

Verkenning van vraagrespons in de Nederlandse energie- intensieve industrie



TNO 2026 R10158 – 27 januari 2026

Verkenning van vraagrespons in de Nederlandse energie- intensieve industrie

Auteurs	TNO Floris Uleman, Sebastiaan Hers, Robert de Kler
Rubricering rapport	DNV Thijs Slot, Chris Goemans, Fleur de Haan
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Aantal pagina's	60 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Projectnummer	060.62050

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

Management samenvatting

Aanleiding: industriële vraagrespons als groeiende systeemopgave richting 2030

De snelle groei van zon- en windenergie leidt tot grotere variaties in de residuele elektriciteitsvraag. Tijdens schaarsteperiodes, zoals winterluwtes, kunnen piekprijzen en druk op de leveringszekerheid toenemen. TenneT verwacht vanaf 2030 verhoogde leveringszekerheidsrisico's, waardoor de vraag toeneemt naar aanvullende flexibiliteitsopties zoals industriële vraagrespons (Industrial Demand Side Response: IDSR). De centrale vraag is in hoeverre en onder welke randvoorwaarden het technisch potentieel van IDSR ook operationeel inzetbaar is in industriële processen.

Een kwalitatieve verkenning van de operationele inzetbaarheid van IDSR

Om een antwoord op de centrale vraag te geven, hebben we het potentieel verkend van IDSR in de Nederlandse energie-intensieve industrie, de randvoorwaarden voor inzet, en de rol die IDSR kan spelen in een toekomstig CO₂-arm energiesysteem. Deze verkenning geeft beleidsmakers inzicht in de operationele inzetbaarheid van IDSR en in de aanvullende maatregelen die nodig zijn om leveringszekerheid te borgen. Het onderzoek combineert literatuurstudie, data-analyse en interviews met industriële bedrijven.

Hoofdconclusie: IDSR heeft richting 2030 een groot technisch potentieel, maar blijft door operationele randvoorwaarden slechts beperkt inzetbaar voor leveringszekerheid

IDSR kan een nuttige aanvullende bijdrage leveren aan het opvangen van kortdurende schaarstemomenten, maar vormt geen hoofdroute voor leveringszekerheid onder de huidige technische, economische en organisatorische randvoorwaarden. De redenen hiervoor zijn:

- 1. Groot technisch potentieel (3,5-4,0 GW), maar beperkt operationeel inzetbaar***
Het technisch potentieel ligt voornamelijk in de grote elektriciteitsverbruikende processen zoals elektrolyse, compressie, cryogene installaties en e-boilers, met tot meer dan 100 MW flexibel vermogen per locatie. Door gebrek aan praktijkdata kon het potentieel niet volledig worden gekwantificeerd. Het potentieel van 3,5-4,0 GW uit de literatuur geeft slechts een theoretische indicatie van het inzetbare potentieel. In de praktijk is slechts een deel daarvan inzetbaar is door productkwaliteitseisen, beperkte ramp-rates en turndown-ratio's, ketenafhankelijkheden, batchcycli en risico's op ongeplande stilstand.
- 2. IDSR is primair inzetbaar bij kortdurende productieschaarste***
IDSR blijkt vooral effectief in het opvangen van kortdurende prijs- of systeemstress (minuten tot enkele uren). Bij langdurige tekortperiodes verschuift de behoefte naar aanbodzijdeflexibiliteit, zoals opslag of regelbaar vermogen.
- 3. Proces- en ketenafhankelijkheden begrenzen inzetduur en frequentie***
Veel industriële processen kunnen niet autonoom worden af- of opgeschaald. Upstream/downstream afhankelijkheden, continue productie-eisen en veiligheidsmarges bepalen in sterke mate de operationele inzetbaarheid.
- 4. Economische prikkels zijn onvoldoende voor structurele inzet van IDSR***
Bedrijven gebruiken IDSR primair om extreme prijzen te voorkomen, niet als structurele marktactiviteit. Zonder stabiele vergoedingsmechanismen, risicodeling, betrouwbare dispatch-signalen of langjarige contracten blijft IDSR-deelname beperkt. Daarnaast blijft de businesscase voor veel processen nu onrendabel of onzeker door stilstandkosten, herstartverliezen en onzekerheid over vergoedingsmechanismen.
- 5. Grote variaties in aannames beperken beleidsduidelijkheid***
Doordat literatuurstudies vaak uitgaan van andere aannames dan bedrijven in de praktijk

hanteren (zoals responstijd, inzetfrequentie, afschakelduur en stilstandkosten), ontstaat een vertekend beeld van de daadwerkelijke inzetbaarheid van flexibiliteit, waardoor betrouwbare adequacy-analyses en effectief beleid worden bemoeilijkt.

Reflectie en aandachtspunten

De inzetbaarheid van IDSR hangt sterk af van systeemcondities, proceskenmerken en governance. Het technisch potentieel kan alleen worden benut wanneer duidelijk is hoe vraag- en aanbodopties zich tot elkaar verhouden en onder welke kosten en risico's IDSR concurrerend kan zijn. Daarnaast bepalen ketenafhankelijkheden, technologische keuzes en onduidelijkheden in rollen en verantwoordelijkheden in hoge mate of bedrijven flexibiliteit structureel kunnen en willen leveren. Deze onzekerheden onderstrepen het belang van verdere empirische onderbouwing, sectorspecifieke inzichten en een integrale beoordeling van vraag- en aanbodflexibiliteit in de toekomstige leveringszekerheidsstrategie.

Hoofdaanbeveling: operationaliseer IDSR door samenhangende technische, economische en organisatorische randvoorwaarden te creëren

Het onderzoek laat zien dat de kernuitdaging voor IDSR niet alleen ligt in het vergroten van technisch potentieel, maar vooral in het operationaliseren ervan. Om het bestaande flexibele vermogen wél betrouwbaar, voorspelbaar en kosteneffectief te kunnen inzetten, is een samenhangende aanpak nodig. Dit vraagt om heldere afspraken, betere data, passende marktproducten en een betere integratie van IDSR in systeem- en netanalyses. De onderstaande aanbevelingen beschrijven welke acties nodig zijn om deze randvoorwaarden te creëren en zo de operationele inzetbaarheid van IDSR substantieel te vergroten:

1. *Vastlegging van procesflexibiliteit en parameters in een Monitor Industriële Flexibiliteit*
Verzamel en standaardiseer actuele procesdata over inzetduur, ramp-rates, turndown-ratio's, herstartkosten, ketenafhankelijkheden en stilstandrisico's, zodat realistisch inzetbare flexibiliteit beter kan worden gekwantificeerd. Ontwikkel een Monitor Industriële Flexibiliteit om deze data en operationele ontwikkelingen te volgen en te analyseren.
2. *Eenduidige aannames en methodieken in adequacy- en systeemstudies*
Ontwikkel een consistent en transparant raamwerk voor de representatie van IDSR, inclusief uniforme aannames over responstijden, inzetfrequentie en kosten. Dit vermindert variatie tussen studies en vergroot de betrouwbaarheid van beleidsanalyses.
3. *Gerichte marktproducten en voorspelbare vergoedingsmechanismen*
Ontwerp marktproducten die aansluiten op operationele inzetbaarheid en bied stabiele, langjarige en kostendeckende vergoedingen. Hiermee wordt deelname aan flexibiliteitsmarkten aantrekkelijker en worden risico's beter gedeeld.
4. *Pilots en operationele arrangementen voor aggregatie en dispatch-zekerheid*
Richt pilots in waarin verificatie, communicatie, data-uitwisseling en operationele zekerheid kunnen worden getest. Dit helpt om onduidelijkheden in inzetbaarheid, betrouwbaarheid en interactie tussen industrie, netbeheerders en aggregators weg te nemen.
5. *Integratie van IDSR in regionale net- en systeemanalyse*
Veranker IDSR expliciet in cluster- en netcapaciteitsplanning, waarbij aandacht wordt besteed aan locatiespecifieke beperkingen, interacties met elektrificatietrajecten en de impact op regionale netcongestie.
6. *Heldere governance en verantwoordelijkheidstoedeling*
Ontwikkel een sectorspecifiek kader voor de rolverdeling tussen industrie, aggregators, netbeheerders en overheid, inclusief afspraken over risicoverdeling, verificatie, dispatch-zekerheid en contractuele verantwoordelijkheden. Dit is noodzakelijk om de betrouwbaarheid en effectiviteit van IDSR op systeemniveau te kunnen garanderen ten behoeve van de leveringszekerheid.

Inhoudsopgave

Management samenvatting	3
1 Introductie en probleemstelling	6
2 Bestaande kennis en inzichten over industriële vraagrespons in Nederland	10
2.1 Definitie industriële vraagrespons	11
2.2 Techno-economisch potentieel voor industriële vraagrespons	13
2.3 Waarde van flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt	15
2.4 Barrières voor grootschalige toepassing van industriële vraagrespons	18
2.5 Oplossingsrichtingen voor grootschalige toepassing van industriële vraagrespons	21
2.6 Internationaal perspectief voor IDSR inzet	24
2.7 Conclusie	25
3 Bottom-up analyse vanuit industriële processen	26
3.1 Analyse van MIDDEN technologieën en gebruik in modellering	26
3.2 Praktijk inzichten uit sector interviews	32
3.3 Samenvattend overzicht en interpretatie van sectorale inzichten	38
3.4 Naar een geïntegreerde benadering van het potentieel van industriële vraagrespons per proces	39
4 Discussie: Interpretatie van bevindingen en implicaties voor leveringszekerheid	41
5 Conclusie: Randvoorwaarden voor inzetbaarheid IDSR	44
6 Aanbevelingen: Beleidsrichtingen en vervolgonderzoek	46
Referenties	49
 Bijlagen	
Bijlage A: Sectorale analyse van interviewbevindingen	50
Bijlage B: Methodische verschillen in literatuur van TNO analyse	58

1 Introductie en probleemstelling

Systeemperspectief: groeiende flexibiliteitsbehoefte en leveringszekerheid

Het Nederlandse energiesysteem verandert snel door de groei van wind- en zonne-energie. Waar het systeem historisch aanbod gedreven was, waarbij productie volgt wat de vraag nodig heeft, wordt het systeem steeds meer vraag gedreven, waarin de vraag moet meebewegen met wat weersafhankelijke bronnen op dat moment leveren. Deze transitie vergroot de behoefte aan flexibiliteit en maakt procescontinuïteit in de industrie kostbaarder en strategischer: tijdens momenten van schaarste neemt de waarde van flexibel verbruik sterk toe.

Naast de toename van weersafhankelijke opwek wordt de behoefte aan flexibiliteit versterkt door een bredere set structurele ontwikkelingen: de snelle elektrificatie van industrie, mobiliteit en gebouwde omgeving, het uifaseren van regelbaar thermisch vermogen, toenemende netcongestie en de groeiende afhankelijkheid van elektriciteit voor productieprocessen en maatschappelijke diensten. Hierdoor ontstaat zowel een systeembrede flexibiliteitsbehoefte (voor het opvangen van productieschaarste) als een locatiegebonden flexibiliteitsbehoefte (voor het beperken van transportknelpunten).

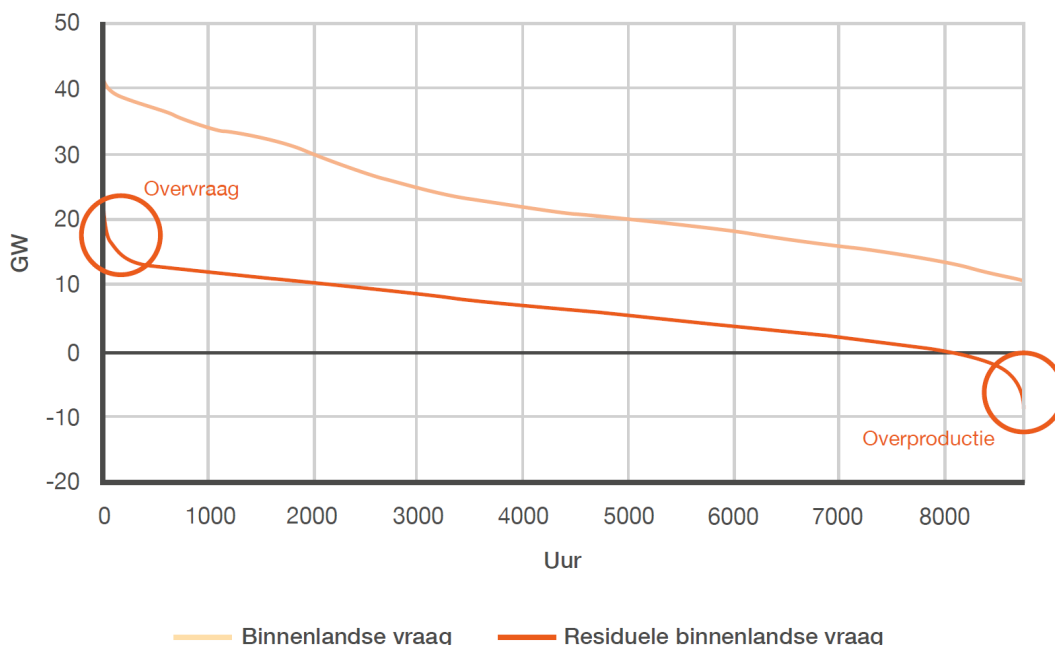
Voor leveringszekerheid is met name flexibiliteit relevant die inzetbaar is tijdens uren van lage hernieuwbare productie en hoge elektriciteitsvraag. Dit betreft bronnen die betrouwbaar, controleerbaar en met voldoende inzetduur beschikbaar zijn, zoals regelbaar vermogen, opslag en procesgebonden industriële vraagrespons. Voor netcongestie is een ander type flexibiliteit nodig: flexibiliteit die lokaal en op kortere tijdschalen de belasting van het elektriciteitsnet verlaagt, vaak via utiliteitsflexibiliteit of flexibele aansluitcontracten. Deze flexibiliteit draagt niet automatisch bij aan leveringszekerheid, omdat zij primair gericht is op transportcapaciteit en niet op productie-tekorten.

