PHASE TO PHASE

Stochastische loadflow.

Beschrijving model belasting.

01 195 pmo

25-10-2001

Phase to Phase BV
Utrechtseweg 310
Postbus 100
6800 AC Arnhem
T: 026 356 38 00
F: 026 356 36 36
www.phasetophase.nl

INHOUD

1 INLEIDING

1.1 Probleemstelling

Netten voor elektriciteitsdistributie zijn altijd vrij ruim gedimensioneerd. Omdat de belasting van klant tot klant sterk kan fluctueren, hebben elektriciteitsbedrijven altijd het zekere voor het onzekere genomen en de kabels dikker dan strikt nodig gekozen. De belastingen worden in het ontwerpproces altijd met hun maximale waarde aangenomen. Hierdoor wist de ontwerper absoluut zeker dat de elektrische spanning nooit onder de gestelde eisen zou komen. Tegenwoordig worden de elektriciteitsbedrijven gedwongen (o.a. door de DTe) tot kostenbesparing. Een andere ontwerpmethode ten aanzien van de kabels kan tot besparingen leiden. Door de introductie van stochastische technieken in de modellering van de belastingen in het net, worden de marges minder groot genomen en kunnen de kabels beter worden gekozen in relatie tot het werkelijke gedrag in de praktijk.

1.2 Doelstelling

Ontwikkelen van een nieuwe op stochastische techniek gebaseerde methode om belastingen in een net voor elektriciteitsdistributie te modelleren en daarmee de toestand van een distributienet door te rekenen, zodanig dat een kostenbesparing op de infrastructuur behaald wordt.

1.3 Aanpak

In het project staan twee ontwikkelingen centraal:

- Ontwikkelen van een nieuwe op stochastische techniek gebaseerde methode om belastingen in een net voor elektriciteitsdistributie te modelleren.
- Modellering van een nieuwe methode om met "onzekere" stochastische belastingen de toestand van een distributienet door te rekenen.

Het onderzoek wordt uitgevoerd met de volgende fasering:

- Beschrijving stochastisch model van de belasting
- Beschrijving algoritme van de stochastische loadflow.

<u>Technisch probleem:</u>
In het stochastische model wordt uitgegaan van begrippen als verwachtingswaarde en spreiding. Dat zijn begrippen waar de ontwerper van laagspanningsnetten geen raad mee weet. Er moet een zodanige modellering worden gekozen, dat een vertaalslag van de huidige praktijk kan worden gemaakt. De modellering wordt bepaald door het type van de belasting (soort gebruiker en opwekker) en het aantal belastingen heeft invloed op de gelijktijdigheid. De mogelijkheid om de belastingen voldoende en eenduidig met stochastische parameters te kunnen beschrijven is onzeker. Zodra de modelvorming van de belasting vastligt, moet het verwerkt worden in de netberekeningen, die traditioneel gebaseerd zijn op determinischische modellen. De wiskundige aanpak daarvan is onzeker.

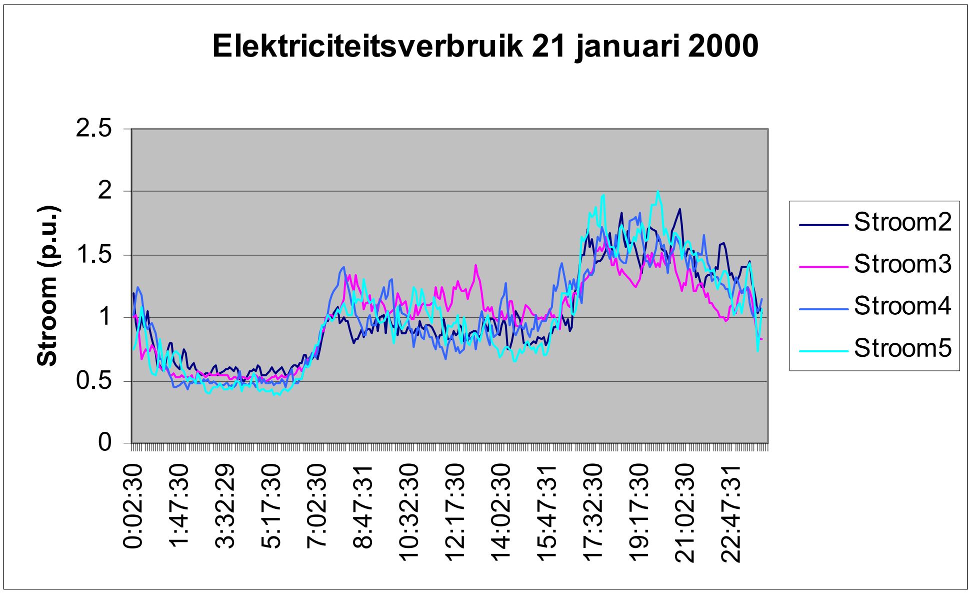
<u>Oplossingsrichting:</u>
De modellering van de belasting vindt plaats met behulp van verwachtingswaarde en spreiding, met de veronderstelling dat het stochastische gedrag normaal verdeeld is. De netberekening wordt uitgevoerd als superpositie van de separate door de verwachting en de variantie beschreven situaties.

