



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Flitsonderzoek flexibiliteitsmaatregelen

In opdracht van het ministerie van Klimaat en Groene Groei

RAPPORT

Flitsonderzoek flexibiliteitsmaatregelen

Mogelijkheden voor bedrijven en instellingen om meer
flexibiliteit en regelbaar vermogen te realiseren achter
de meter

Klant: RVO

Referentie: FBSDE24069

Status: Definitief/v1.1

Datum: 13 december 2024

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX Amersfoort
Netherlands
Mobility & Infrastructure
Trade register number: 56515154

Telefoon: +31 88 348 20 00
Fax: +31 33 463 36 52
Email: info@rhdhv.com
Website: royalhaskoningdhv.com

Titel document:	Flitsonderzoek flexibiliteitsmaatregelen
Sub titel:	Mogelijkheden voor bedrijven en instellingen om meer flexibiliteit en regelbaar vermogen te realiseren achter de meter
Referentie:	FBSDE24069
Status:	Definitief/v1.1
Datum:	13 december 2024
Projectnaam:	Flitsonderzoek flexibiliteitsmaatregelen
Projectnummer:	BK3303
Auteur(s):	Smart Urban Environment
Opgesteld door:	Smart Urban Environment
Classificatie:	Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Uw vraag	1
1.3	Ons aanbod	2
1.4	Begrippenlijst	2
2	Technische maatregelen	4
2.1	Algemeen	4
2.2	Verkenning beschikbare technieken	4
2.3	Toepassingsmogelijkheden technieken	5
2.4	Kosteninschatting per techniek	14
3	Kosteninschatting BTM-batterijen	17
3.1	Algemeen	17
3.2	Batterij-formaten	17
3.3	Kostenraming	18
4	Conclusies en aanbevelingen	20

Tabellen

Tabel 1.1: Begrippenlijst	2
Tabel 2: Kosteninschatting per techniek	14
Tabel 3.1: Overzicht van gekozen zes batterij-formaten op basis van inventarisatie	17
Tabel 3.2: Gemiddelde totale investerings- en installatiekosten voor gehele systeem	19

Figuren

Figuur 2.1: Voorbeeld laad- en ontladprofiel batterij systeem	7
Figuur 2.2: Voorbeeld EMS laden en ontladen	9
Figuur 3.1: Verdeling van batterijen achter de meter naar vermogen en C-rating	17
Figuur 3.2: Prijsrend batterijen van 2013-2023 (BNEF Lithium-Ion Battery Price Survey 2023)	18

Bijlagen

Bijlage A: Factsheets

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Netcongestie is een steeds groter probleem in Nederland op steeds meer locaties. Netcongestie zorgt ervoor dat bedrijven en instellingen de netaansluiting niet meer kunnen verzwaren of verkrijgen. Indirect stagneert dit de groei en uitbreidingsmogelijkheden van deze ondernemingen. In de markt zijn verschillende flexibiliteitsmaatregelen aanwezig die een onderneming kan treffen om te groeien in een congestiegebied.

Een flexibiliteitsmaatregel is een maatregel die de flexibele capaciteit van het elektriciteitsverbruik van een aangeslotene vergroot en hiermee de mogelijkheid van de aangeslotene om het eigen elektriciteitsprofiel te beïnvloeden (verschuiving van verbruik of verlaging van pieken). Sommige maatregelen richten zich op contractuele oplossingen. Dit onderzoek richt zich op technische oplossingen die een onderneming kan treffen om afnamecongestie te verzachten.

In oktober 2023 heeft het lid Erkens in de Tweede Kamer een amendement gewijzigd¹, waarmee de begrotingsstaat van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat voor 2024 wordt vastgesteld (Kamerdossier 36410-XIII-20). Met dit amendement willen indieners € 55 miljoen vrijmaken om in 2024 te beginnen met het snel vrijspelen van ruimte op het stroomnet. Dit geld kan ingezet worden op de volgende drie sporen: (1) Het ondersteunen van het verlichten van netcongestie op bedrijventerreinen; (2) Het opzetten van een competitie voor innovatieve oplossingen voor netcongestie; en (3) Het inrichten van een subsidie om de onrendabele top voor flexcapaciteit te kunnen subsidiëren.

Ten tijde van het demissionaire kabinet Rutte IV is de amendementswijziging door een meerderheid van de Tweede Kamer (met 111 stemmen) goedgekeurd. Het nieuwe kabinet dient uiteindelijk te besluiten of de overheid dit structureel gaat uitvoeren.

1.2 Uw vraag

Bij het bekendmaken van het hoofdlijnenakkoord heeft het nieuwe kabinet Schoof op Prinsjesdag 2024 de rijksbegroting voor 2025 vastgesteld. Het Ministerie voor Klimaat en Groene Groei heeft in haar begroting het gewijzigde amendement-Erkens opgenomen.² Vanuit het ministerie is hier opvolging aan gegeven en de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (hierna: RVO) heeft vervolgens Royal HaskoningDHV (hierna: RHDHV) gevraagd een flitsonderzoek uit te voeren naar de flexibiliteitsmaatregelen achter de meter om netcongestie te verzachten voor bedrijven en instellingen.

Het onderzoek dient twee onderzoeksvragen te beantwoorden, waarbij onderzoeksvraag één meer algemeen van aard is en onderzoeksvraag twee dieper op een technische oplossing inzoomt. De onderzoeksvragen luiden als volgt:

- Onderzoeksvraag 1: Welke technische maatregelen en/of assets kan een onderneming treffen om het energieverbruik op een flexibele manier in te zetten en wat zijn de geschatte investeringskosten en installatiekosten van deze maatregelen?
- Onderzoeksvraag 2: Wat zijn de investeringskosten en installatiekosten van BTM-batterijen met een vermogen tussen de 500 kW en 5 MW?

Hierbij heeft u aangegeven dat er niet zozeer gefocust dient te worden op maatregelen die fungeren als congestieverzachtters, maar dat de nadruk dient te liggen op maatregelen die zorgen voor meer

¹ Tweede Kamer, Vergaderjaar 2023–2024, 36 410 XIII, nr. 20

² Tweede Kamer, Vaststelling van de begrotingsstaten van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (XXIII) voor 2025

flexibiliteit en regelbaar vermogen achter de meter. Dit dient te worden bereikt door middel van de inzet van duurzame assets zonder extra output van fossiele brandstoffen.

1.3 Ons aanbod

Vanuit RHDHV hebben wij vervolgens een offerte opgesteld, waarbij we een gefaseerde aanpak voorstellen. Met deze aanpak wordt allereerst in kaart gebracht welke technische maatregelen er zijn, die bedrijven kunnen inzetten om flexibel met hun energieverbruik om te gaan. Ook wordt er stil gestaan bij de effectiviteit van deze maatregelen en wordt er een kosteninschatting gemaakt. Op basis hiervan wordt inzichtelijk wat de (financiële) haalbaarheid van betreffende techniek is.

In het hierop volgende hoofdstuk wordt ingezoomd op de technische uitwerking van ‘*behind the meter*’-batterijen (hierna: BTM-batterijen). Hier wordt allereerst stilgestaan bij wat voor mogelijkheden er momenteel in de markt zijn en hoe de kostenraming eruit ziet van een zestal verschillende batterijformaten. Om hier een actueel beeld te geven in de snel veranderende wereld van batterijen wordt deze kostenraming geïntroduceerd bij een viertal verschillende batterijleveranciers.

1.4 Begrippenlijst

Voordat wordt begonnen met het flitsonderzoek wordt hier nog stilgestaan bij enkele begrippen, die in de hierop volgende hoofdstukken aan bod komen. Hierdoor wordt niet alleen de leesbaarheid bevordert, maar wordt ook geborgd dat er eenduidigheid bestaat over wat onder deze begrippen wordt verstaan.

Vanuit de onderzoeksvraag wordt allereerst stilgestaan bij wat er wordt verstaan onder *flexibiliteit*, *regelbaar vermogen* en *achter de meter*. Een begrip dat in het verlengde hiervan logischerwijs veelvuldig aan bod komt is *netcongestie*, waarbij twee soorten worden onderscheiden, te weten: (1) *afnamecongestie* en (2) *invoedingscongestie*. Verder wordt aangaande de beschikbare technieken stilgestaan bij de *effectiviteit* van de maatregelen en ten slotte wordt rondom de BTM-batterijen het begrip *C-rating* geïntroduceerd en betreffende de kostenraming wordt er onderscheid gemaakt in *investerings*-, *aanschaf*- en *installatiekosten*. Deze begrippen worden in tabel Tabel 1.1: Begrippenlijst omschreven.

Tabel 1.1: Begrippenlijst

Begrip	Omschrijving
Aanschafkosten	Eenmalige kosten voor de aanschaf van de benodigde apparatuur en materialen van een technische maatregel.
‘Achter de meter’	(Engels: behind the meter) Aanduiding waarmee wordt bedoeld dat het geduide zich fysiek achter de netaansluiting van een bedrijf bevindt.
Afnamecongestie	Vorm van netcongestie waarbij de vraag van elektriciteit de capaciteit van het elektriciteitsnet overschrijdt.
C-rating	De verhouding tussen het vermogen en de energieopslag van een batterij om de ontladingsduur weer te geven. Gedefinieerd als vermogen gedeeld door opslagcapaciteit, met eenheid uur ⁻¹ .
Effectiviteit	De mate waarin technieken erin slagen om de belasting op het elektriciteitsnet te verminderen en zo de congestie te verlichten.
Flexibiliteit	Het vermogen om te gaan met variabiliteit van - en onzekerheid over opwek, vraag en transport van elektriciteit binnen de grenzen van de belastbaarheid van het elektriciteitsnetwerk. ³

³ Flexibiliteit in het elektriciteitssysteem, door TNO 2023 P11051, in opdracht van Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Begrip	Omschrijving
Installatiekosten	Eenmalige kosten bestaande uit ontwerp-, project- en plaatsingskosten van een technische maatregel.
Investeringskosten	Eenmalige totale kosten bestaande uit de aanschafkosten en installatiekosten van een technische maatregel.
Invoedingscongestie	Vorm van netcongestie waarbij het aanbod van elektriciteit de capaciteit van het elektriciteitsnet overschrijdt.
Netcongestie	Versijnsel waarbij de vraag of het aanbod van elektriciteit de capaciteit van het elektriciteitsnet overschrijdt.
Regelbaar vermogen	Vermogen van aangeslotenen dat elektronisch aangestuurd kan worden om te voorkomen dat het elektriciteitsnet overbelast wordt.

2 Technische maatregelen

2.1 Algemeen

Vandaag de dag lopen veel bedrijven en instellingen tegen de beperkingen aan van het elektriciteitsnet aan. Daar waar de vraag naar extra vermogen jarenlang geen probleem was, is het dat tegenwoordig wel. Met de ondertekening van het Klimaatakkoord van Parijs in 2016 hebben 195 landen een internationaal verdrag gesloten om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder de 2°C in 2050. Ten gevolge hiervan wordt het gebruik van fossiele brandstof waar mogelijk teruggedrongen en vervangen door meer duurzame vormen van energie opwek. Door het elektrificeren van huishoudens, bedrijfsprocessen en mobiliteit neemt eveneens de vraag naar elektriciteit toe. Echter is het Nederlandse elektriciteitsnet hier niet op voorbereid, waardoor het net 'vol' zit en er beperkt ruimte is voor bedrijven en instellingen om extra vermogen aan te vragen bij de netbeheerders.

Om bovengenoemde redenen zijn bedrijven en instellingen op zoek naar alternatieve manieren om aan hun energievraag te kunnen voldoen. In dit hoofdstuk wordt daarom geïnventariseerd wat de technische maatregelen (of technieken) zijn die ingezet kunnen worden om flexibel met het energieverbruik om te gaan en regelbaar vermogen te realiseren. Dit begint met een onderzoek naar de beschikbare technieken, waarna deze opties worden geanalyseerd om te bepalen hoe ze het best toegepast kunnen worden in verschillende omstandigheden. Ook worden de technieken beoordeeld op realisme, haalbaarheid en effectiviteit en wordt er een kostenschatting gegeven.