Systeemperspectief: vraagrespons in tijden van productieschaarste

De kern van de flexibiliteitsbehoefte ligt in de residuele vraag: vraag minus wind en zon, en minus biomassa en nucleair. Op windstille, grijze dagen valt de productie van elektriciteit uit zon en wind vrijwel weg. Deze is in de rode cirkel links goed te zien (overvraag), als de vraag piekt ten opzichte van het stroomaanbod. Het gaat om ongeveer 9 GW aan vermogen dat voor ongeveer 500 uur in het jaar tekortkomt. Dit is zowel een aanzienlijke hoeveelheid als een aanzienlijke totale duur. Het vertegenwoordigt een behoorlijke uitdaging, want deze vraag is moeilijk rendabel in te vullen. De momenten waarop dit optreedt en de duur van de perioden zullen bepalen tegen welke kosten de gebruiker deze uren kan overbruggen.

De linkerkant toont uren van productieschaarste waarin het aangesloten aanbod ontoereikend is. In deze perioden stijgen de prijzen op de day-ahead-, intraday- en onbalansmarkt, en moet TenneT extra flexibiliteit activeren om het systeem te stabiliseren. Omdat vrijwel alle productie al maximaal draait en alternatieve flexibiliteitsopties economisch niet inzetbaar zijn bij deze prijsniveaus, komt flexibiliteit in deze uren vooral van afschakeling van de vraag, waaronder afschakeling van de elektriciteitsvraag van industriële processen; industriële vraagrespons (ofwel Industrial Demand Side Response (IDSR)). Aan de

rechterzijde ontstaan overschotten waarin afregeling of vraagverhoging nodig is. Industriële vraagrespons is met name relevant in het linkerdeel van de grafiek: het mitigeren van tekorten.



Figuur 1.1: Belastingduurkrommen voor de binnenlandse vraag op basis van de overvraag en de residuele vraag (vraag minus wind en zon, en minus biomassa en nucleair) op basis van de overvraag en het aanbod van wind en zon. Het betreft de elektriciteitsvraag en productie voor een scenario voor 2030. Bron: TNO, 2022.

Tijdens structurele schaarsteuren kan flexibiliteit nauwelijks nog aan de aanbodzijde worden geleverd: regelbaar vermogen draait al maximaal en opslag of power-to-X is economisch niet inzetbaar wanneer prijzen oplopen tot het maximum van €4.000/MWh. Dit betekent dat flexibiliteit in dergelijke uren hoofdzakelijk kan worden geleverd via tijdelijke afschakeling van industriële elektriciteitsvraag (IDSR). IDSR is daarmee geen generieke flexibiliteitsoptie, maar vooral een instrument voor tekorturen.

Industrieperspectief: toenemende risico's voor proces continuïteit en energiekosten

De verschuiving naar een vraag gedreven systeem heeft directe gevolgen voor de industrie. In uren van schaarste kunnen spotprijzen oplopen tot het maximum van €4.000/MWh. Wanneer dergelijke prijsniveaus zich gedurende circa 500 uur per jaar voordoen, kunnen de jaarlijkse elektriciteitskosten van energie-intensieve bedrijven tot vijf keer hoger uitvallen. Deze prijsrisico's spelen parallel aan toenemende systeemrisico's: TenneT verwacht dat de kans op tekorten rond 2030 toeneemt.

Tegelijkertijd is de meeste energie-intensieve industrie historisch ontworpen voor continue baseload-operatie, omdat dit technisch veilig, kostenefficiënt en contractueel voorspelbaar is. Daardoor blijkt in de praktijk slechts een beperkt aantal processen en sectoren in staat of bereid om flexibel te opereren. Door de ingroei van weersafhankelijke opwek nemen de prijsvolatiliteit en systeemrisico's toe, waardoor prikkels voor flexibiliteit sterker worden. Deze prikkels zijn echter nog slechts bij enkele processen en bedrijven voldoende om een economisch kantelpunt te bereiken waarop IDSR daadwerkelijk rendabel is.

Daarnaast is de toekomstige samenstelling van de Nederlandse industrie onzeker. Enkele energie-intensieve bedrijven reduceren hun productie of overwegen vertrek als gevolg van hoge kosten en internationale concurrentiedruk. Deze ontwikkelingen beïnvloeden zowel het toekomstige flexibiliteitspotentieel als de vraag waar flexibiliteit in het energiesysteem het meest doelmatig kan worden georganiseerd: bij productie, transport of vraag.

Wat we al weten: inzichten uit literatuur en eerdere studies

Deze verkenning is uitgevoerd in samenwerking met DNV en bouwt voort op de eerdere DNV-analyse (2020). In die studie maakte DNV in opdracht van TenneT een kwantitatieve top-down inschatting van het technisch potentieel van industriële vraagrespon (IDSR) voor gebruik in elektriciteitsmarktmodeller. De aanpak sloot aan bij eerdere inspanningen van TenneT om aannames over industriële vraagsturing in de Monitor Leveringszekerheid te verbeteren, mede geïnspireerd door de methodiek van Elia en E-CUBE (2017).

Naast de studies van TenneT en DNV is aanvullende literatuur beschikbaar over het potentieel en de belemmeringen van IDSR in Nederland (Movaris, 2014; 2016; Strategy&, 2021) en in omliggende landen (Fraunhofer ISI & FFE, 2013; DENA, 2016). Recente inzichten zijn verzameld via workshops met industriële partijen, georganiseerd door TKI Energie & Industrie (TKI E&I, 2022). Deze bronnen schetsen gezamenlijk een beeld van aanzienlijk technisch potentieel, maar wijzen ook op economische en organisatorische barrières.

Wat nog ontbreekt: waarom aanvullend onderzoek nodig is

De rol van IDSR krijgt een steeds prominenter plaats in de nieuwe Monitor Leveringszekerheid van TenneT, waarin de beschikbaarheid van flexibiliteit steeds systematischer wordt meegenomen. De bevindingen in deze TNO-verkenning kunnen bijdragen aan het verfijnen van aannames in toekomstige MLZ-edities.

De huidige kennis over procesflexibiliteit is beperkt. Informatie over responstijden, ramp rates, turndown-ratio's, herstartkosten, veiligheidsrisico's en kwaliteitsimpact is onvoldoende. Hierdoor is het lastig te bepalen welk deel van het technisch potentieel daadwerkelijk inzetbaar is.