2 BESCHRIJVING BELASTING

Momenteel worden ontwerpberekeningen voor LS- en MS-netten uitgevoerd door gebruik te maken van modelvorming van maximale belastingen in combinatie met kentallen voor de gelijktijdigheid ervan. De techniek is gebaseerd op de informatie die de distributiebedrijven jaarlijks vergaarden met maximaalmetingen in het net. Door Rusck werd in 1956 daartoe een formule opgesteld die alom werd geaccepteerd. In 1975 werd door Strand en Axelsson een proefondervindelijke relatie vastgesteld tussen maximale belasting en jaarverbruik. Deze laatste methode leende zich tot het berekenen van maximale factoren gerelateerd aan verbruik-categorieën in de praktijk. In combinatie met belastingsprognose zijn deze modellen de basis voor de huidige ontwerpen van MS en LS-netten.

Genoemde modellen geven inzicht in een worst-case. De beperkingen daarbij zijn dat een loadflowberekening niet met gelijktijdigheid kan omgaan. Met kunst en vliegwerk kunnen in radiaal bedreven netten verschillende belastingen 'gelijktijdig' worden gesommeerd en wordt een 'gelijktijdig' beeld van de netstromen bepaald. Een worse case van 'gelijktijdige' spanningen is daarbij net zo'n groot probleem. Situaties met minimale belasting en maximale spanningen zijn in het model niet mogelijk. Spanningkwaliteit kan dus niet volledig beoordeeld worden.

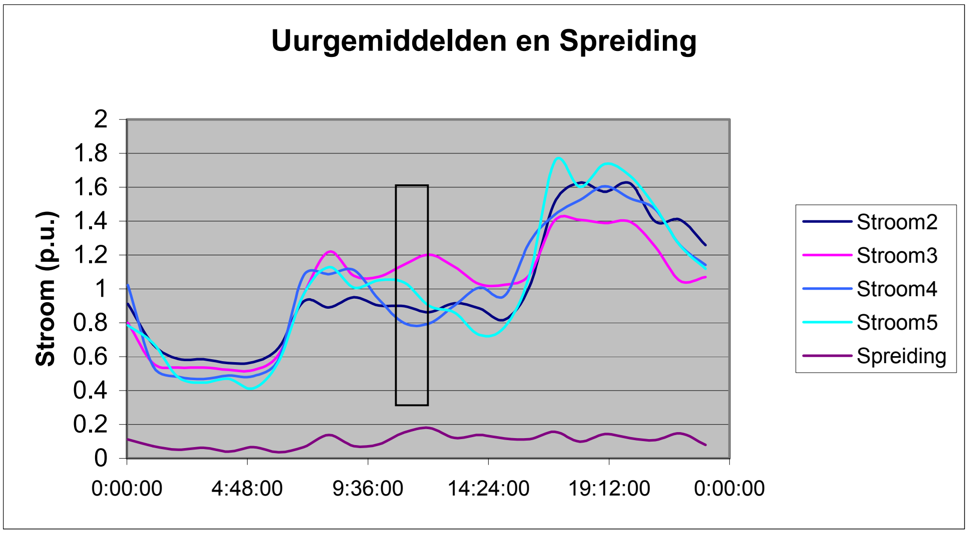
Individuele gebruikers vertonen in het elektriciteitsverbruik een zeker groepsgedrag, maar gedragen zich momentaan gezien als individuen. Niet bij iedereen draait de wasmachine op hetzelfde moment. Maar toch vertonen de individuele gebruikers als functie van de tijd, verspreid over een dag, gemiddeld genomen grote overeenkomsten in het gedrag. Onderstaande figuur illustreert dit, waarin de belastingscurves genormeerd zijn naar hun individuele gemiddelde. Tussen 1:00 en 7:00 uur is de belasting minimaal. Tussen 7:00 en 9:00 uur neemt de belasting snel toe. 's-Avonds neemt de belasting nog meer toe, om daarna weer af te dalen tot het minimum.