2.2 Verkenning beschikbare technieken

Zoals eerder gesteld wordt in deze verkenning onderzocht welke beschikbare technieken er zijn om flexibiliteit en regelbaar vermogen van bedrijven en instellingen te vergroten. Tevens wordt ook stilgestaan bij de wijze waarop deze technieken van invloed zijn op de netcongestie. Hierbij komen de volgende technieken aan bod:

1. Batterij systemen
2. Curtailment
3. Directe lijn
4. Energie Management Systeem
5. Flexibele opwek
6. Frequentieregelaars
7. Smart Feedback
8. Warmtepompen, E-boilers en warmteopslag

Deze technieken bieden gezamenlijk een breed scala aan mogelijkheden om in flexibiliteit en regelbaar vermogen te voorzien en netcongestie het hoofd te bieden. Zo kan een betrouwbare energievoorziening worden gewaarborgd. In bijlage A is een visuele weergave van elke techniek terug te vinden in de vorm van een factsheet. Onder de genoemde technieken zijn er enkelen die het effect van peak-shaving hebben. Peak-shaving is op zichzelf echter niet een techniek, maar het gevolg van een technische maatregel. Het is een verzamelnaam voor systemen die zijn ontworpen om piekbelasting te verminderen door tijdelijk energie op te slaan en op een later moment te gebruiken. Dit helpt om de belasting op het net te spreiden en piekbelasting te voorkomen.

Een kanttekening die geplaatst moet worden bij peak-shavers is dat het spreiden van piekbelasting op het elektriciteitsnet kan leiden tot afnamecongestie op andere momenten van de dag. Wanneer de energieconsumptie wordt verschoven naar perioden met normaal gesproken lagere vraag, kan dit onverhoopt pieken veroorzaken in de energieafname. Deze kunnen daarom alleen worden ingezet wanneer de infrastructuur het verplaatsen van deze pieken aankan. Indien dit niet het geval is kan dit negatieve gevolgen hebben op de stabiliteit en efficiëntie van het elektriciteitsnet.

2.3 Toepassingsmogelijkheden technieken

In de context van netcongestie op bedrijventerreinen verwijzen toepassingsmogelijkheden naar de verschillende manieren waarop innovatieve technieken kunnen worden ingezet om de druk op het elektriciteitsnet te verminderen en de efficiëntie van de energievoorziening te verbeteren. Deze verkenning richt zich op een reeks technieken die elk unieke voordelen en toepassingen bieden. De technieken maken onderscheid tussen afname- en invoedingscongestie.

1. Batterij systemen

Batterijsystemen spelen een cruciale rol voor bedrijven bij het aanpakken van netcongestie door overtollige energie op te slaan en deze te gebruiken tijdens piekuren. Dit helpt om de belasting op het elektriciteitsnet te verminderen en zorgt voor een stabielere energievoorziening.

Batterijen genereren elektriciteit door een chemische reactie tussen de materialen van de anode (negatieve elektrode) en de kathode (positieve elektrode). Deze reactie produceert vrije elektronen (e^-), die via een externe ladingbaan (zoals een draad) van de anode naar de kathode stromen wanneer de batterij is aangesloten op een circuit. Een elektrolyt, dat ionen bevat, scheidt de anode en de kathode en maakt de reactie tussen hen mogelijk. Dit elektrolyt kan vloeibaar, vast of gelachtig zijn. Wanneer de batterij is aangesloten op een elektrisch circuit, creëert deze een spanningsverschil (V) tussen de twee uiteinden van het circuit, wat de elektronen dwingt om van de negatieve pool (anode) naar de positieve pool (kathode) te bewegen door de externe draad. Deze elektronenstroom wordt elektrische stroom (I) genoemd en wordt gemeten in ampère (A). Hier is een overzicht van hoe verschillende batterijtypen werken en hun specifieke voor- en nadelen voor bedrijven:

- **Lithium-ion batterijen:** Deze batterijen hebben een hoge energiedichtheid en zijn populair in industriële toepassingen en elektrische voertuigen. Ze werken door lithiumionen tussen de anode en de kathode te verplaatsen via een elektrolyt. Voor bedrijven kunnen lithium-ion batterijen helpen om piekbelasting te verminderen door overtollige energie op te slaan en deze tijdens piekuren te gebruiken. Dit kan leiden tot aanzienlijke kostenbesparingen en een stabielere energievoorziening. Wel zijn deze batterijen relatief duur in vergelijking met andere batterijtypen. Ze hebben een beperkte levensduur en verliezen capaciteit na verloop van tijd. Ook is er een risico op thermische run-away, wat kan leiden tot brand of explosies. Daarnaast kan de productie en recycling van lithium-ion batterijen milieuschadelijk zijn.
- **IJzer-lucht batterijen:** Deze batterijen gebruiken ijzer en lucht als reactanten. Tijdens het opladen wordt ijzeroxide gereduceerd tot ijzer, en tijdens het ontladen reageert ijzer met zuurstof om ijzeroxide te vormen, waarbij elektriciteit wordt vrijgegeven. Ze zijn kosteneffectief en veilig, ideaal voor grootschalige energieopslag. Voor bedrijven kunnen ijzer-lucht batterijen grote hoeveelheden energie opslaan en helpen om piekbelasting te verminderen, wat bijdraagt aan een stabiel elektriciteitsnet. In vergelijking met lithium-ion batterijen heeft deze batterij een lagere energie-efficiëntie, wat betekent dat er meer energie verloren gaat tijdens laad- en ontladcycli. Verder is deze wijze van energieopslag groter in omvang en gewicht dan andere systemen en hebben ze een kortere cyclische levensduur. Tot slot is hier sprake van een tragere reactietijd, wat ze minder geschikt maakt voor flexibele inzetbaarheid.
- **Zoutwater batterijen:** Deze batterijen gebruiken een elektrolyt van zout en water. Ze zijn milieuvriendelijk en veilig, met een lange levensduur. Ze slaan overtollige energie op en gebruiken deze tijdens piekuren, waardoor de belasting op het elektriciteitsnet wordt verminderd. Voor bedrijven bieden zoutwaterbatterijen een duurzame en veilige manier om energie op te slaan en piekbelasting te verminderen, wat helpt om netcongestie te voorkomen. Aan de andere kant hebben zoutwater batterijen een lage energiedichtheid, wat betekent dat ze meer ruimte innemen om dezelfde hoeveelheid energie op te slaan als lithium-ion batterijen. Hoewel ze milieuvriendelijk zijn, zijn de kosten momenteel hoger dan lithium-ion batterijen. Ook zijn ze minder geschikt voor hoge laad- en ontladstromen. Sommige zoutwater batterijen moeten op een constante hoge temperatuur worden gehouden om te functioneren.

Andere batterij systemen die gebruikt kunnen worden zijn:

- **Absorbent Glass Mat Lead Acid (AGM):** AGM-batterijen zijn een type loodzuur batterijen waarbij de elektrolyt wordt geabsorbeerd in een glasvezelmat. Dit ontwerp maakt ze minder gevoelig voor lekkages en onderhoudsvrij. Ze worden vaak gebruikt in toepassingen waar betrouwbaarheid en kosten een belangrijke rol spelen, zoals in noodstroomvoorzieningen, voertuigen en zonne-energiesystemen. Hoewel ze een lagere energiedichtheid hebben in vergelijking met lithium-ion batterijen, zijn ze robuust en relatief goedkoop.
- **Vanadium Redox Flow Battery (VRFB):** VRFB's zijn een type flowbatterij die vanadiumionen in verschillende oxidatietoestanden gebruikt om chemische energie op te slaan. Deze batterijen zijn bijzonder geschikt voor grootschalige energieopslag vanwege hun lange levensduur en de mogelijkheid om grote hoeveelheden energie op te slaan. Ze worden vaak gebruikt in utiliteitssectoren, zoals bij energiecentrales en netstabilisatie. Een van de voordelen van VRFB's is dat ze een bijna onbeperkte cyclische levensduur hebben, wat betekent dat ze vele malen kunnen worden opgeladen en ontladen zonder significant capaciteitsverlies.
- **Supercondensatoren:** Supercondensatoren, ook wel ultracondensatoren genoemd, zijn energieopslagapparaten die een zeer hoge vermogensdichtheid en snelle laadtijden bieden. Hoewel ze een lagere energiedichtheid hebben dan lithium batterijen, kunnen ze zeer snel grote hoeveelheden energie afgeven en weer opladen. Dit maakt ze ideaal voor toepassingen waar snelle energieafgifte vereist is, zoals in elektrische voertuigen, regeneratieve remsystemen en noodstroomvoorzieningen. Supercondensatoren hebben ook een lange levensduur en kunnen miljoenen laad- en ontladcycli doorstaan.

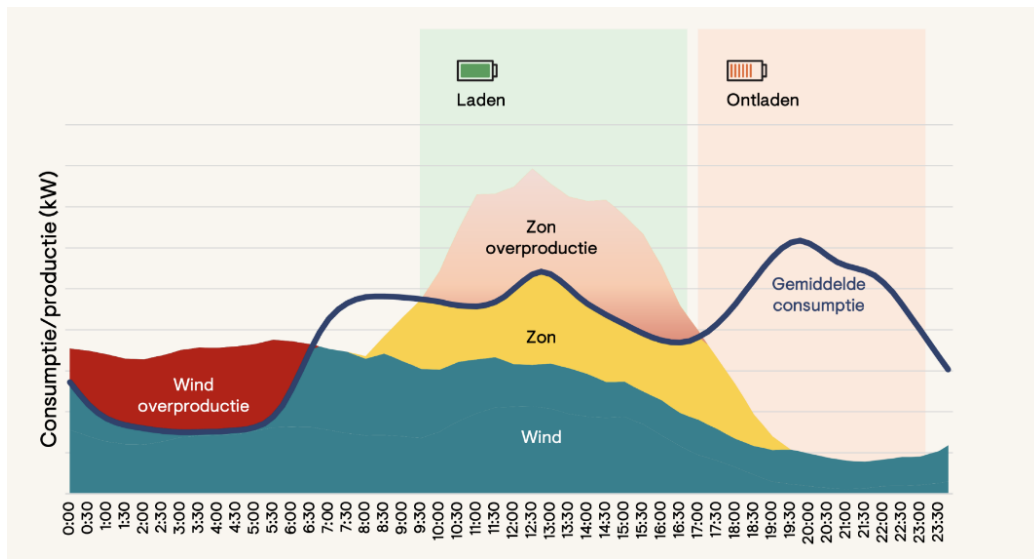
Batterijssystemen kunnen doorbedrijven worden geïntegreerd met hun bestaande energie-infrastructuur om de efficiëntie daarvan te verhogen, bijvoorbeeld:

- **Opslag van overtollige energie:** Bedrijven kunnen overtollige energie van zonne- of windparken opslaan in batterijen en deze energie gebruiken tijdens piekuren, waardoor de belasting op het net wordt verminderd.
- **Kostenbesparing:** Door piekbelastingen te verminderen, kunnen bedrijven besparen op energiekosten en boetes voor overmatig energieverbruik tijdens piekuren.
- **Verbeterde energiezuikerheid:** Batterijssystemen zorgen ervoor dat er altijd voldoende energie beschikbaar is, zelfs tijdens periodes van hoge vraag of lage energieproductie of stroomuitval. Om stroomuitval tegen te gaan is een Uninterrupted Power Supply (UPS) van belang. UPS-systemen worden vaak gebruikt in omgevingen waar een ononderbroken stroomvoorziening cruciaal is, zoals in datacenters, ziekenhuizen en industriële installaties. Ze kunnen ook worden gebruikt om gevoelige apparatuur te beschermen tegen spanningspieken en -dalen.

Regelbaar vermogen en flexibiliteit van batterijssystemen bestaat uit het snel te reageren op veranderingen in vraag en aanbod van elektriciteit. Dit betekent dat bedrijven hun energieverbruik kunnen aanpassen aan de beschikbaarheid van energie, bijvoorbeeld door batterijen op te laden wanneer er een overschot aan energie is en deze energie te gebruiken tijdens piekuren. Dit helpt niet alleen om de belasting op het elektriciteitsnet te verminderen, maar biedt ook flexibiliteit in het energiebeheer, waardoor bedrijven beter kunnen inspelen op fluctuaties in de energieprijzen en -vraag.

