsgetal van 15 miljoen dat representatief is voor grote windturbines.

De experimenten in deze hogedruktunnel hadden betrekking op profielmetingen maar daarnaast worden er sinds eind jaren tachtig van de vorige eeuw metingen uitgevoerd aan roterende windturbinebladen. Karakteristiek voor dergelijke experimenten is de meting van drukken langs het blad en van het onderliggende stromingsveld in en rond de rotor. Metingen aan roterende bladen zijn overigens niet alleen uitgevoerd in de windtunnel maar ook op een-op-eenschaal aan turbines in de vrije atmosfeer. Echter, windtunnelmetingen hebben daarbij het voordeel dat ze worden uitgevoerd in een uniforme, constante en daardoor goed bekende instroming. Een van de meest aansprekende voorbeelden van een windtunnelexperiment is het zogenoemde New Mexico-project waarin is gemeten aan een turbine met een diameter van 4,5 meter die is geplaatst in de grootste windtunnel van Europa, de grote lage-snelheidsfaciliteit (LLF) van de Duits-Nederlandse Windtunnel (DNW), in de Noordoostpolder, zie figuur 4.

Een nadeel van deze windtunnelmetingen ligt in het lage Reynoldsgetal dat samenhangt met de kleine schaal maar ook in het feit dat zo'n goed gedefinieerde stroming weliswaar de interpretatie van de resultaten vereenvoudigt, maar niet representatief is voor de stochastische turbulente instroming die een windturbine ondergaat in het vrije veld. Dit is dan ook de reden dat er daarnaast aerodynamische metingen in het veld in een-op-eenschaal zijn uitgevoerd.

De metingen uit de verschillende projecten hebben vele aerodynamische verschijnselen zichtbaar gemaakt waardoor het begrip van de aerodynamica enorm is toegenomen. Geen enkele windturbineontwerper zou nu nog gebruik durven maken van de aerodynamische rekenmodellen van dertig jaar geleden. Toch is het aantal gedetailleerde en betrouwbare aërodynamische metingen nog niet erg groot. Zo is er nauwelijks experimenteel validatiemateriaal over de grenslaag rondom een windturbineblad, die erg bepalend is voor de aerodynamische weerstand. En waar een exacte modellering van de aerodynamica vooralsnog onmogelijk is, is het logisch dat verschillende internationale onderzoekers erop aandringen om de activiteiten op het gebied van de experimentele rotoraerodynamica (en de daaruit volgende modelverbetering) te intensiveren. Nederland zal ook bij deze toekomstige activiteiten ongetwijfeld een belangrijke rol blijven spelen.

Referenties

1 BTM Consult, *World Market Update 2014 International Wind Energy Development Forecast 2015-2019* (2015).

2 J.G. Schepers, *Engineering models in wind energy aerodynamics - Development, implementation and analysis using dedicated aerodynamic measurements.* PhD thesis, TU Delft (2012).

3 www.mexnext.org. Verzamelen en analyseren van aerodynamische metingen in internationaal verband.

4 www.eera-avatar.eu. Internationaal project voor het ontwikkelen van aerodynamische rekenmodellen voor windturbines in de klasse van 10 MW

Reactie

Adaptieve optica

Het artikel over adaptieve optica (*NTvN* **81-12**, 404-407) belicht een interessant onderwerp uit de toegepaste natuurkunde, één die het mogelijk maakt het beeldverstorende effect van atmosferische turbulentie ongedaan te maken en derhalve scherpe afbeeldingen van hemelse voorwerpen te geven.

Het is, geloof ik, van belang voor de lezer om iets te weten over het ontstaan van de adaptieve optica. Ik was zelf betrokken bij de toenmalige ontwikkeling van de wisselwerking tussen lichtgolven en atmosferische turbulentie in 1962-1982. Hoewel er al een enkel artikel hierover bestond, kan men met enig recht zeggen dat de grondlegger van onze kennis over deze wisselwerking V.I. Tatarskii is [1, 2], van wie twee werken de bijbel voor nieuwe onderzoekers op dit gebied waren. Tevens hoort hierbij het boek van Chernov [3] uit ongeveer dezelfde tijd als het eerste werk van Tatarskii. Deze Russische werken werden als gevolg van de Koude Oorlog pas enige jaren na hun ontstaan in het Westen bekend en ze verdienen het niet om in de vergetelheid te raken.

Voor zover ik het mij herinner van een gesprek met Freeman Dyson tijdens een bezoek in de vroege zeventiger jaren van de vorige eeuw aan RCA Laboratories, waar ik werkzaam was, kwam bij hem het idee op om regeltechnieken toe te passen op beweegbare delen van telescoopspiegels. Dyson was toen lid van een JASON-panel; JASON was deel van het Advanced Research Projects Agency (ARPA) dat belast was met nieuwe, zelfs speculatieve, ontwikkelingen, voornamelijk op militair gebied (maar het internet is later ook uit ARPA gekomen). Tenzij ik iets over het hoofd zie deed Dyson dan ook de eerste adaptieve-opticaberekening [4].

Ten slotte is er D. L. Fried [5] die in het aangehaalde artikel en daarna baanbrekend werk op dit gebied deed. Het is natuurlijk leuk om Plutarchus aan te halen en een verwijzing naar Kolmogorov als een van de grondleggers van turbulentieleer is onmisbaar, maar – nogmaals gezegd – het zou jammer zijn als bovengenoemd werk de vergetelheid ingaat.

D.A. de Wolf

Referenties

1 V. I.Tatarskii, *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill, New York (Library of Congress number 60-15763), (1961).

2 V. I. Tatarskii, *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*, Israel Program for Scientific Translation (1971).

3 L. A. Chernov, *Wave Propagation in a Random Medium*, McGraw-Hill, New York (Library of Congress number 60-11437), (1960).

4 F. Dyson, *Photon noise and atmospheric noise in active optical systems, J. Opt. Soc. Am.* **65**, 551-558 (1975).

5 D. L. Fried, *Anisoplanatism in adaptive optics, J. Opt. Soc. Am.* **72**, 52-61 (1982).