Figuur 1 Genormeerd elektriciteitsverbruik voor vier afnemers, verspreid over een dag.

Alle belastingen gedragen zich over de gehele dag genomen als afhankelijke signalen, maar binnen een beperkt tijdvenster (bijvoorbeeld van één uur) gedragen zij zich als onafhankelijke stochastische signalen. Van die stochastische signalen kan per tijdvenster een gemiddelde waarde en een spreiding worden uitgerekend. Onderstaande afbeelding illustreert dit. Van alle genormeerde belastingskrommen zijn eerst op uurgemiddelden gebaseerde belastingskrommen berekend. Vervolgens zijn deze uurcurves als functie van de tijd uitgezet.

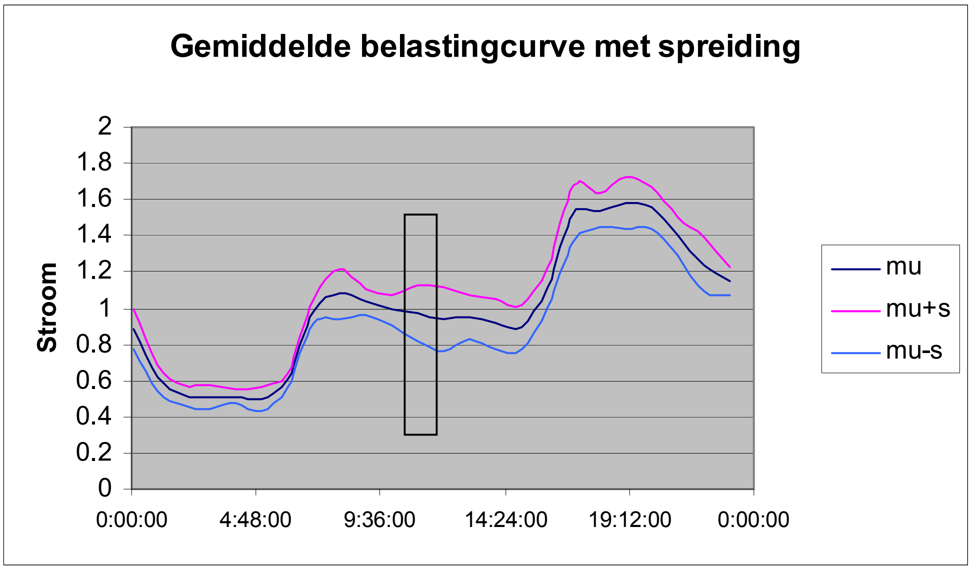
Bovendien is voor elke uurwaarde de spreiding uitgerekend tussen alle vier de curves. Deze spreiding is eveneens als functie van de tijd uitgezet.



Figuur 2 Uurgemiddelden van genormeerd elektriciteitsverbruik voor vier afnemers en spreiding, over een dag.

In bovenstaand figuur is met behulp van een kadertje een tijdvenster aangegeven, waarbinnen zich de momentane belasting als een onafhankelijk stochastisch signaal gedraagt. De belasting laat zich in ieder tijdvenster beschrijven als een stochastische variabele, met een gemiddelde waarde en een spreiding. Voor het aangegeven tijdvenster in de figuur is de gemiddelde waarde ongeveer gelijk aan 1 en de spreiding ongeveer gelijk aan 0,2.