Wanneer er al sprake is van invoedingscongestie, is de elektriciteitsprijs vaak laag vanwege een overschot aan energie. In deze situatie is het logisch om gebruik te maken van de elektriciteitsmarkt om batterijen op te laden. Dit creëert echter extra vraag naar elektriciteit, wat de bestaande netcongestie kan verergeren. Door de verhoogde vraag wordt de druk op het elektriciteitsnet nog groter, wat kan leiden tot verdere overbelasting en inefficiënties in het systeem. Deze vorm van netcongestie wordt afnamecongestie genoemd.

In figuur 2.1 is zichtbaar dat de batterij opgeladen wordt, wanneer de zon overproductie begint. De ontladingsfase is wanneer de vraag groter is dan de opwekking. De prijs die bespaart is, is de dan geldende marktprijs.



Figuur 2.1: Voorbeeld laad- en ontladprofiel batterij systeem

2. Curtailment

Curtailment is een techniek waarbij de productie van groene stroom, zoals wind- en zonne-energie, tijdelijk wordt verminderd wanneer er meer stroom wordt opgewekt dan nodig is. Dit voorkomt dat het elektriciteitsnet overbelast raakt. Curtailment houdt in dat de opwek van een zonne- of windpark gedeeltelijk of volledig wordt ingeperkt tijdens piekmomenten. Dit helpt om de hoeveelheid elektriciteit die aan het net wordt toegevoegd te verlagen en zo het elektriciteitsnet in balans te brengen en invoedingscongestie te verminderen. Voor bedrijven biedt het gebruik van curtailment verschillende voordelen:

- **Voorkomen van netcongestie:** Door de productie van elektriciteit te verminderen tijdens piekmomenten, wordt voorkomen dat het elektriciteitsnet overbelast raakt.
- **Negatieve elektriciteitsprijzen vermijden:** Bij een overschot aan groene energie kunnen negatieve elektriciteitsprijzen ontstaan. Curtailment helpt dit te voorkomen, waardoor bedrijven geen geld hoeven te betalen om elektriciteit aan het net te leveren.
- **Financieel voordeel:** Door op het juiste moment af te schakelen, kunnen bedrijven extra inkomsten genereren op de elektriciteitsmarkten.
- **Voldoen aan regelgeving:** Curtailment kan helpen om te voldoen aan regelgeving zoals de SDE++ subsidie, die eisen stelt aan de productie van elektriciteit tijdens negatieve prijzen.

Curtailment werkt door de productie van groene stroom, zoals wind- en zonne-energie, tijdelijk te verminderen wanneer er meer stroom wordt opgewekt dan nodig is. Dit helpt om overbelasting van het elektriciteitsnet te voorkomen. Bedrijven kunnen hun energieopwekkingsinstallaties monitoren en de productie aanpassen aan de vraag, waardoor ze flexibel kunnen reageren op piekmomenten en bijdragen aan een stabiel elektriciteitsnet. Door het regelbaar vermogen van hun installaties te benutten, kunnen bedrijven snel inspelen op veranderingen in de vraag en het aanbod van elektriciteit, wat zorgt voor een efficiënter en betrouwbaarder energiebeheer.

3. Directe lijn

Als een bedrijf direct gekoppeld is aan een wind- en/of zonnepark achter de meter dan heet het een directe lijn. Deze techniek heeft ook raakvlakken met 'cable pooling', waarbij meerdere energieopwekkingsinstallaties, zoals zonneparken en windparken, gebruik maken van één enkele kabel of aansluiting. Dit is mogelijk omdat de productiepatronen van zon en wind vaak complementair zijn: als de zon schijnt, waait het meestal niet, en als het waait, is het vaak bewolkt. Dit betekent dat de capaciteit van de bestaande kabels en aansluitingen optimaal wordt benut zonder dat er extra infrastructuur nodig is.

Hierdoor kan meer duurzame energie worden opgewekt en getransporteerd zonder dat het elektriciteitsnet overbelast raakt. Voor bedrijven biedt een directe lijn verschillende voordelen:

- **Kostenbesparing:** Door gebruik te maken van bestaande kabels en aansluitingen, hoeven bedrijven niet te investeren in nieuwe infrastructuur.
- **Efficiëntie:** Bedrijven kunnen hun energieopwekking optimaliseren door de complementaire aard van zon- en windenergie te benutten.
- **Snellere Implementatie:** Het delen van aansluitingen kan de wachttijd voor nieuwe of zwaardere aansluitingen verkorten, wat vooral belangrijk is in gebieden met netcongestie.
- **Flexibiliteit:** Bedrijven kunnen flexibeler omgaan met hun energieverbruik en -opwekking, wat bijdraagt aan een stabiel elektriciteitsnet. Deze flexibiliteit wordt aangeboden door het op en afschalen van de productie van de parken. Dit regelbaar vermogen helpt om minder elektriciteit het net op te laten komen.

Een mogelijk nadeel dat kan optreden is invoedingscongestie. Dit gebeurt wanneer de vraag naar energie kleiner is dan de opwekking, waardoor er te veel energie wordt ingevoerd in het elektriciteitsnet en de capaciteit van het net wordt overschreden.

In de praktijk betekent dit dat bedrijven die dicht bij elkaar liggen en verschillende soorten duurzame energie opwekken, zoals een zonnepark en een windpark, hun opwekkingsinstallaties kunnen koppelen aan één aansluiting. Dit maakt het mogelijk om de beschikbare capaciteit beter te benutten en minder elektriciteit te vragen van het net.

4. Energie Management Systeem

Een Energie Management Systeem (hierna: EMS) is een combinatie van hardware en software die bedrijven helpt om hun energieverbruik te beheren, te controleren en te optimaliseren. Het systeem verzamelt en analyseert data over energiegebruik, waardoor het mogelijk wordt om beslissingen te nemen op basis van real-time informatie. Een EMS bestaat uit verschillende onderdelen die samen zorgen voor effectief energiebeheer:

- **Hardware:** Sensoren worden geïnstalleerd om realtime gegevens over energieverbruik te verzamelen. Deze sensoren meten bijvoorbeeld het verbruik van elektriciteit, gas en water. Bridges zorgen voor communicatie tussen de sensoren en het centrale systeem, vaak via een netwerk of internetverbinding.
- **Software:** De software verwerkt en analyseert de verzamelde gegevens om patronen en mogelijkheden voor energiebesparing te identificeren. Gebruikers kunnen het energieverbruik controleren en beheren via een centraal punt, zoals een online dashboard, dat inzichtelijke grafieken en rapporten biedt.

Voor bedrijven biedt het gebruik van een EMS verschillende voordelen:

- **Besparen op energiekosten:** Door het energieverbruik te optimaliseren, kunnen bedrijven aanzienlijk besparen op hun energierekening.
- **Verbeterde energie-efficiëntie:** Een EMS helpt bij het identificeren van inefficiënte energieverbruikspatronen en stelt gebruikers in staat om gerichte maatregelen te nemen om deze te verbeteren.

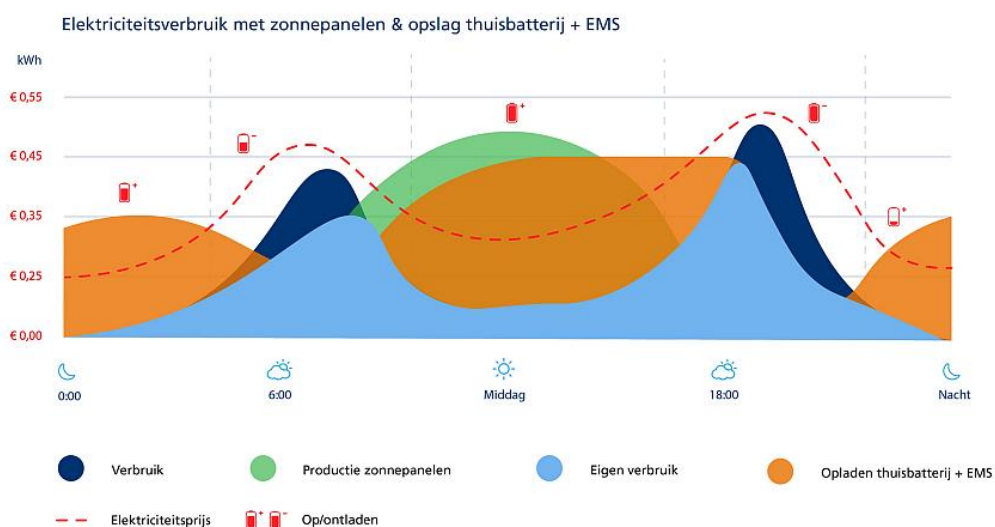
- **Voldoen aan regelgeving:** Een EMS helpt bedrijven gemakkelijker te voldoen aan regelgeving zoals de EED-auditverplichting en de Wet Milieubeheer.
- **Verhoogde zelfvoorziening:** Door zelf opgewekte energie efficiënt te beheren, kunnen bedrijven hun afhankelijkheid van het elektriciteitsnet verminderen.
- **Maatschappelijke verantwoordelijkheid:** Door het energieverbruik te verminderen, dragen bedrijven bij aan een duurzamere wereld, wat ook goed is voor het imago van het bedrijf.

In een EMS zijn regelbaar vermogen en flexibiliteit essentieel voor het optimaliseren van energiegebruik en -opwekking. Regelbaar vermogen stelt het EMS in staat om de output van energieopwekkingsinstallaties aan te passen aan de vraag, terwijl flexibiliteit het systeem de mogelijkheid biedt om snel te reageren op veranderingen in vraag en aanbod.

Een EMS kan in principe geen congestieveroorzaker zijn omdat het ontworpen is om energiestromen te optimaliseren en de belasting op het elektriciteitsnet te beheren. Door het energieverbruik te optimaliseren en vraag en aanbod beter op elkaar af te stemmen, helpt een EMS piekbelastingen te verminderen. Het systeem zorgt voor een betere balans in het net door realtime monitoring en aansturing van energieverbruikers en -opwekkers. Bovendien verbetert een EMS de integratie van duurzame energiebronnen en kan het snel reageren op veranderingen in de energievraag en -aanbod. Door preventieve maatregelen te nemen en flexibel in te spelen op fluctuaties, draagt een EMS bij aan een efficiënter en stabiel elektriciteitsnet, waardoor het geen bron van congestie is.

In de praktijk kunnen bedrijven een EMS integreren met hun bestaande energie-infrastructuur om de efficiëntie te verhogen en netcongestie te verminderen. Bijvoorbeeld, een bedrijf kan een EMS gebruiken om het energieverbruik van verschillende afdelingen te monitoren en te optimaliseren, waardoor piekbelastingen worden verminderd en de energiekosten worden verlaagd.

In figuur 2.2 is zichtbaar dat in het begin van de dag wanneer de elektriciteit goedkoop is (gestippelde rode lijn) en de batterij opgeladen wordt (oranje). Dit wordt aangestuurd door het EMS. Rond 06:00 uur is er verbruik (lichtblauw) en wordt het gedekt door de batterij, waardoor het totaal verbruik omhoog gaat (donkerblauw). Tijdens de middag is er productie van zonnepanelen (groen), waardoor de elektriciteitsprijs ook daalt. Dit is een ideaal moment om de batterij weer op te laden. Zo wordt het eigen verbruik gedekt en kan de batterij voordelig worden opgeladen. Rond 18:00 uur is er een piek in het eigen verbruik, wat gedekt kan worden door de batterij dankzij het opladen in de uren daarvoor. In de nacht laadt de batterij weer op, wanneer de elektriciteit relatief goedkoop is.