Dit onderzoek biedt daarom een kennisbasis waarop vervolgbesluit kan voortbouwen: om helder te krijgen welke rol industriële vraagrespon realistisch kan spelen, en welke aanvullende flexibiliteit aan de aanbod en infrastructuur zijde nodig blijft.

Hoe dit onderzoek dat aanvult: aanpak en kernvragen

Deze TNO–DNV verkenning verdiept de eerdere analyse door een combinatie van literatuuronderzoek, interviews met representatieve industriële bedrijven en een koppeling met MIDDEN-procesdata. Hierdoor ontstaat een specifiek en realistischer beeld per sector van de feitelijke flexibiliteit in de Nederlandse industrie. Het rapport is verdeeld in drie onderdelen:

1. Wat zegt de literatuur?

Hoofdstuk 2 verkent het technisch en economisch potentieel van IDSR uit de literatuur en de belangrijkste barrières die daarbij worden genoemd.

2. Wat laat de praktijk zien?

Hoofdstuk 3 brengt op basis van MIDDEN data en interviews met industriële bedrijven in kaart welk deel van dat potentieel daadwerkelijk inzetbaar is, welke risico's bedrijven ervaren en welke voorwaarden zij noodzakelijk achten.

3. **Wat betekenen deze inzichten voor het energiesysteem en het beleid??**

Hoofdstuk 4 en 5 brengen de inzichten uit literatuur en praktijk samen tot een discussie en een conclusie over de realistische rol van IDSR richting 2030. De hoofdstukken benoemen de systeem- en beleidsimplicaties van deze bevindingen en schetsen welke richtinggevende keuzes en ontwerpprincipes nodig zijn om IDSR doelmatig te kunnen benutten.

Deze drie onderdelen beantwoorden samen de centrale onderzoeksvraag van dit rapport:

Wat is het technisch en economisch inzetbaar potentieel van industriële vraagrespons richting 2030, en wat is nodig om dit potentieel doelmatig te ontsluiten voor leveringszekerheid?

Deze verkenning is beleidsrelevant omdat industriële vraagrespons in de komende Monitor Leveringszekerheid en het beleidskader van KGG expliciet wordt meegewogen als mogelijke flexibiliteitsbron voor het beheersen van toekomstige adequacy-risico's.

2 Bestaande kennis en inzichten over industriële vraagrespons in Nederland

In dit hoofdstuk wordt de bestaande kennis over industriële vraagrespons (IDSR) in Nederland samengevat. De literatuur biedt een breed beeld van het technisch potentieel, de economische waarde en de belangrijkste barrières die toepassing van IDSR in de praktijk beperken. Daarnaast worden de oplossingsrichtingen besproken die in eerdere studies zijn voorgesteld om IDSR op te schalen.

Deze literatuurstudie geeft een overzicht van het technisch, economisch en operationeel potentieel van IDSR in Nederland en Europa, gebaseerd op recente rapporten van DNV GL (2020, in opdracht van TenneT), TenneT (2021), TKI Energie & Industrie (2022), TNO (2023) en Netbeheer Nederland (hierna; NBNL) (2023 & 2025). Als beleidsmatige kapstok geldt de Actieagenda Elektrificatie Industrie van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG, 2024), waarin IDSR expliciet wordt benoemd als belangrijk instrument voor het verbeteren van de leveringszekerheid. Daarnaast kan het bijdragen aan het kostenefficiënt ontsluiten van elektrificatie. De inzichten uit dit hoofdstuk ondersteunen daarmee de uitvoering van de beleidsacties rondom IDSR zoals genoemd in de Actieagenda Elektrificatie Industrie (EZK, 2024). De hier gepresenteerde bevindingen vullen dat beleidsbeeld aan met concrete praktijkinzichten over barrières en randvoorwaarden.

De toepassing van IDSR richt zich voornamelijk op energie-intensieve processen, zoals elektrolyse van chloor en zink, luchtscheiding, productie van siliciumcarbide en grote koelinstallaties. De mate waarin industriële vraagrespons mogelijk is, hangt sterk af van de technische en operationele kenmerken van deze processen.

De structuur van dit hoofdstuk volgt vier thema's:

- › Het technisch en economisch potentieel van inzetbaar vermogen per sector
- › De waarde van IDSR in het energiesysteem en op de elektriciteitsmarkt
- › Technische, economische en institutionele barrières
- › Oplossingsrichtingen in beleids- en marktmechanismen die de toepassing kunnen stimuleren

De bevindingen uit deze literatuur vormen de referentie voor de empirische analyse (MIDDEN) en de praktijkinzichten uit interviews in de daaropvolgende hoofdstukken.

2.1 Definitie industriële vraagrespons

In de Energiewet (implementatie van Richtlijn (EU) 2019/944) wordt vraagrespons gedefinieerd als:

het veranderen van het elektriciteitsverbruik van eindafnemers ten opzichte van hun normale verbruikspatronen, in reactie op marktsignalen, met als doel deze vraagverandering te verhandelen op een energiehandels- of balanceringsmarkt, veelal via een aggregator.

Deze wettelijke definitie is generiek en marktgericht en heeft primair tot doel het reguleren van marktrollen, verantwoordelijkheden en consumentenbescherming. Zij maakt geen onderscheid naar type eindafnemer en abstraheert van de technische en operationele aard van het elektriciteitsverbruik.

In dit rapport wordt deze definitie gebruikt als juridisch-contextueel referentiekader. Voor de analyse van industriële toepassingen wordt echter aangesloten bij een industrie-specifieke en operationele definitie, zoals gangbaar in de internationale literatuur (DNV GL, 2020; Agora Energiewende, 2013; TKI Energie & Industrie, 2022).

Industriële vraagrespons (IDSR) wordt in dit rapport gedefinieerd als:

het tijdelijk en doelgericht aanpassen van het elektriciteitsverbruik van industriële productielocaties ten opzichte van de normale bedrijfsvoering, in reactie op marktprijzen (zoals day-ahead of onbalansprijzen) of systeemprikkels (zoals contractuele afspraken met netbeheerders). Hierbij wordt expliciet onderscheid gemaakt tussen flexibiliteit binnen het energiesysteem van de utiliteit en flexibiliteit in het primaire productieproces.

We onderscheiden in dit rapport twee hoofdvormen van industriële vraagrespons, gebaseerd op de mate waarin flexibiliteit is ontkoppeld van het primaire productieproces:

1. Flexibiliteit binnen het energiesysteem van de utiliteit (energiesysteemflexibiliteit)

Deze vorm van industriële vraagrespons betreft het verhogen of verlagen van het elektriciteitsgebruik door aanpassingen binnen het eigen energiesysteem van de productielocatie, zonder directe invloed op het primaire productieproces of de output. De flexibiliteit wordt hier ontsloten via utiliteiten en ondersteunende systemen die functioneel losstaan van de kernproductie.