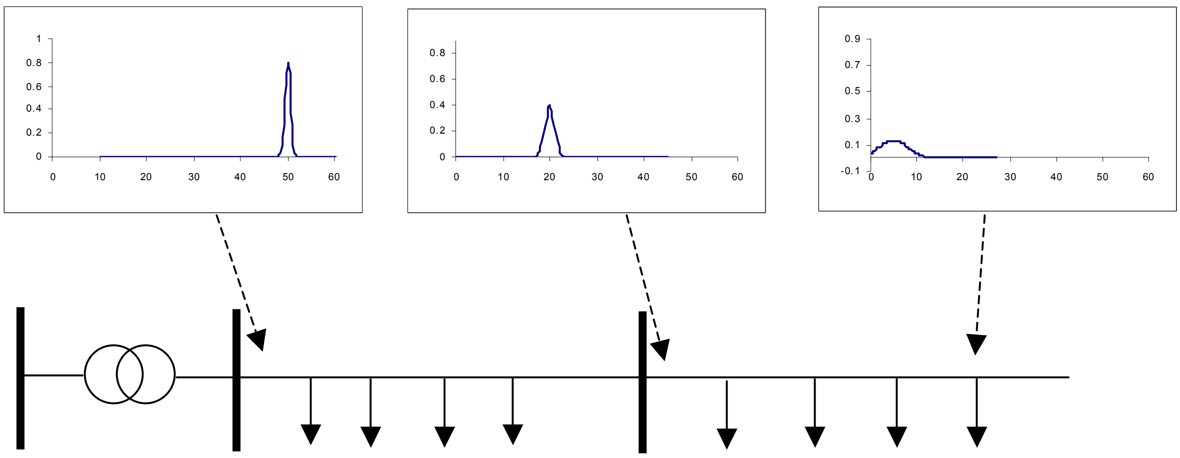
In onderstaand figuur is de gemiddelde belastingscurve voor bovenstaande vier belastingen afgebeeld. Deze kromme is gelabeld "mu". Ook is met behulp van de spreidingscurve een band aangegeven, waarbinnen zich met een zekere waarschijnlijkheid de individuele belastingscurven zullen bevinden. De grenzen zijn berekend door de spreidingscurve bij de gemiddelde curve op te tellen (mu+s) en af te trekken (mu-s). Indien de stochastische belasting zich als een normaal verdeelde variabele zou gedragen, zou de werkelijke waarde van de belasting zich met een waarschijnlijkheid van 70% binnen de aangegeven grenzen bevinden (vergelijk de 2σ en 3σ grenzen, die een waarschijnlijkheid van respectievelijk 95% en 99,5% opleveren).



Figuur 3 Gemiddeld elektriciteitsverbruik en 1σ grens, over een dag.

De Centrale Limietstelling stelt dat de som van een voldoend groot aantal onafhankelijke variabelen bij benadering normaal verdeeld is. Dat betekent voor dit geval dat de som van een voldoende aantal onafhankelijke stochastische belastingsignalen ook bij benadering normaal verdeeld is. Dit is bevestigd door Engels (RWTH, 2000) en Livik (CIRED, 1993).

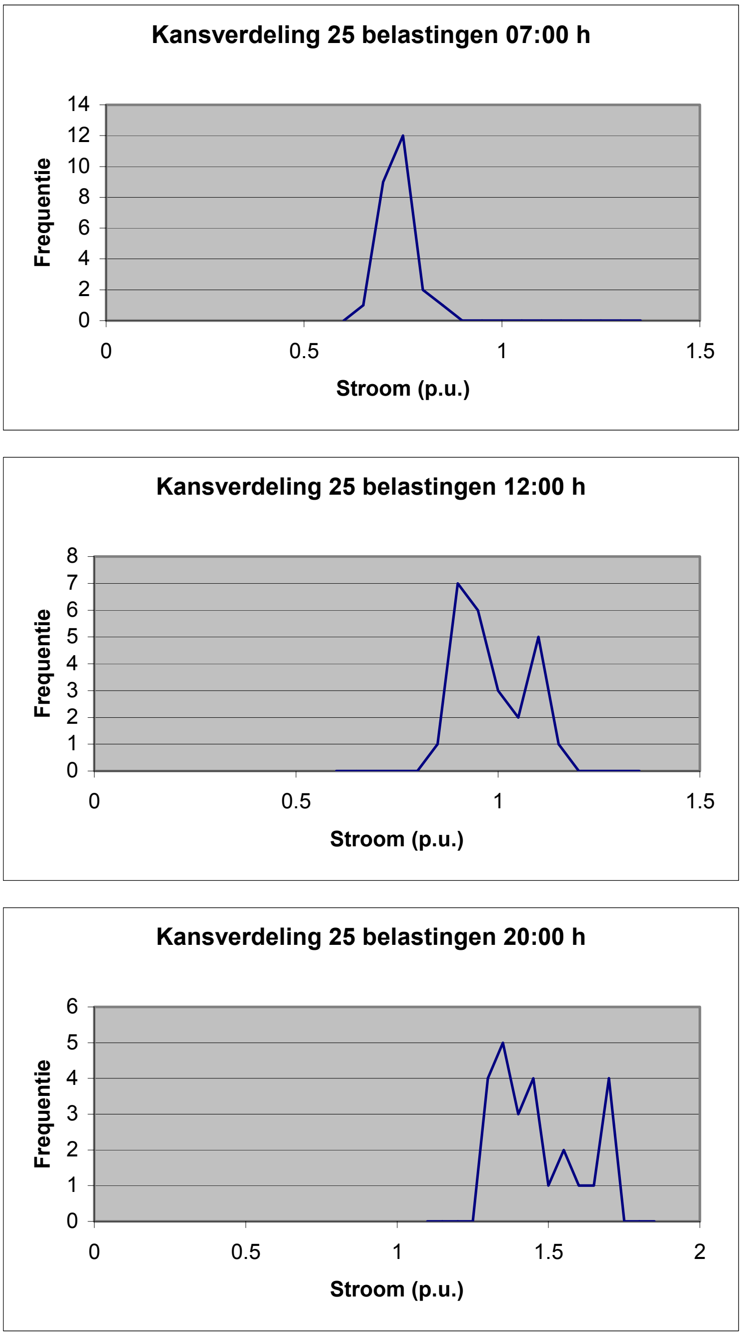
De totale belasting gedeeld door het aantal belastingen is gelijk aan het gemiddelde. Onderstaand diagram geeft aan hoe dit uitwerkt in een distributienet.