Figuur 2.2: Voorbeeld EMS laden en ontladen

5. Flexibele opwek

Flexibele opwekking, of “flex-opwek,” verwijst naar de mogelijkheid om de productie van energie aan te passen aan de vraag en de beschikbaarheid van energiebronnen. Dit betekent dat energieopwekkingsinstallaties, zoals zonneparken, windparken, biogasinstallaties, biodieselgeneratoren en waterstofsysteem, hun productie kunnen verhogen of verlagen afhankelijk van de omstandigheden.

Energieproducenten kunnen hun output verhogen wanneer de vraag naar energie hoog is en verlagen wanneer de vraag laag is, wat helpt om een stabiel elektriciteitsnet te behouden en piekbelastingen te verminderen. Flexibele opwekking maakt gebruik van verschillende energiebronnen die elkaar aanvullen, zoals zon en wind, en wanneer de ene bron minder produceert, kan de andere bron de productie verhogen om aan de vraag te voldoen.

Biogas- en biodieselinstallaties kunnen een belangrijke rol spelen in het verminderen van netcongestie voor bedrijven. Hier zijn enkele manieren waarop deze installaties kunnen bijdragen:

- **Duurzame back-up:** Biogas- en biodieselinstallaties kunnen snel worden ingeschakeld wanneer de vraag naar energie hoog is of wanneer er een tekort is aan zonne- en windenergie of als er sprake is van netcongestie. Dit zorgt ervoor dat bedrijven altijd toegang hebben tot voldoende energie, zonder dat ze afhankelijk zijn van het elektriciteitsnet. Door deze installaties als back-up te gebruiken, kunnen bedrijven piekbelastingen op het net vermijden.
- **Lokale energieproductie:** Door energie lokaal op te wekken met biogas- en biodieselinstallaties, verminderen bedrijven hun afhankelijkheid van het centrale elektriciteitsnet. Dit helpt om de belasting op het net te verlagen, vooral tijdens piekuren, en draagt bij aan een stabielere energievoorziening.
- **Flexibiliteit in energieverbruik:** Biogas- en biodieselinstallaties kunnen flexibel worden ingezet om energie te produceren wanneer dat nodig is. Dit betekent dat bedrijven hun energieverbruik kunnen afstemmen op de beschikbaarheid van energie, wat helpt om netcongestie te voorkomen. Bijvoorbeeld, tijdens periodes van hoge vraag kunnen deze installaties extra energie leveren, terwijl ze tijdens periodes van lage vraag minder actief zijn.

Een nadeel van bovengenoemde installaties is dat het slechts beperkt beschikbaar is vanwege de afhankelijkheid van organisch afvalmateriaal, wat niet altijd voldoende aanwezig is. Daarnaast zijn de initiële investeringskosten voor biogasinstallaties hoog, inclusief bouw- en onderhoudskosten. De productie-efficiëntie varieert en opschaling is uitdagend en kostbaar.

Biogas en biodiesel bieden echter geen opslag, daar zou waterstof wel een uitstekende oplossing voor zijn. Waterstof is een veelzijdige energiedrager die kan worden gebruikt om energie op te slaan en te transporteren. In de context van netcongestie biedt waterstof een innovatieve oplossing door overtollige duurzame energie om te zetten in waterstof, die later weer kan worden omgezet in elektriciteit wanneer de vraag hoog is. Waterstof wordt geproduceerd door middel van elektrolyse, een proces waarbij water (H_2O) wordt gesplitst in waterstof (H_2) en zuurstof (O_2) met behulp van elektriciteit. Wanneer er een overschot aan duurzame energie is, zoals van zonne- of windparken, kan deze energie worden gebruikt om waterstof te genereren. De geproduceerde waterstof kan worden opgeslagen en later worden omgezet in elektriciteit via brandstofcellen of verbranding, vooral tijdens periodes van hoge vraag of lage productie van hernieuwbare energie. Voor bedrijven biedt het gebruik van waterstof verschillende voordelen:

- **Opslag van overtollige energie:** Waterstof kan grote hoeveelheden overtollige energie opslaan, wat helpt om de belasting op het elektriciteitsnet te verminderen tijdens piekuren.
- **Flexibiliteit:** Waterstof kan worden gebruikt voor verschillende toepassingen, zoals elektriciteitsopwekking, verwarming en als brandstof voor voertuigen, wat bedrijven meer flexibiliteit geeft in hun energiebeheer.

- **Gebruik van bestaande infrastructuur:** Waterstof kan worden getransporteerd via bestaande aardgasnetwerken, wat de kosten en doorlooptijd voor infrastructuraanpassingen vermindert.
- **Duurzaamheid:** Groene waterstof, geproduceerd met hernieuwbare energie, is een CO₂-vrije brandstof, wat bijdraagt aan de vermindering van de CO₂-uitstoot en de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.

Waterstof wordt vaak gezien als een veelbelovende energiedrager voor de toekomst, maar het is momenteel te duur en niet geschikt voor handel op de elektriciteitsmarkt. De productie van waterstof vereist aanzienlijke hoeveelheden energie en tijd, waardoor het niet snel kan reageren op de fluctuaties in vraag en aanbod. Voor een efficiënte productie van waterstof zijn langere periodes van lage elektriciteitsstarieven nodig, wat niet altijd haalbaar is in een dynamische energiemarkt.

Hoewel de verkoop van elektriciteit snel kan plaatsvinden, is dit niet het primaire doel van waterstoftechnologie. Waterstof wordt voornamelijk geproduceerd voor langdurige opslag en gebruik in specifieke toepassingen zoals industriële processen en transport, waar directe verkoop van elektriciteit minder relevant is. Hierdoor is waterstof momenteel niet de meest geschikte technologie voor snelle handel op de elektriciteitsmarkt, waar flexibiliteit en snelle respons cruciaal zijn.

In de praktijk kunnen bedrijven waterstof integreren met hun bestaande energie-infrastructuur om de efficiëntie te verhogen en netcongestie te verminderen. Bijvoorbeeld, een bedrijf met een zonnepark kan overtollige zonne-energie gebruiken om waterstof te produceren tijdens periodes van lage vraag. Deze waterstof kan vervolgens worden opgeslagen en gebruikt om elektriciteit op te wekken tijdens piekuren, waardoor de belasting op het net wordt verminderd en de energiekosten worden verlaagd. Door deze technologie toe te passen, kunnen bedrijven niet alleen hun eigen energie-efficiëntie verbeteren, maar ook bijdragen aan een stabielere en betrouwbaardere elektriciteitsnet, wat essentieel is voor het voorkomen van netcongestie.

6. Frequentieregelaars

Frequentieregelaars, ook bekend als VFD's (Variable Frequency Drives), zijn apparaten die de snelheid en het koppel van elektromotoren regelen door de frequentie en spanning van de stroomtoevoer te variëren. Ze worden veel gebruikt in industriële toepassingen om de prestaties van motoren te optimaliseren en energie te besparen. Frequentieregelaars werken door de frequentie van de wisselstroom (AC) die naar de motor wordt gestuurd, te variëren. Dit wordt bereikt door de AC-stroom om te zetten in gelijkstroom (DC) en vervolgens weer terug naar AC met een variabele frequentie en spanning. Dit proces wordt uitgevoerd door een reeks elektronische componenten, waaronder:

- **Gelijkrichter:** Zet de inkomende AC-stroom om in DC-stroom.
- **DC-bus:** Slaat de DC-stroom tijdelijk op en filtert deze om een stabiele stroom te leveren.
- **Omvormer:** Zet de DC-stroom weer om in AC-stroom met een variabele frequentie en spanning, die vervolgens naar de motor wordt gestuurd.

Door de frequentie en spanning van de stroomtoevoer te variëren, kunnen frequentieregelaars de snelheid en het koppel van de motor nauwkeurig regelen. Dit is vooral nuttig voor toepassingen waarbij de snelheid van een motor moet worden aangepast aan de vraag, zoals bij pompen, ventilatoren en transportbanden. Frequentieregelaars bieden verschillende voordelen voor bedrijven:

- **Kostenbesparing:** Door het energieverbruik te optimaliseren, kunnen bedrijven hun energiekosten verlagen. Motoren draaien alleen op de snelheid die nodig is voor de huidige belasting, wat leidt tot aanzienlijke energiebesparingen.
- **Vermindering van piekbelasting:** Door de belasting op het elektriciteitsnet te verminderen tijdens piekuren, helpen frequentieregelaars om netcongestie te voorkomen. Dit draagt bij aan een stabielere en betrouwbaardere elektriciteitsnet.

- **Verbeterde procescontrole:** Bedrijven kunnen de prestaties van hun apparatuur verbeteren door de snelheid van motoren nauwkeurig te regelen. Dit leidt tot een hogere efficiëntie en productiviteit.
- **Verlengde levensduur van apparatuur:** Door motoren op een optimale snelheid te laten draaien, vermindert de slijtage, wat de levensduur van de apparatuur verlengt en onderhoudskosten verlaagt.

Frequentieregelaars bieden bedrijven de mogelijkheid om motoren langzamer te laten draaien tijdens piekuren en sneller tijdens daluren, wat bijdraagt aan een flexibeler energieverbruik. Dit regelbare vermogen zorgt ervoor dat bedrijven hun energieverbruik kunnen afstemmen op de beschikbaarheid van energie, wat leidt tot minder belasting van het elektriciteitsnet.

Door de snelheid van motoren aan te passen aan de vraag, kunnen bedrijven aanzienlijke energiebesparingen realiseren. Wanneer de vraag naar energie laag is, kunnen motoren langzamer draaien, waardoor minder energie wordt verbruikt en de belasting op het elektriciteitsnet tijdens piekuren vermindert. Omgekeerd kunnen motoren sneller draaien wanneer de vraag hoog is of wanneer er een overschot aan duurzame energie beschikbaar is, zoals op zonnige of winderige dagen. Dit helpt om de beschikbare energie optimaal te benutten en de efficiëntie van het productieproces te verhogen.

Frequentieregelaars zijn geen congestievoororzakers, omdat ze specifiek zijn ontworpen om de frequentie van de stroomtoevoer te reguleren en te stabiliseren, niet om de hoeveelheid energie die door het net stroomt te verhogen. Door frequentieregelaars toe te passen, kunnen bedrijven niet alleen hun eigen energie-efficiëntie verbeteren, maar ook bijdragen aan een stabiel en betrouwbaarder elektriciteitsnet, wat essentieel is voor het voorkomen van netcongestie.

Frequentieregelaars kunnen in verschillende industriële toepassingen worden geïnstalleerd om de efficiëntie van het elektriciteitsnet te verhogen:

- **Pompen en ventilatoren:** Door de snelheid van pompen en ventilatoren aan te passen aan de vraag, kunnen bedrijven energie besparen en de belasting op het net verminderen.
- **Transportbanden:** Het regelen van de snelheid van transportbanden kan helpen om de productiviteit te verhogen en energie te besparen.
- **HVAC-systemen:** In verwarmings-, ventilatie- en airconditioningsystemen (HVAC) kunnen frequentieregelaars de snelheid van ventilatoren en pompen regelen om het energieverbruik te optimaliseren.

Door frequentieregelaars toe te passen, kunnen bedrijven niet alleen hun eigen energie-efficiëntie verbeteren, maar ook bijdragen aan een stabiel en betrouwbaarder elektriciteitsnet, wat essentieel is voor het voorkomen van netcongestie.

7. Smart Feedback

Smart feedback, ook wel dynamisch terug leveren genoemd, is een techniek waarbij de opgewekte energie, bijvoorbeeld van zonnepanelen, op een slimme manier wordt terug geleverd aan het elektriciteitsnet. Dit gebeurt op basis van de actuele vraag en aanbod op de energiemarkt, waardoor het terug leveren plaatsvindt wanneer er te vraag op het net is. Bij dynamisch terug leveren worden de energietarieven dagelijks of zelfs per uur aangepast aan de marktprijzen. Dit betekent dat de prijs die je krijgt voor de terug geleverde energie varieert afhankelijk van de vraag en het aanbod op dat moment. Slimme meters en energiebeheersystemen spelen hierbij een cruciale rol, omdat ze real-time gegevens verzamelen en analyseren om te bepalen wanneer het meest voordelig is om energie terug te leveren. Voor bedrijven biedt het gebruik van smart feedback verschillende voordelen:

- **Optimalisatie van teruglevering:** Bedrijven kunnen hun energieopwekking en -verbruik optimaliseren door energie terug te leveren op momenten dat de vraag hoog is en de prijs laag.