Voorbeelden zijn:

- elektrische boilers en hybride WKK-systemen;
- warmtepompen;
- elektriciteits- en warmteopslag.

Deze vormen van flexibiliteit kennen relatief beperkte operationele risico's en worden in de praktijk vaak gezien als laagdrempelige en robuuste opties voor industriële vraagrespons, met name voor contractuele afspraken met netbeheerders en korte termijn balancerings.

2. Flexibiliteit in het primaire productieproces (productieprocesflexibiliteit)

De tweede vorm betreft flexibiliteit die intrinsiek onderdeel is van het primaire productieproces en direct samenhangt met productstromen, kwaliteit en veiligheid. Deze flexibiliteit ontstaat door het tijdelijk verhogen, verlagen of stoppen van productie, of door het variabel inzetten van procesinstallaties.

Voorbeelden zijn:

- het verschuiven van batchproductie in sectoren zoals voeding, papier en chemie;
- het terug- en opregelen van elektrochemische processen (zoals chlooralkali of metaal-elektrolyse);
- het variabel inzetten van elektrische ovens;
- geplande of ongeplande productiestops bij extreme prijssignalen.

In veel gevallen kan deze flexibiliteit alleen veilig en betrouwbaar worden ontsloten door aanvullende maatregelen, zoals:

- capaciteitsuitbreiding (overdimensionering);
- opslag van tussenproducten;
- procesontkoppeling ten opzichte van vervolgprocessen.

Hoewel deze processen vaak een groter potentieel aan flexibel vermogen vertegenwoordigen, zijn de investeringskosten, technische complexiteit en operationele risico's aanzienlijk hoger dan bij energiesysteemflexibiliteit.

Impliciete en expliciete industriële vraagrespons

In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen impliciete en expliciete industriële vraagrespons. Impliciete vraagrespons betreft het reageren op marktprijsprikkel en vindt deels al plaats bij bedrijven met hoge blootstelling aan elektriciteitsprijzen. Expliciete vraagrespons betreft het reageren op externe aansturingssignalen, bijvoorbeeld via aggregators, en vereist aanvullende contractuele en organisatorische afspraken. In systeemstudies wordt impliciete vraagrespons doorgaans deels meegenomen, terwijl expliciete vraagrespons een aanvullend, nog beperkt ontsloten potentieel vormt.

Belang van dit onderscheid

Het niet expliciet onderscheiden van energiesysteemflexibiliteit en productieprocesflexibiliteit leidt in beleidsdiscussies en systeemstudies regelmatig tot overschatting van het inzetbare flexibiliteitspotentieel. Door dit onderscheid expliciet te maken, wordt duidelijk dat:

- een belangrijk deel van het korte termijn potentieel voor industriële vraagrespons ligt in flexibiliteit binnen het energiesysteem achter de meter;
- flexibiliteit in het primaire productieproces vooral relevant is voor incidentele, hoog-waardevolle inzet bij extreme schaarste en leveringszekerheidsvraagstukken;
- beide vormen fundamenteel verschillende technische risico's, investeringsdrempels en beleidsinstrumenten vereisen.

In dit rapport ligt de focus primair op flexibiliteit in het primaire productieproces, omdat deze vorm de grootste potentiële systeemimpact heeft, maar in de praktijk ook het meest wordt begrensd door operationele, economische en institutionele randvoorwaarden.

2.2 Techno-economisch potentieel voor industriële vraagrespons

Meerdere studies laten zien dat het technisch potentieel van industriële vraagrespons aanzienlijk is, maar sterk varieert per sector en proces. Zowel DNV, Agora als TNO benadrukken dat deze flexibiliteit geconcentreerd is in specifieke elektro-intensieve processen en dat operationele inzetbaarheid afhankelijk is van technische en organisatorische randvoorwaarden.

De studie van DNV GL (2020) vormt de meest gedetailleerde inventarisatie voor de Nederlandse context voor verschillende industrie sectoren. Deze analyse onderscheidt vijf tijdschalen voor inzet:

- › **1–6 uur:** batchprocessen in metaal (walsen, smelters) en voedingsmiddelen (verpakkinglijnen).
- › **6–24 uur:** processen in chemie zoals elektrolyse, lichtscheiding.
- › **24u – 1 week:** papier- en glasproductie (droging, ovens).
- › **1–3 weken:** keramiek, bulkchemie, raffinaderijen.
- › **>3 weken:** structurele afschakeling bij capaciteitsproblemen.

Het totale technische potentieel voor 2030 wordt op ca. 3.950 MW geschat. Het grootste aandeel komt van de chemische industrie (ca. 1.500 MW), gevolgd door metaal (700 MW), voeding (400 MW), papier (350 MW) en overig (1.000 MW) (zie Tabel 2.1).

Tabel 2.1: Potentiële industriële vraagrespons per sector, volgens de DNV studie (2020).

Sector	Potentieel (MW)	Typische processen	Tijdschaal inzet
Chemie	1.500	Elektrolyse, luchtverwerking	6–24 uur
Metaal	700	Walsen, smelters, elektrolyse	1–6 uur
Voeding	400	Koelhuizen, batchprocessen	1–6 uur
Papier	350	Droging, persen	24u – 1 week
Glas/Keramiek	300	Ovens	>12 uur – weken
Overig	1.000	Diverse	Afhankelijk

DNV koppelt sectorale flexibiliteit nadrukkelijk aan de onderliggende primaire processen en hun mate van elektrificeerbaarheid. In de chemie en voedingsmiddelenindustrie zijn veel processen reeds (deels) elektrisch en daardoor relatief eenvoudig te sturen, zoals pompen, transportbanden, koel- en vriesinstallaties. In raffinaderijen en de basismetallindustrie domineren daarentegen thermisch gedreven processen zoals destillatie, sinteren en smelten, die slechts beperkt te elektrificeren en te flexibiliseren zijn. Deze verschillen verklaren waarom de flexibiliteit in de chemie en voeding primair gezocht wordt in operationele sturing en verschuiving, terwijl in glas en keramiek de flexibiliteit beperkter is en vaak alleen mogelijk bij langdurige of incidentele stops.

DNV onderscheidt drie vormen van flexibiliteit in industriële processen:

- i. **productieverhuizing**, waarbij productie op een later moment wordt ingehaald;
- ii. **productieverlaging**, waarbij de output tijdelijk verminderd wordt zonder inhaalbaarheid; en

- iii. **productiestops**, waarbij processen geheel worden stilgelegd en niet wordt ingehaald. Deze typen corresponderen met verschillende tijdschalen:
 - verschuiving en verlaging zijn doorgaans inzetbaar op korte tot middellange termijn (1–24 uur),
 - terwijl productiestops vooral relevant zijn bij langdurige perioden van productieschaarste of prijsspieken (>1 dag tot enkele weken).