Figuur 4 Mogelijke kansverdelingen van de afnemende stroom in een richting van een distributienet

Dicht bij de voeding is achter het meetpunt het aantal belastingen, en dus het aantal onafhankelijke stochastische signalen, groot. Doordat de som van het aantal onafhankelijke belastingen verder in het net afneemt, neemt de onzekerheid (en dus de spreiding) toe. Dit komt omdat de maximale belasting bij de verschillende verbruikers op verschillende tijdstippen op zal treden. Dit verschijnsel is eerder beschreven door Rusck (EnergieNed, 1996). We zien dus dat de gemiddelde waarde afneemt en dat de spreiding in verhouding toeneemt. Voor een klein aantal verbruikers of zelfs een enkele is het in feite niet meer correct om de normale verdeling toe te passen.

Nader onderzoek naar het stochastische gedrag van de belasting kan een beeld van de mogelijke kansverdelingen in de praktijk opleveren. Ter illustratie zijn hieronder voor drie tijdstippen de kansverdelingen gegeven op basis van 25 belastingen. Goed te zien is dat de kansverdelingen voor deze 25 metingen niet zuiver normaal verdeeld zijn. Pas bij een veel groter aantal metingen zal de kansverdeling naar een normaal verdeelde functie tenderen.



Figuur 5 Kansverdelingen voor drie tijdstippen

3 STOCHASTISCHE MODELLERING

Het model van Rusck zegt dat er een relatie is tussen de maximale netbelasting en de maximale belasting van een gebruiker, ook al zijn beide variabelen stochastisch onafhankelijk. Deze relatie gaat overigens alleen op indien er voldoende gelijksoortige gebruikers op het net aangesloten zijn. In formulevorm luidt die relatie:

$$B_{\max,n} = n \cdot B_{\max,1} \cdot g_n \qquad (1)$$

waarbij:
n : het aantal verbruikers
$B_{max,1}$: maximale belasting van één verbruiker
g_n : gelijktijdigheidsfactor voor n verbruikers

Voor de gelijktijdigheidsfactor geldt:

$$g_n = g_\infty + (1 - g_\infty)\frac{1}{\sqrt{n}} \qquad (2)$$

waarbij:
g_∞ : gelijktijdigheidsfactor voor een oneindig aantal verbruikers.

In praktijk blijkt g_∞ ongeveer gelijk te zijn aan 0,2. Dat betekent dat het grootste gedeelte van de gelijktijdigheidsfactor evenredig is met het omgekeerde van de wortel van het aantal verbruikers.