- **Kostenbesparing:** Door energie terug te leveren wanneer de prijzen hoog zijn, kunnen bedrijven hun inkomsten maximaliseren en tegelijkertijd besparen op energiekosten.
- **Vermindering van netcongestie:** Door de energie terug te leveren op momenten dat het net minder belast is, wordt de druk op het elektriciteitsnet verminderd.
- **Flexibiliteit:** Bedrijven kunnen flexibeler omgaan met hun energiebeheer, wat bijdraagt aan een stabiel en betrouwbaarder elektriciteitsnet.

Smart feedback met batterijsystemen houdt in dat energie wordt opgeslagen wanneer de prijzen laag zijn en terug geleverd aan het net wanneer de prijzen hoog zijn, om zo financiële voordelen te maximaliseren. Dit proces is sterk gericht op het optimaliseren van de inkomsten door gebruik te maken van prijsverschillen op de energiemarkt. Echter, als deze teruglevering plaatsvindt tijdens periodes van lage vraag, kan dit leiden tot invoedingscongestie. Wanneer veel batterijsystemen tegelijkertijd energie terug leveren aan het net, kan dit een onverwachte piek in de energiestroom veroorzaken, wat het net kan overbelasten.

In de praktijk kunnen bedrijven smart feedback toepassen door gebruik te maken van slimme meters en EMS'en. Deze systemen monitoren continu de energiemarkt en sturen de teruglevering van energie aan op basis van de actuele prijzen en netbelasting. Door het regelbaar vermogen van hun energieopwekkingsinstallaties te benutten, kunnen bedrijven de hoeveelheid terug geleverde energie aanpassen aan de vraag en de prijzen. Bijvoorbeeld, een bedrijf met zonnepanelen kan ervoor kiezen om de opgewekte energie flexibel terug te leveren aan het net tijdens piekuren, wanneer de vraag hoog is en de prijzen het meest gunstig zijn. Dit helpt om de belasting op het net te verminderen en de financiële voordelen te maximaliseren.

8. **Warmtepompen, E-boilers en warmteopslag**

Warmtepompen, E-boilers en warmteopslag zijn technieken die bedrijven kunnen helpen om hun energieverbruik te optimaliseren en netcongestie te voorkomen. Deze systemen maken gebruik van hernieuwbare energiebronnen om gebouwen te verwarmen en koelen, en kunnen overtollige warmte opslaan voor later gebruik. Warmtepompen werken door warmte uit de omgeving (lucht, water of grond) te halen en deze te gebruiken om een gebouw te verwarmen of te koelen. Er zijn verschillende soorten warmtepompen, waaronder 'lucht-water', 'water-water' en 'grond-water'-warmtepompen. Warmteopslagsystemen slaan overtollige warmte op in thermische opslagmedia, zoals water of faseovergangsmaterialen, die later kunnen worden gebruikt wanneer de vraag naar warmte hoger is. E-boilers zetten elektriciteit om in warmte en kunnen worden gebruikt voor industriële processen of verwarming. Voor bedrijven biedt het gebruik van warmtepompen, E-boilers en warmteopslag verschillende voordelen:

- **Efficiënt energiegebruik:** Warmtepompen zijn zeer efficiënt en kunnen met 1 kWh aan stroom 3 tot 5 kWh aan warmte produceren, wat leidt tot lagere energiekosten⁴. E-boilers daarentegen hebben 99% efficiëntie in het gebruik van elektriciteit naar warmte⁵.
- **Vermindering van piekbelasting:** Door warmte op te slaan tijdens periodes van lage vraag en deze te gebruiken tijdens piekuren, kunnen bedrijven de belasting op het elektriciteitsnet verminderen.
- **Gebruik van hernieuwbare energie:** Warmtepompen en E-boilers maken gebruik van hernieuwbare energiebronnen, wat bijdraagt aan de vermindering van de CO₂-uitstoot en de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.
- **Kostenbesparing:** Door piekbelastingen te verminderen en efficiënter om te gaan met energie, kunnen bedrijven besparen op energiekosten.
- **Verbeterde energiezekerheid:** Warmteopslagsystemen zorgen ervoor dat er altijd voldoende warmte beschikbaar is, zelfs tijdens periodes van hoge vraag of lage energieproductie.

⁴ *Warmtepomp: tips en uitleg | Milieu Centraal*

⁵ *eneco-eboiler-en.pdf*

In de praktijk kunnen bedrijven warmtepompen, E-boilers en warmteopslag integreren met hun bestaande energie-infrastructuur om de efficiëntie te verhogen en netcongestie te verminderen. Bijvoorbeeld, een bedrijf kan een warmtepomp gebruiken om een gebouw te verwarmen en overtollige warmte opslaan in een thermisch opslagsysteem. Door het regelbaar vermogen van warmtepompen en E-boilers te benutten, kunnen bedrijven de werking van deze systemen aanpassen aan de vraag naar warmte. Deze opgeslagen warmte kan later flexibel worden gebruikt tijdens piekuren, waardoor de belasting op het net wordt verminderd en de energiekosten worden verlaagd. Door regelbaar vermogen en flexibiliteit te integreren, kunnen bedrijven hun energiebeheer optimaliseren en bijdragen aan een stabiel elektriciteitsnet.

2.4 Kosteninschatting per techniek

Tabel 2: Kosteninschatting per techniek

Techniek	Kosten in euro's	Uitleg	Effectiviteit	Bron
1. Batterij systemen	Lithium 500 €/kWh tot 700 €/kWh (vermogen 1 tot 10 MW) Zoutwater geen betrouwbare inschatting beschikbaar, maar duurder dan lithium → circa 1000 €/kWh (vermogen 1 tot 100 kW) IJzeroxide circa 20 €/kWh Vermogen 1 MW per halve hectare. Tot 3 MW per hectare.	Het batterij systeem heeft verschillende prijzen afhankelijk van het type batterij. Voor grootschalige opslag zijn lithium batterijen het goedkoopst, zoutwater iets duurder ten opzichte van lithium, maar niet op grote schaal beschikbaar. IJzeroxide is het goedkoopst en schaalbaar tot 3 MW per hectare.	Batterijen kunnen aanzienlijke hoeveelheden energie opslaan en helpen piekbelasting te verminderen, wat bijdraagt aan een stabiel elektriciteitsnet. • IJzeroxide = kosteneffectief + duurzaam • Lithium = compact, krachtig, duurder en minder veilig • Zoutwater = milieuvriendelijk, veilig, ideaal voor grootschalige opslag.	Routekaart Energieopslag voorjaar 2023 Zoutwaterbatterij als thuisaccu: voordelen, kosten en alternatieven Solar365 - Massaproductie ijzer-luchtbatterij start in 2024, de goedkoopste energieopslag ooit? Battery Technology Form Energy
2. Curtailment	Dit is een uitzondering; geen kosten, maar opbrengsten cq. besparingen. 5.000 – 10.000 €/MWp geïnstalleerd vermogen (zonne-energie).	De hoogte van de opbrengsten (of besparingen) van curtailment lopen enorm uiteen. Door de productie te verminderen, vermijden ze negatieve stroomprijzen en onbalanskosten, en wordt mogelijk een vergoeding verkregen voor het stabiliseren van het elektriciteitsnet.	Curtailment houdt in dat de productie van energie tijdelijk wordt verminderd om overbelasting van het net te voorkomen. Dit is vooral nuttig tijdens piekmomenten.	Curtailment for wind turbines - Calculate your savings Wat is curtailment? - Zonnestroom Nederland

Techniek	Kosten in euro's	Uitleg	Effectiviteit	Bron
3. Directe lijn	Tussen de 0 en 3 €/MWh getransporteerde energie. Kabelprijs afhankelijk van het type kabel, markt gemiddelde: 150 €/m¹ 240 mm² 300 €/m¹ 630 mm²	De lengte die niet aangelegd hoeft te worden, vanwege het combineren x de prijs per type kabel is de besparing. Dit kan uitgedrukt worden in €/MW. Er moet in 3 fasen aangelegd worden op 1 tracé; prijs x 3.	De directe lijn maakt het mogelijk om meerdere energieopwekkings-installaties, zoals zonne- en windparken, via één kabel aan te sluiten. Dit optimaliseert het gebruik van bestaande infrastructuur en vermindert de noodzaak voor nieuwe aansluitingen.	Lever uw stroom direct aan een bedrijf in de buurt
4. Energie Management Systeem	EMS-systeem: 250 € (eenmalig). Basis EMS: 500 – 2.000 €/jaar. Geavanceerd EMS: Kan oplopen tot 20.000 €/jaar. Integratie, installatie en inbedrijfstelling, onderhoud en update, training en support maken tezamen de jaarlijkse kosten op.	Het apparaat zelf en de software kosten relatief weinig. De aansluitingen die een bedrijf heeft, daar zitten de kosten in. Bij een basis EMS zijn er alleen batterij systemen en PV-systemen aangesloten. Bij een geavanceerd EMS kunnen WKO's, warmtepompen etc. ook aangesloten worden. Afhankelijk van het hoeveelheid vermogen dat aangesloten wordt, loopt de prijs op.	Een EMS optimaliseert het energieverbruik door real-time monitoring en aansturing van apparaten. Dit helpt om piekbelastingen te verminderen en het energieverbruik te spreiden.	Verdien geld met je thuisbatterij dankzij een EMS - Energy Protect Energie Management Systeem (EMS) Eco2all
5. Flexibele opwek	Biodiesel: 1,6834 €/l (11-12-2024) = 0,183 €/kWh. Biogas: maximaal 2,94 €/m³ (2026-2027) = 0,279 €/kWh.	Biodiesel en biogas worden per liter ingekocht, maar uitgerekend naar elektriciteit doormiddel van de generator.	Biodiesel en biogas helpen voor een back-up en een snelle respons in tijden van geen of weinig elektriciteit.	Fuel prices - FullTank by Hans de Baat Bijmengverplichting groen gas een jaar uitgesteld en

Techniek	Kosten in euro's	Uitleg	Effectiviteit	Bron
	Waterstof: Vermogen 100 MW Elektrolyse 2.200 €/kW. Opslag en infrastructuur erbij is 4.400 €/kW	Elektrolyser moet aangeschaft worden; daarna komt systeem voor opslag er nog bij. Enorme capaciteit, maar productiehoeveelheid kan tegenvallen. Eigenlijk alleen interessant voor grote bedrijventerreinen	Waterstof is een veelzijdige energiedrager die overtollige duurzame energie kan opslaan en later kan omzetten in elektriciteit. Dit helpt om de belasting op het net te spreiden en piekbelasting te verminderen, wat essentieel is voor het voorkomen van netcongestie.	daling gasverbruik - CCS Energie-advies Kosten productie duurzame waterstof via elektrolyse in kaart Eindadvies basisbedragen SDE++ 2024
6. Frequentie-regelaars	500 kW – 1 MW 20.000 – 50.000 €/eenheid. 1 MW – 5 MW Kan oplopen tot 100.000 €/eenheid. Installatiekosten kunnen variëren van 10.000 – 50.000 € afhankelijk van het type installatie.	De kosten voor frequentieregelaars met een vermogen van 500 kW tot 5 MW kunnen aanzienlijk variëren, afhankelijk van de specificaties en de installatievereisten.	Frequentieregelaars zijn zeer effectief in het stabiliseren van de stroomfrequentie, wat bijdraagt aan een betrouwbaarder en efficiënter energienetwerk. Ze helpen piekbelastingen te verminderen en optimaliseren, wat leidt tot lagere operationele kosten en een langere levensduur van elektrische apparatuur.	Factsheet Frequentieregeling.pdf Adviesgids frequentieregelaars - Schipper Technische Groothandel
7. Smart Feedback	Tarieven fluctueren.	De hoeveelheid kWh of MWh maal de dan geldende elektriciteitsprijs.	Smart feedback optimaliseert de teruglevering van energie aan het net op basis van actuele vraag en aanbod, wat efficiëntie verhoogt en piekbelasting vermindert.	
8. Warmtepomp, E-boilers en warmte-opslag	500 kW – 1 MW 100.000 – 200.000 € voor een warmtepomp en voor e-boiler kan het oplopen tot € 300.000 1 MW – 5 MW	De kosten voor de aanschaf en installatie van warmtepompen met buffervaten voor vermogens tussen 500 kW en 5 MW kunnen aanzienlijk variëren afhankelijk	Warmtepompen en warmteopslag systemen slaan overtollige warmte op en gebruiken deze tijdens piekuren. Dit vermindert de vraag	How Much Does an Industrial Heat Pump Cost? - Cyanergy