Het kostenprofiel verschilt sterk: productiestops en verlaging van de vraag zijn economisch het meest belastend vanwege omzetverlies, terwijl verschuiving vaak relatief beperktere kosten met zich meebrengt mits er buffers of voorraadbeheer mogelijk zijn.

De TKI E&I Whitepaper (2022) bevestigt deze verdeling en voegt praktijkcases toe, waarin bijvoorbeeld elektrolyseprocessen 20–80% van hun verbruik kunnen flexibiliseren met inzet van buffercapaciteit. Bedrijven met hybride warmtetechnologieën (e-boilers, WKK) tonen eveneens hoge flexibiliteit (TKI E&I, 2022).

In de TKI Whitepaper worden verder diverse casussen beschreven met concrete flexibiliteitspercentages. Zo behaalt Avebe met een combinatie van buffering en een e-boiler een flexibiliteit van circa 85% ten opzichte van het totale fabrieksverbruik. In de praktijk levert Nyrstar in Budel 45% flexibiliteit op een 120 MW electrolyser, en onderzoekt uitbreiding tot 75 MW (75%). Eveneens schakelt Nobian in de chloorfabriek 20% van capaciteit omhoog of omlaag als reactie op netonbalansen. Deze voorbeelden illustreren dat in de praktijk marginaal hoge flexibiliteit haalbaar is in processen met hoge elektriciteitsvraag en geschikte infrastructuur (TKI E&I, 2022). Volgens dit rapport kan het flexpotentieel in de industrie grofweg in drie categorieën worden ingedeeld:

- › **Hoog flexpotentieel:** Bedrijven met grootschalige elektrochemische processen zijn nu al grootgebruikers van elektriciteit, zoals via elektrolyse van chloor en zink. Ze kunnen theoretisch, en vaak ook in de praktijk, op korte termijn tussen 20-80% flexibiliteit leveren.
- › **Middel flexpotentieel:** bedrijven met minder sterk elektrische processen moeten vaak meerdere technieken combineren (e-boilers, (bio)WKK, eigen opwekking) om tot een substantieel flexpercentage te komen.
- › **Laag flexpotentieel:** geïntegreerde, grootschalige (petro)chemische complexen zijn vaak ontworpen op stabiele baseload en hebben zeer beperkte flexibiliteitsmogelijkheden in hun primaire processen. Enige flexibiliteit kan mogelijk zijn in de utiliteiten of ondersteunende installaties.

Deze driedeling benadrukt dat het gemiddeld flexpotentieel niet eenvoudig vast te stellen is, mede door de grote variatie in proceskarakteristieken en bedrijfssituaties (TKI E&I, 2022). De Unlocking DSR-studie van TenneT (2021) bevestigt dat industrie een substantieel aandeel in de elektriciteitsvraag heeft (26–44%), en dat IDSR in Europa potentieel 10–17% is van de totale piekvraag. Bedrijven met een hoog elektriciteitsverbruik en buffermogelijkheden, zoals in de chemie, metaal, papier en voeding, zijn volgens de studie het meest kansrijk voor flexibiliteitslevering.

Agora (2013) toont voor Zuid-Duitse industrie vergelijkbare potentiëlen met ca. 5–10% van de piekvraag inzetbaar als afschakelbaar vermogen bij koude-of windluwe winterdagen. Vooral in papier, chemie en staal blijkt operationele flexibiliteit via load shifting haalbaar. In de studie is het technisch potentieel voor vraagsturing geraamd op 450 MW bij een totaal industrieel vermogen van 620 MW, met flexibiliteit van 40–100% en een afschakelduur van 2 tot 4 uur.

De Agora-studie benadrukt dat de flexibiliteit sterk sectorspecifiek is en bepaald wordt door processtructuur en thermische gevoeligheid. Sectoren met batch- of modulaire processen (zoals chemie, voeding en metaal) kunnen vaak relatief snel reageren: compressoren, pompen en koelinstallaties kunnen binnen minuten worden afgeschakeld, met korte afroeptijden (<30 minuten). Dit maakt ze geschikt voor deelname aan korte termijnmarkten. Daarentegen kennen thermisch trage, continue processen zoals in glas en keramiek nauwelijks flexibiliteit: afschakeling vereist langdurige afkoel- en herstarttijden (tot 72 uur) en gaat gepaard met hoge kosten. Daarmee is de inzetbaarheid beperkt tot uitzonderlijke systeempieken. Dit contrast illustreert dat niet alleen het volume, maar ook de kwaliteit van flexibiliteit tussen sectoren verschilt.

De II3050 studie van NBNL (2023a) nuanceert dat niet al het technisch potentieel economisch of contractueel beschikbaar is. Afhankelijk van prijssignalen, tariefstructuren en operationele randvoorwaarden wordt op korte termijn veelal 20–30% van het technische volume geactiveerd. Verder bieden de recente NBNL-scenario's (2025) een verdere kwantificering van de inzet en kosten van industriële vraagrespons. In deze scenario's wordt vraagrespons (DSR) met name geactiveerd bij hoge elektriciteitsprijzen.

De recentere Monitor Leveringszekerheid (MLZ) studie van Tennet (TenneT, 2025) geeft hierbij aan dat de vermogens voor deze afroeprijzen zijn gebaseerd op de aanname dat zo'n 20% van het industriële vermogen beschikbaar is voor DSR (dit komt overeen met zo'n 7% van de piekvraag in Nederland).

2.3 Waarde van flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt

Flexibiliteit krijgt waarde in de elektriciteitsmarkt op momenten dat vraag en aanbod niet in balans zijn. De mate waarin flexibiliteit economisch aantrekkelijk en operationeel inzetbaar is, wordt dus direct bepaald door de marktprijzen die in zulke situaties ontstaan. Voor industriële vraagrespons is dit essentieel: bedrijven reageren niet op abstracte systeembehoeften, maar op concrete prijs- en activatiesignalen. De markt bepaalt daarmee wanneer flexibiliteit wordt gevraagd, welke vorm van flexibiliteit het eerst wordt geactiveerd, en of het loont voor de industrie om tijdelijk te schakelen. De marktwaarde van flexibiliteit laat daarmee zien waar IDSR in de praktijk kan bijdragen aan leveringszekerheid, zowel in real-time situaties als in langere perioden van schaarste.

De economische waarde van flexibiliteit hangt sterk af van de markt waarop deze wordt ingezet. Voor industriële vraagrespons (IDSR) gaat het daarbij vooral om de vraag welke prijssignalen een bedrijf kan benutten en op welke tijdschaal processen aangepast kunnen worden. Drie markten zijn relevant: de day-aheadmarkt, de intradaymarkt en de onbalans- en balanceringsmarkten.