De formule van Rusck is af te leiden uit de formule van de spreiding, indien we veronderstellen dat de belasting zich voor een bepaald tijdstip laat beschrijven als een onafhankelijke normaal verdeelde stochastische belasting. De afleiding hiervan is gegeven in het boek "Elektriciteitsdistributienetten" (EnergieNed, 1996). Voor een normaal verdeelde belasting is de spreiding een maat voor het verschil tussen het maximum en het gemiddelde. Voor één aansluiting geldt dan:

$$B_{\max,1} - B_{gem,1} = C \cdot \sigma_1 \qquad (3)$$

waarin:
$B_{max,1}$: maximale belasting van één aansluiting
$B_{gem,1}$: gemiddelde belasting van één aansluiting
σ_1 : spreiding van één aansluiting
C : een constante

Voor een gelijktijdige belasting van n aansluitingen geldt:

$$B_{\max,n} - B_{gem,n} = C \cdot \sigma_n \qquad (4)$$

Omdat de belasting voor elke aansluiting zich gedraagt als eenzelfde normale verdeling, geldt voor de spreiding:

$$\sigma_n = \sqrt{n} \cdot \sigma_1 \qquad (5)$$

en voor de gemiddelde belasting:

$$B_{gem,n} = n \cdot B_{gem,1} \qquad (6)$$

Uit vergelijking (4) volgt, na combinatie van (5), (6) en (3):

$$B_{\max,n} = B_{gem,n} + C \cdot \sigma_n = n \cdot B_{gem,1} + (B_{\max,1} - B_{gem,1})\sqrt{n} \qquad (7)$$

Uit vergelijking (1) volgt een uitdrukking voor de gelijktijdigheidsfactor, die na invullen van vergelijking (7) over gaat in:

$$g_n = \frac{B_{\max,n}}{n \cdot B_{\max,1}} = \frac{B_{gem,1}}{B_{\max,1}} + \left(1 - \frac{B_{gem,1}}{B_{\max,1}}\right)\frac{1}{\sqrt{n}} \qquad (8)$$

Voor een oneindig aantal aansluitingen gaat vergelijking (8) over in:

$$g_\infty = \frac{B_{gem,1}}{B_{\max,1}} \qquad (9)$$

zodat vergelijking (8) over gaat in de op ervaring gebaseerde vergelijking van Rusck (2):

$$g_n = g_\infty + (1 - g_\infty)\frac{1}{\sqrt{n}}$$

Hieruit kunnen we concluderen dat de belasting zich op een bepaald tijdstip laat beschrijven door een normaal verdeelde stochastische variabele. Dat is een belangrijke conclusie, omdat de methode van rekenen met stochastische belastingen gebaseerd wordt op het gebruik van normaal verdeelde stochastische belastingen.

4 IMPLEMENTATIE

Het gedrag van de belasting op een zeker tijdstip kan beschreven worden met een normaal verdeelde stochastische variabele met een gemiddelde waarde (μ) en een spreiding (σ). Het model van de belasting wordt gecompleteerd door de gemiddelde waarde en de spreiding weer te geven als functies van de tijd. Hiermee is het gedrag van de belasting voor iedere gewenste periode beschreven door een profiel van stochastisch normale verdelingen, gekenmerkt door de tijdfuncties voor de gemiddelden $\mu(t)$ en voor de spreidingen $\sigma(t)$.

Deze modellering gaat op voor gelijksoortige belastingen. Dit was immers ook bij de formule van Rusck een uitgangspunt. Andere typen belastingen moeten separaat gemodelleerd worden, met ieder hun eigen tijdfuncties. Bij gemengde belastingen moet gewerkt worden met combinaties van de separate tijdfuncties. Bijzondere belastingen, zoals zware industrie, landbouwbedrijven en elektrische tractie, alsmede decentrale opwekkers blijven bijzondere aandacht vragen en kunnen niet met deze methode gemodelleerd worden.

Een aspect als groei van de belasting kan eenvoudig worden meegenomen in de patronen van de gemiddelden. De spreiding moet wel altijd in de pas blijven met de gemiddelde waarde. Hulpmiddel hiervoor is de constante C uit vergelijking (3). Bij groei van de belasting, zonder dat het aantal aansluitingen toeneemt, moet de spreiding evenredig toenemen. Bij toenemend aantal aansluitingen, echter, neemt de spreiding relatief af (conform vergelijkingen 4 en 5).