Techniek	Kosten in euro's	Uitleg	Effectiviteit	Bron
	200.000 – 500.000 € voor een warmtepomp en e-boiler kan het oplopen tot € 1.000.000. Buffervat kosten variëren van 10.000 – 50.000 € afhankelijk van capaciteit.	van de grootte en complexiteit van het systeem.	naar elektriciteit tijdens piekmomenten.	Warmtepomp kosten 2024 - 2025: Prijzen & subsidies E-boiler Eneco Grootzakelijk

3 Kosteninschatting BTM-batterijen

3.1 Algemeen

Voor batterijen achter de meter (BTM-batterijen) wordt een uitgediepte kosteninschatting gemaakt om extra inzicht te bieden. Dit omdat batterijen verschillende formaten kunnen aannemen om de nodige flexibiliteit en/of regelbaar vermogen te leveren. Hierbij is de specifieke context van het bedrijf qua verbruiksprofiel, transportcapaciteit en beoogde bijdrage tegen netcongestie van belang voor het bepalen van het formaat. Het formaat zal verschillen qua vermogen en de C-rating van de batterij.

C-rating van de batterijen geeft ontladingsduur weer

De C-rating is de verhouding tussen het vermogen en de energieopslag van de batterij. Gedefinieerd als vermogen gedeeld door opslagcapaciteit. Bijvoorbeeld, een batterij met een vermogen van 1 MW met een capaciteit van 2 MWh heeft een C-rating van 0,5.

Voor de uitgediepte kosteninschatting wordt eerst bepaald wat gangbare formaten BTM-batterijen zijn op basis van publieke en interne bronnen van projecten waar batterijen worden gebruikt tegen netcongestie. Hieruit volgen zes gangbare batterij-formaten, variërend qua vermogen en C-rating. Hiervoor worden investerings- en installatiekosten bepaald. Deels op basis van interne kostenramingen en deels door opgevraagde kostenramingen van gangbare leveranciers in Nederland. Hierdoor zijn ook de meest recente prijsontwikkelingen in de batterijmarkt meegenomen. Dit biedt inzicht in wat de kapitaalkosten zijn van batterijen achter de meter en hoe dit varieert bij verschillende vermogens en C-ratings.

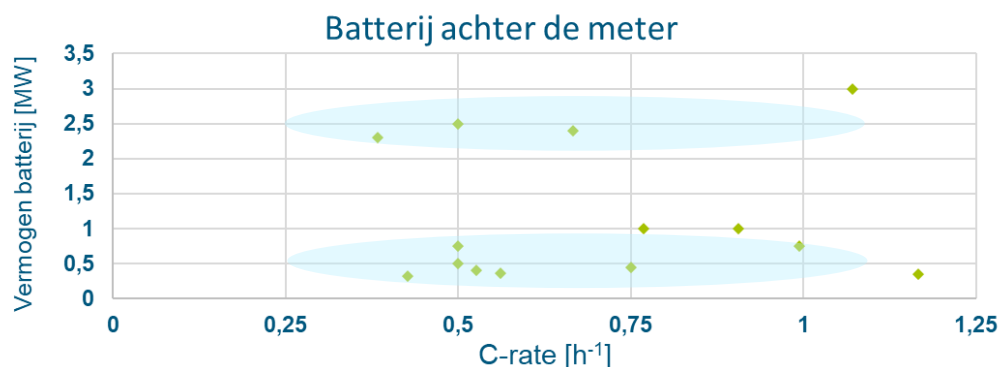
3.2 Batterij-formaten

Uit een inventarisatie van publieke en interne bronnen van batterijen achter de meter tegen netcongestie komen zes batterij-formaten naar voren. Deze zijn te onderscheiden in twee vermogensklasse en drie verschillende C-ratings. Hieruit volgen zes verschillende batterijcapaciteiten die achter de meter bij bedrijven voorkomen of gepland zijn.

Tabel 3.1: Overzicht van gekozen zes batterij-formaten op basis van inventarisatie

Batterijcapaciteit, naar vermogen en C-rating		C-rating		
		1C	0,5C	0,25C
Vermogen	0,5 MW	0,5 MWh	1 MWh	2 MWh
	2,5 MW	2,5 MWh	5 MWh	10 MWh

De vermogens van 0,5 en 2,5 MW volgen uit de inventarisatie van bestaande en/of geadviseerde batterijen. Daarin zijn twee grove clusteringen te zien rond deze vermogens van batterijen.



De C-rating varieert sterk tussen de 1,2C en 0,4C in de inventarisatie. Hieruit is gekozen om 1C en 0,5C C-rating aan te houden. Dit lijken bij benadering de meest voorkomende C-ratings te zijn uit de inventarisatie.

In een eerdere studie in opdracht van RVO, uitgevoerd door Merosch en CE Delft naar netcongestie oplossingen bij bedrijven is een C-rating van 0,25C voorgesteld voor een batterij achter de meter⁶. Dit past in een algemene trend in batterijopslag dat de C-rating steeds lager wordt om voor langere periodes elektriciteit te leveren. Daarom is gekozen om de C-rating van 0,25C hier ook op te nemen voor de kostenraming.

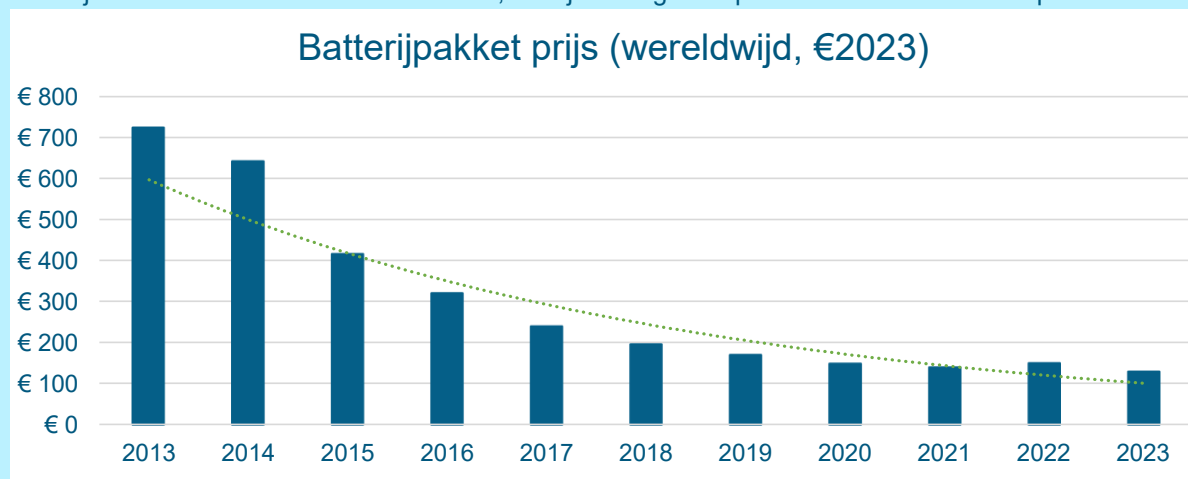
Uit de gekozen vermogens (0,5 en 2,5 MW) en C-ratings (1C, 0,5C, en 0,25C) volgen de batterijcapaciteiten van de gekozen batterij-formaten, zie Tabel 3.1. Deze variëren van 0,5 MWh tot 10 MWh en hebben daarmee een flink bereik in batterijgroottes. Dit heeft impact hebben op de investerings- en installatiekosten van batterijen achter de meter. Deze komen in de volgende paragraaf aan bod.

3.3 Kostenraming

De totale investeringskosten voor het realiseren van een batterij achter de meter is van meerdere factoren afhankelijk. Allereerst zijn er de aanschafkosten van de batterij zelf en aanvullende randapparatuur. Daarnaast zijn er de installatiekosten, waarbij moet worden gedacht aan kosten voor systeemontwerp, projectmanagement en plaatsing. Voor deze kostenraming worden per batterijformaat de totale investeringskosten en apart de daaronder vallende installatiekosten gepresenteerd.

Batterijen worden jaarlijks steeds goedkoper met opschaling van de productie

De kosten de van batterijpakket zelf zijn de afgelopen jaren sterk gedaald. In 2023 kostte een batterijpakket wereldwijd gemiddelde rond 130€ per kWh. Dit is een kostendaling van een derde ten opzichte van ongeveer 200€ per kWh in 2018. De algemene verwachting is dat de kosten geleidelijk verder zullen dalen naar mate wereldwijde productie opschaaft. Hierdoor zal de investeringskosten van batterijen achter de meter ook mee dalen, hetzij deels gedempt door de andere kostenposten.



Figuur 3.2: Prijsrend batterijen van 2013-2023 (BNEF Lithium-Ion Battery Price Survey 2023)

De bovenstaande prijzen een wereldwijd gemiddelde, echter zijn er sterkte regionale verschillen. Zo kost een batterijpakket in China 117€ per kWh terwijl in Europa de prijzen 20% hoger liggen op 140€ per kWh. Dit verschil zal waarschijnlijk de komende jaren in stand blijven waardoor de prijzen in Europa hoger blijven dan het wereldwijd gemiddelde.

⁶Merosch en CE Delft - Oplossingen voor netcongestie bij bedrijven – mei 2024

Tevens worden deze kosten uitgedrukt in gemiddelde investerings- en installatiekosten per kilowattuur batterijopslag en per kilowatt vermogen. De weergegeven totale investeringskosten bevatten: hardware (batterij, omvormer, aansturing, etc.), projectkosten, engineeringkosten, en plaatsingskosten. En hiervan zijn de laatste drie kostenposten samen de installatiekosten.

Gemiddeld zijn de totale investeringskosten voor een batterij achter de meter 420 €/kWh, met een range van 270 tot 760 €/kWh.

Door de nodige aanvullende apparatuur en installatiekosten zijn de gemiddelde investeringskosten hoger dan die van enkel het batterijpakket zelf. Naast een batterijpakket is er ook een omvormer, een aansturingsmodule en een aansluiting nodig om de batterij op in te laten invoeden of afnemen van het net. De omvormer zet de gelijkspanning van de batterij om in de wisselspanning van het net. De aansturingsmodule verzorgt het vermogen dat de batterij wordt geleverd of onttrokken. En de aansluiting borgt een veilige elektrische installatie en verbindingen met het net achter de meter.

Dit zorgt voor een grote spreiding in de investeringskosten range tussen respectievelijk grotere en kleinere batterijen. Zeker bij kleinere formaten wegen de extra kosten zwaarder op de kosten per kilowattuur batterijcapaciteit. Grotere batterijen kunnen de vaste investeringskosten verdelen over de grotere capaciteit van de batterij. Deze spreiding is ook weergegeven in de gemiddelde totale investeringskosten, dikgedrukt, in Tabel 3.2.

Hiervan bedraagt gemiddeld ca. 37 €/kWh installatiekosten, met een range van 20 tot 60 €/kWh.

De installatiekosten bijdragen gemiddeld zo'n 7 á 12 procent van de totale investeringskosten. De spreiding komt doordat er vaak sprake is van maatwerk om de batterij in te passen bij een bedrijf. Bijvoorbeeld doordat er een langere en zwaardere kabel getrokken moet worden tussen verdeelkast en de batterij of vereiste aanpassingen aan de verdeelkast. Of dat er door de beoogde locatie aanvullende maatregelen moeten worden getroffen voor bijvoorbeeld de brandveiligheid. Dit leidt tot extra ontwerp-, project-, en installatiekosten voor het plaatsen van een batterij bij een bedrijf achter de meter. Door deze extra kosten kunnende totale investeringskosten in zeer complexe gevallen zelfs verdubbelen.