Op de **day-aheadmarkt** worden de prijzen voor de komende 24 uur vastgesteld. Dit is de markt waar industriële partijen doorgaans het best kunnen acteren, omdat processen hier met enige voorlooptijd kunnen worden aangepast. Voor bedrijven die hun verbruik kunnen verschuiven naar uren met lagere prijzen, bijvoorbeeld door batchprocessen te herplannen of door utiliteiten anders in te zetten, vormt de day-aheadmarkt het belangrijkste signaal om flexibel te opereren. De flexibiliteit die via deze markt benut kan worden is vooral planbaar en gericht op het vermijden van hoge kosten tijdens schaarste-uren.

De **intradaymarkt** biedt bedrijven de mogelijkheid om binnen de dag nog bij te sturen. Prijzen reageren hier sterker op korte termijn schommelingen in wind en zon. Alleen processen die binnen minuten tot enkele uren op- of teruggeschakeld kunnen worden, zijn hiervoor geschikt. Voor sommige elektrochemische of compressie-intensieve processen biedt dit kansen, mits procesveiligheid en productkwaliteit dit toelaten. Voor veel andere processen, zeker thermische en chemisch doorlopende installaties, is de intradaymarkt te dynamisch om veilig en betrouwbaar op te reageren.

De **onbalans- en balanceringsmarkten** functioneren op de kortste tijdschalen: van seconden tot minuten. Ze zijn ontworpen om onverwachte afwijkingen tussen vraag en aanbod in real-time te corrigeren. Slechts een beperkt deel van de industrie kan voldoen aan de technische eisen die deze markten stellen, zoals snelle responstijden, continue beschikbaarheid en nauwkeurige verificatie. Deelname is daarom vooral weggelegd voor specifieke processen die intrinsiek snel kunnen regelen, zoals bepaalde elektrolyse- en compressorinstallaties. De overgrote meerderheid van het IDSR potentieel is hiervoor niet geschikt.

Daarmee ontstaat een helder beeld: industriële vraagrespons komt vooral tot zijn recht op de day-aheadmarkt, en in mindere mate op de intradaymarkt. Balanceringsmarkten vormen een niche waarin slechts enkele sectoren operationeel kunnen deelnemen. Juist in uren van schaarste, wanneer prijzen oplopen en vraag het aanbod overstijgt, kan IDSR waardevol zijn, omdat alternatieve flexibiliteitsopties in zulke uren meestal beperkt beschikbaar zijn. De markt bepaalt dan waar de flexibiliteit het best tot zijn recht komt, maar de technische en operationele eigenschappen van industriële processen bepalen uiteindelijk waar IDSR in de praktijk werkelijk inzetbaar is.

Activatieprijzen van netbeheerders

In Nederland worden ‘activatieprijzen’, ofwel prijsprikkels, voor flexibiliteit door netbeheerders voornamelijk toegepast binnen congestiemanagement. Bedrijven die hun elektriciteitsverbruik tijdelijk kunnen reduceren of verplaatsen, kunnen via contracten een vergoeding ontvangen voor de beschikbaarheid (€/kW) en/of daadwerkelijke activatie (€/MWh) van flexibel vermogen. De exacte prijsstelling varieert per netgebied en wordt bepaald via biedprocedures, waarin partijen aangeven tegen welke vergoeding zij bereid zijn af te schakelen. De Autoriteit Consument & Markt (ACM) en Netbeheer Nederland hebben kaders opgesteld waarin deze vergoedingen worden afgestemd op transparantie, non-discriminatie en doelmatigheid (ACM, 2023a; Netbeheer Nederland, 2023a). De prikkels worden de komende jaren versterkt via tijdsafhankelijke transporttarieven en proeftuinen met flexibele aansluitcontracten, zodat industriële gebruikers die hun belasting actief sturen, ook financieel voordeel kunnen behalen (Netbeheer Nederland, 2024).

Biedladders in systeemstudies

In systeemstudies naar flexibiliteit, zoals van TNO (2023) en Netbeheer Nederland (2023b), wordt vaak gewerkt met biedladders om het aanbod van vraagrespons te modelleren. Hierbij wordt aangenomen dat flexibiliteit in stappen (‘tranches’) beschikbaar komt bij oplopende activeringskosten: eenvoudig aanpasbare processen bieden laaggeprijsde flexibiliteit (bijv. €50–€100/MWh), terwijl energie-intensieve of continu draaiende installaties pas bij hogere vergoedingen (tot >€500/MWh) reageren. Dit principe weerspiegelt hoe netbeheerders in congestiemanagement en marktstudies bepalen welke bronnen het eerst worden geactiveerd. Voor industriële vraagrespons betekent dit dat de positie van een bedrijf op de biedladder, bepaald door de technische aanpasbaarheid en de interne kosten van productieonderbreking, direct de kans op activatie en de verwachte vergoeding bepaalt (TNO, 2023; DNV GL, 2020; Netbeheer Nederland 2023c). De afroeprijzen van Netbeheer

Nederland scenario's liggen hierbij tussen de 300 €/MWh voor datacenters en 500 €/MWh voor de chemie, oplopend tot 850 €/MWh voor de metaalsector en zelfs 2.000 €/MWh voor overige industrie. (TenneT, 2025) heeft afroeprijzen voor 2030 van 230 €/MWh in prijsblok 1 tot 4150 €/MWh in prijsblok 4.

Waarde van flexibiliteit

De geschatte marktparticipatie van zo'n 700 MW voor 2020 is een klein deel van het theoretisch potentieel van 3400 MW (DNV GL, 2020). DNV schat dit theoretisch potentieel voor 2030 op zo'n 4000 MW. In het meest extreme geval wordt hiervan in 2030, 1900 MW gelijktijdig ingezet. DNV schat de jaarlijkse systeemkostenbesparing door IDSR in NW-Europa op ca. €50 miljoen in 2035. In Nederland wordt de gemiddelde elektriciteitsprijs met ~€2/MWh verlaagd door inzet van 1–2 GW aan IDSR.

Er valt een grote variatie in berekende biedprijzen van DNV te zien, uiteenlopend van 59 EUR/MWh tot 8335 EUR/MWh. 41% van de berekende prijzen ligt boven de 'price cap' van 3000 EUR/MWh uit 2020. Sinds 2022 is deze 'price cap' verhoogt naar 4000 EUR/MWh, wat het percentage biedprijzen van industriële vraagresponso's uit de DNV studie zal verlagen. Deze TNO studie gaat daar echter niet kwantitatief op in, maar is een nieuwe analyse waardig. TenneT (2021) benadrukt dat IDSR aantrekkelijker is voor incidentele piekmomenten dan voor continue inzet. De waarde zit vooral in het vermijden van onbalans- of noodvermogen bij structurele netbelasting (TenneT, 2021). Volgens TenneT (2021) groeit het Europese IDSR-potentieel van ca. 100 GW in 2019 naar 160 GW in 2030, waarvan momenteel al een vijfde actief wordt ingezet. Daarmee vertegenwoordigt IDSR een groot technisch potentieel voor flexibiliteit die vergelijkbaar is met de huidige totale opwekkingscapaciteit van landen als Nederland en Frankrijk samen.