Naar eigen keuze kunnen de patronen voor de gemiddelden en spreidingen geïnterpreteerd worden. Met een waarde voor de constante C uit vergelijking (3) gelijk aan 1 wordt de maximale waarde van de belasting bepaald door $\mu+1*\sigma$. Door eigenschappen van de normale verdeling zal het werkelijke maximum zich met ongeveer 85% zekerheid onder deze $\mu+1*\sigma$ waarde bevinden. Indien de constante C gelijk genomen wordt aan 2, zal het werkelijke maximum zich met ongeveer 97,5% zekerheid onder deze $\mu+2*\sigma$ waarde bevinden.

Voor het plannen wordt gebruik gemaakt van gemiddelde patronen met een relatief kleine spreiding. Terugrekenend naar enkelvoudige verbruikers verandert de vorm van het gemiddelde patroon niet, maar wordt de bijbehorende spreiding relatief groter. Deze methode houdt geen rekening met individuele extreme uitschieters. In dat geval zou namelijk de oude methode van rekenen met maximale waarden beter van pas komen.

5 CONCLUSIE

Een onderzoek is uitgevoerd naar beschrijving van de belasting met een stochastisch model. Hiertoe zijn de eigenschappen van een belasting op stochastisch gebied onderzocht.

Een eenvoudig experiment toont aan dat met een steekproef van een beperkt aantal belastingen de verdeling niet zuiver normaal is. Pas bij een groter aantal metingen zal de kansverdeling naar een normaal verdeelde functie tenderen. Dit wordt onderschreven door de Centrale Limietstelling voor onafhankelijke stochastische variabelen.

De op ervaring gebaseerde formule van Rusck is afgeleid met behulp van de theorie van de stochastische signalen. Hieruit blijkt dat de belasting zich voor een specifiek tijdstip laat beschrijven door een normaal verdeelde stochastische variabele.

Het gedrag van de belasting kan beschreven worden met tijdfuncties van gemiddelde waarde m(t) en spreiding s(t). Deze modellering gaat op voor gelijksoortige belastingen. Bijzondere belastingen, zoals zware industrie, landbouwbedrijven en elektrische tractie, alsmede decentrale opwekkers blijven bijzondere aandacht vragen en kunnen niet met deze methode gemodelleerd worden.

LITERATUUR

EnergieNed, 1996: EnergieNed: "Elektriciteitsdistributienetten", Kluwer Techniek, 1996

RWTH, 2000: K. Engels: "Probabilistische Bewertung der Spannungsqualität in Verteilungsnetzen", Aachener Beiträge zur EnergieVersorgung (ABEV) Band 72, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft Forschungsgesellschaft Energie an der RWTH Aachen, 2000

CIRED, 1993: Livik, K. et al.: "Estimation of annual coincident peak demand and load curves based on statistical analysis and typical load data", CIRED: 12th Int. Conference on Electricity Distribution, Part 1 Contributions, IEE Conference Publication No: 373, Short run Press, Exeter, 1993.

BIJLAGE: THEORIE STOCHASTISCHE SIGNALEN

Een stochastische variabele wordt aangegeven met behulp van een onderstreping. Een specifieke waarde, die de stochastische variabele kan aannemen, wordt aangegeven met behulp van een index.

$\underline{x}$: stochastische variabele

x_i : specifieke waarde van $\underline{x}$

In het vervolg gaan we ervan uit dat de kansen van optreden van de individuele waarden van $\underline{x}$ gelijk zijn. De verwachting van $\underline{x}$ is dan gelijk aan de gemiddelde waarde en wordt gegeven door:

$$E\underline{x} = \mu_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

De variantie is gedefinieerd als de verwachting van het kwadraat van de afwijking ten opzichte van het gemiddelde en wordt gegeven door:

$$\mathrm{var}(\underline{x}) = E(\underline{x}-\mu_x)^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu_x)^2$$

De spreiding, ook wel standaardafwijking of standaarddeviatie genoemd, is gedefinieerd als de wortel van de variantie:

$$\sigma_x = \sqrt{\mathrm{var}(\underline{x})}$$

Aan de hand van de definities zijn onderstaande rekenregels af te leiden:

$$E(a\underline{x}+b) = aE(\underline{x})+b$$

$$E(g(\underline{x})+h(\underline{x})) = E(g(\underline{x}))+E(h(\underline{x}))$$

$$\mathrm{var}(\underline{x}) = E(\underline{x}^2)-(E(\underline{x}))^2$$

Onderstaande afbeelding illustreert een normale kansverdeling voor een stochastisch signaal met gemiddelde 3 en spreiding 1.