Tabel 3.2: Gemiddelde totale investerings- en installatiekosten voor gehele systeem

Gemiddelde investeringskosten per formaat [miljoen €], waarvan installatiekosten [duizend €]		C-rating		
		1C	0,5C	0,25C
Vermogen	0,5 MW	0,4 M€ 30 k€	0,4 M€ 25 k€	0,6 M€ 40 k€
	2,5 MW	1,4 M€ 140 k€	1,6 M€ 180 k€	2,9 M€ 260 k€

Een recente trend is dat leveranciers nog amper 1C batterijen aanbieden omdat het prijsverschil met 0,5C bijna verwaarloosbaar is. Wat in de lijn der verwachting is dat nieuw gerealiseerde batterijen steeds lagere C-ratings krijgen.

De kosten per eenheid vermogen zijn gemiddelde 810 €/kW, maar variëren sterk.

Kijkend naar de investeringskosten per eenheid regelbaar vermogen, zijn de investeringskosten zo'n 810 €/kW, met een range van 550 tot 1200 €/kW. Hiervan zijn ongeveer 70 €/kW voor de installatiekosten, met een range van 50 tot 100 €/kW. Hierbij heeft de C-rating een grote invloed op de gemiddelde prijs en range, naar mate de batterij een grotere capaciteit heeft per eenheid vermogen.

De kostenraming is verifieerd tegen kostenindicaties van vier leveranciers, voor de zes batterijformaten. Alle gemiddelde waardes zijn afgerond tot een significantie van twee in verband met onzekerheden en onherleidbaarheid. De kostenraming is dan ook gepeild in november 2024.

4 Conclusies en aanbevelingen

Aangekomen bij dit afsluitende hoofdstuk wordt teruggeblikt op de vooraf door RVO geformuleerde onderzoeksvragen en de antwoorden die dit flitsonderzoek hebben opgeleverd. Allereerst wordt er begonnen met onderzoeksvraag 1:

- Welke technische maatregelen en/of assets kan een onderneming treffen om het energieverbruik op een flexibele manier in te zetten en wat zijn de geschatte investeringskosten en installatiekosten van deze maatregelen?

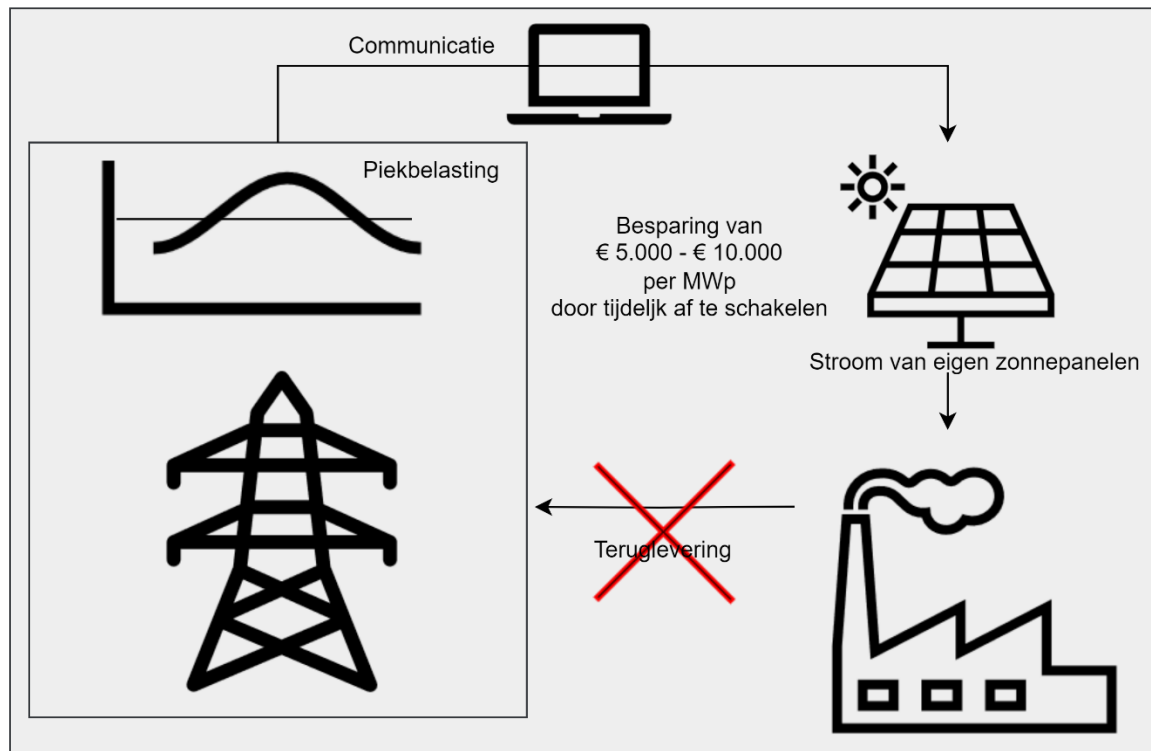
In hoofdstuk twee 'Technische maatregelen' zijn een achttal technieken verkend, waarmee bedrijven de flexibiliteit en het regelbaar vermogen van hun onderneming kunnen vergroten. Deze technieken lopen uiteen van batterij systemen en curtailment tot EMS'en en warmtepompen. Zo zijn er maatregelen te vinden in verschillende prijsklassen. Afhankelijk van de lokale context dient een onderneming te bepalen welke techniek het meeste effectief is. Deze context wordt enerzijds bepaald door de situatie van het elektriciteitsnet en anderzijds door het verbruik en de opwek van de betreffende onderneming. Voor het selecteren van de juiste (combinatie van) technische maatregel(en) is het aan te bevelen op basis van de kosteninschatting een business case op te stellen en de terugverdientijd van de benodigde investeringskosten te bepalen.

Dan wordt hervat met onderzoeksvraag 2:

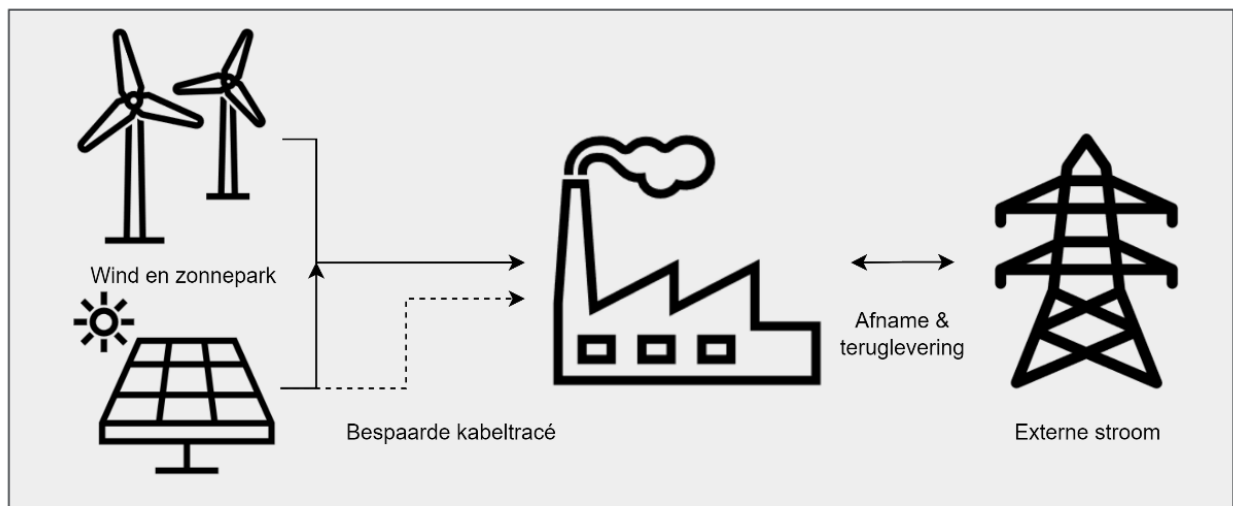
- Wat zijn de investeringskosten en installatiekosten van BTM-batterijen met een vermogen tussen de 500 kW en 5 MW?

Uit hoofdstuk drie 'BTM-batterijen' blijkt dat er verschillende batterij formaten achter de meter kunnen worden ingezet. De investeringskosten van deze batterijen variëren met het formaat en de complexiteit van installatie. Hierbij zijn er twee trends zichtbaar: (1) een stijgende trend op het gebied van de kwaliteit, waarbij de batterijen steeds meer opslagcapaciteit krijgen bij hetzelfde vermogen en (2) een dalende trend op het gebied van de investeringskosten, waarbij de verwachting is dat deze verder daalt naarmate de productie opschaaft. Momenteel zijn de gemiddelde investeringskosten van een batterij achter de meter circa 420 €/kWh of 810 €/kW. Hiervan zijn gemiddeld 7-12% van deze investeringskosten voor rekening van de installatie van de batterij. Om na te gaan of een BTM-batterij een geschikte oplossing is voor een onderneming dient op basis van de lokale context het meest geschikte batterijformaat te worden bepaald en ook hier aan de hand van de genoemde investeringskosten een business case te worden opgesteld om de terugverdientijd te bepalen.

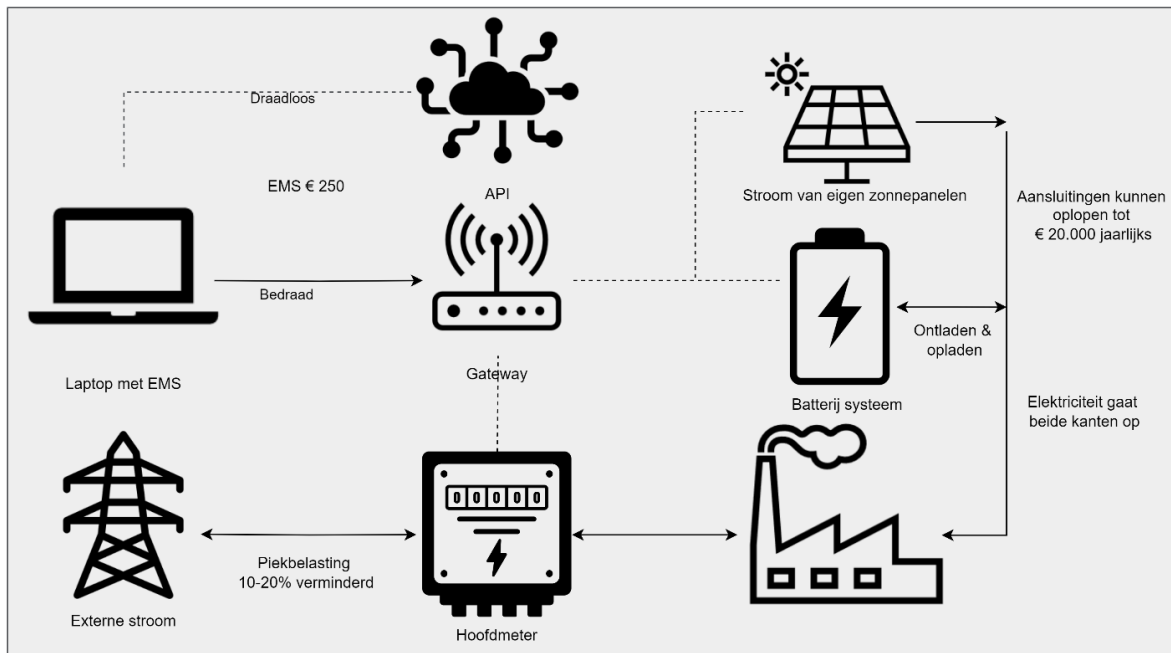
2. Curtailment



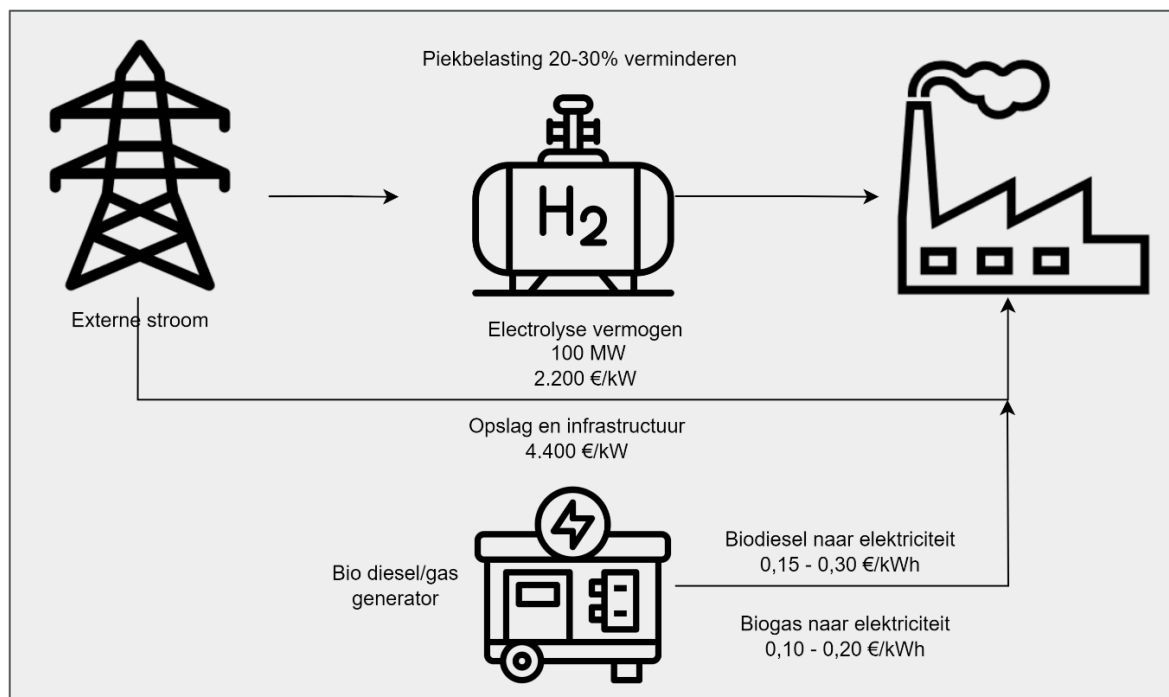
3. Directe lijn



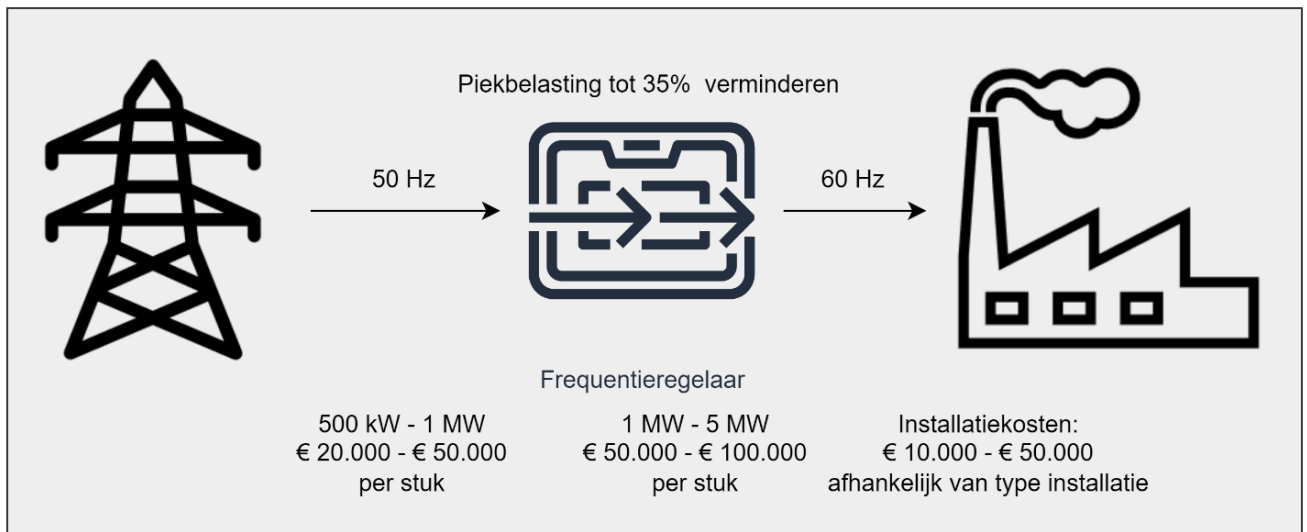
4. Energie Management Systeem



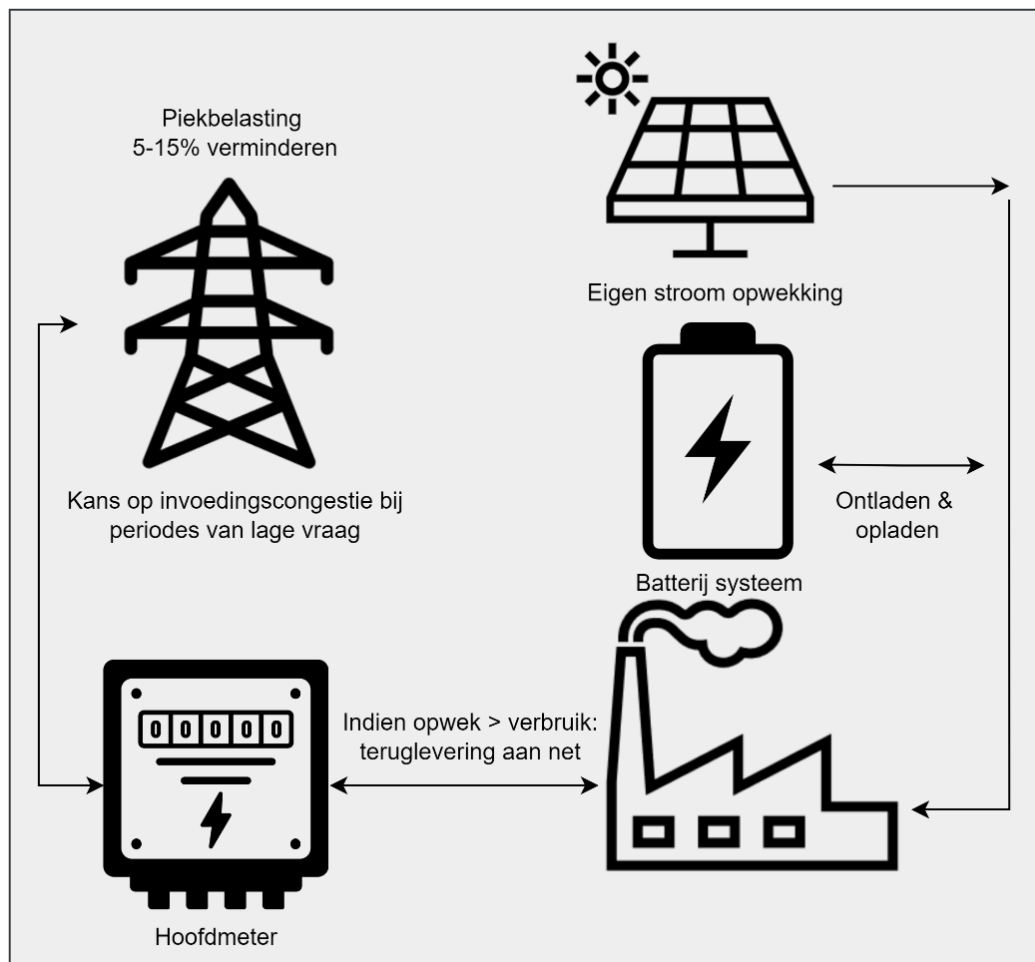
5. Flexibele opwek



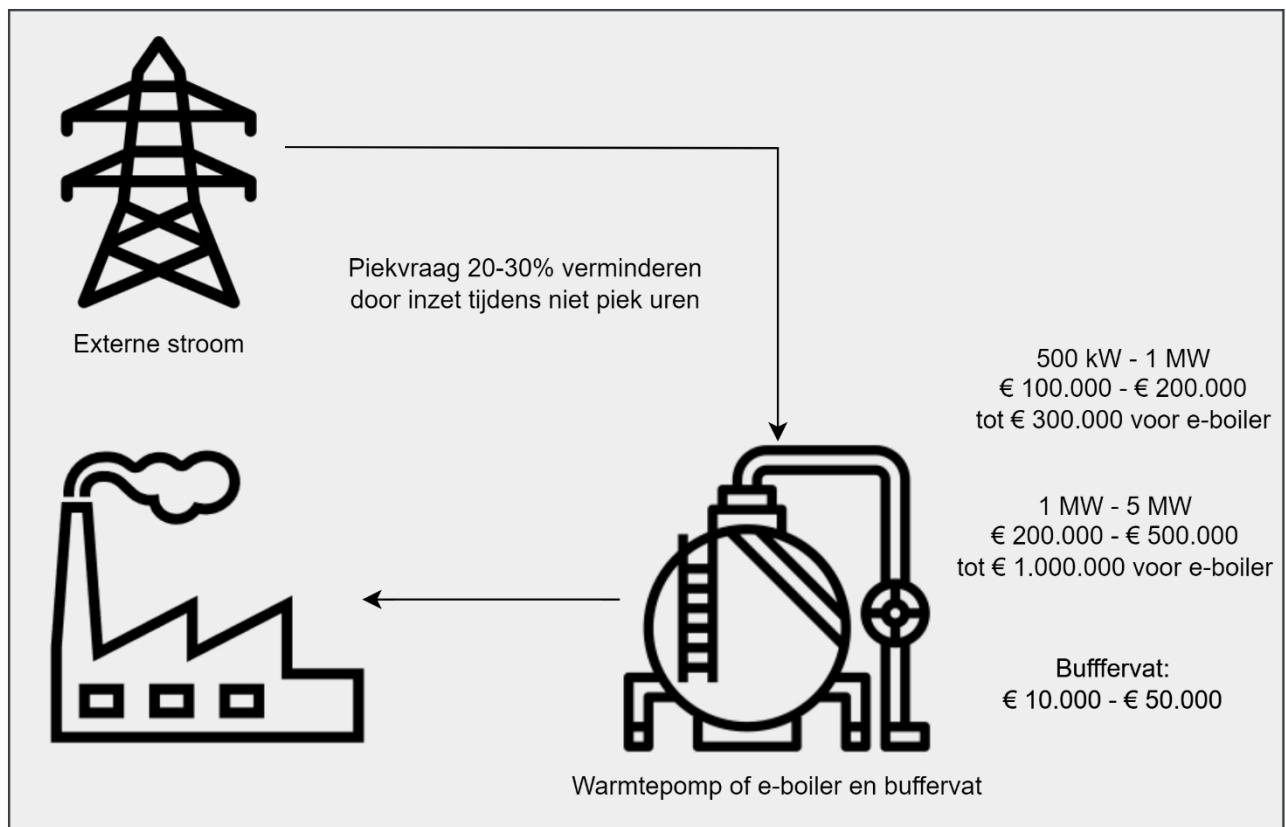
6. Frequentieregelaars



7. Smart feedback



8. Warmtepomp, E-boiler, warmteopslag



Dit is een publicatie van:
Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Prinses Beatrixlaan 2 | 2595 AL Den Haag
Postbus 93144 | 2509 AC Den Haag
T +31 (0) 88 042 42 42
Contact
www.rvo.nl

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van
Klimaat en Groene Groei.

© Rijksdienst voor Ondernemend Nederland | januari 2026
Publicatienummer: RVO-009-2026/RP-DUZA

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) stimuleert duurzaam,
agrarisch, innovatief en internationaal ondernemen. Met subsidies, het
vinden van zakenpartners, kennis en het voldoen aan wet- en regelgeving.
RVO werkt in opdracht van ministeries en de Europese Unie.

RVO is een onderdeel van het ministerie van Economische Zaken.