De Agora-studie (2013) toont dat IDSR ook op regionaal niveau waardevol is. In Zuid-Duitse regio's blijkt een potentieel van 5–10% van de industriële piekvraag beschikbaar te zijn als afschakelbaar vermogen. Deze inzet draagt bij aan netstabiliteit en vermijdt investeringen in extra netverzwaring of noodvermogen. Agora benadrukt bovendien dat deze waarde alleen ontsloten wordt wanneer flexibiliteit expliciet wordt gewaardeerd in marktmechanismen en via stabiele vergoedingsstructuren voor bedrijven.

Voor netbeheerders is het van belang om goed inzicht te hebben over hoe IDSR in de toekomst substantieel kan bijdragen aan systeembalans en leveringszekerheid, mits beleidsmatig en technologisch gefaciliteerd. De NBNL scenario's (NBNL, 2025) bevestigen dat industriële vraagresponso's op langere termijn kan uitgroeien tot een relatief betaalbaar flexibiliteitsmiddel. Zo verwacht NBNL dat de transitie naar flexibeler industriële processen, mede ingegeven door volatielere elektriciteitsprijzen, kan leiden tot 300–600 vollasturen per jaar, wat neerkomt op een flexibele bijdrage van 2–4 TWh richting 2050.

Samenvattend laten de geraadpleegde studies zien dat het technisch potentieel voor industriële vraagresponso's aanzienlijk is, met name in de sectoren chemie en basismetalen. Tegelijkertijd lopen de schattingen uiteen, afhankelijk van de gehanteerde aannames over procesflexibiliteit, economische prikkels en responstijden. Waar DNV GL (2020) en TenneT (2021) een nadruk leggen op systeemwaarde en leveringszekerheid, richten Movaris (2016) en Strategy& (2021) zich sterker op de bedrijfseconomische haalbaarheid. Deze verschillen laten zien dat het potentieel van IDSR niet alleen technisch, maar vooral contextafhankelijk is. In het volgende subhoofdstuk wordt daarom ingezoomd op de barrières die in de literatuur en praktijk worden genoemd als verklaring voor de beperkte toepassing van IDSR tot nu toe.

2.4 Barrières voor grootschalige toepassing van industriële vraagrespons

De literatuur en praktijkervaringen laten zien dat de opschaling van industriële vraagrespons (IDSR) in Nederland wordt belemmerd door een combinatie van technische, economische, regulatoire en marktgerelateerde factoren. De Actieagenda Elektrificatie Industrie (KGG) wijst er bovendien op dat het volledige benutten van het potentieel van industriële vraagrespons kan leiden tot een reductie van de piekvraag van elektriciteit in Nederland met wel 17% op basis van (Strategy&PWC, Unlocking DSR). Dit benadrukt enerzijds de aanzienlijke systeemwaarde van IDSR, maar illustreert anderzijds dat het huidige potentieel nog grotendeels onbenut blijft door de belemmeringen die in de literatuur breed worden signaleerd.

TKI E&I (2022) waarschuwt dat de variatie in technologische opties, procesrandvoorwaarden en bedrijfscontexten het moeilijk maakt om één generiek flexpercentage te geven voor de procesindustrie. De cases die worden bestudeerd wisselen van zeer lage tot bijna volledige flexibiliteit, wat de interpretatie bemoeilijkt. Bovendien vergt flexibilisering investeringen in overcapaciteit of buffers die slechts periodiek benut worden. Dergelijke onzekerheden in parameters zoals prijssignalen, netcapaciteit en terugverdiendtijd maken flexibiliteit casussen complex en risicovol.

Technische beperkingen

Veel industriële processen zijn ontworpen voor continue productie en kennen beperkte mogelijkheden tot flexibilisering. Voorbeelden zijn de glas-, raffinage- en keramiekindustrie, waar thermische continuïteit essentieel is (DNV GL, 2020). Ook chemisch gevoelige processen lopen risico op kwaliteitsverlies, productieverlies of schade bij frequente op- en afschakeling. Het realiseren van flexibiliteit vereist vaak aanzienlijke investeringen in buffers, hybride technologieën of aanpassingen in de productieplanning (TKI E&I, 2022). Voor nieuwe elektrificatietechnieken geldt bovendien dat flexibel opereren technisch en operationeel nog uitdagend is.

Economische barrières

Een terugkerend knelpunt in de Nederlandse literatuur betreft de contractuele rigiditeit binnen industriële ketens. TNO (2023) benadrukt dat veel productiebedrijven gebonden zijn aan langlopende leveringscontracten, afnameverplichtingen en kwaliteitsgaranties die weinig ruimte laten voor flexibele aanpassing van het energieverbruik. Afwijken van de afgesproken productieschema's kan leiden tot contractuele sancties of economische schade door gemiste leveringen. Ook ontbreekt in de meeste contracten een expliciete clause over energieflexibiliteit, waardoor juridische onzekerheid bestaat over verantwoordelijkheid bij onvoorziene stilstanden of uitgestelde levering. Vergelijkbare knelpunten worden in Strategy&PwC (2021) en TKI Energie & Industrie (2022) benoemd als onderdeel van de bredere categorie van risicoaversie en ontbrekende marktstandaardcontracten. Hierdoor vormt de contractuele context voor veel industriële partijen een belangrijk obstakel om flexibel vermogen beschikbaar te stellen, ook als de technische mogelijkheden aanwezig zijn.

De kosten van flexibiliteit verschillen sterk per sector. Voor de chemie en metaal liggen de marginale kosten van afschakeling tussen €100–300 per MWh, terwijl dit voor papier, voeding en glas kan oplopen tot €300–600 (DNV GL, 2020). Een robuuste businesscase ontbreekt vaak door onzekerheid over de frequentie en hoogte van vergoedingen, evenals het ontbreken van secundaire inkomstenstromen (TenneT, 2021). Daarnaast speelt de huidige transporttariefstructuur een beperkende rol. In de meeste regionale netten betalen

grootverbruikers transportkosten op basis van hun gecontracteerde en maximaal gemeten vermogen. Korte pieken in afname kunnen daardoor leiden tot disproportioneel hoge kosten, waardoor vraagsturing financieel onaantrekkelijk wordt (ACM, 2023b). Dit effect wordt versterkt door het relatief hoge niveau van Nederlandse nettarieven in vergelijking met buurlanden (TenneT, 2021).

De scenariostudies van NBNL (NBNL, 2023, pp. 46–48; NBNL, 2025, pp. 57–63) bevestigen de bandbreedtes van DNV, maar tonen een breder kostenprofiel naarmate elektrificatie toeneemt. In beide rapporten worden flexibiliteitsopties gemodelleerd via biedladders met stijgende activatiekosten: eenvoudig verschuifbare processen onder €100–300/MWh, matig flexibele processen tot circa €600/MWh, en een dure staart boven €1.000/MWh voor thermisch continue installaties. In extreme schaarste situaties kunnen marginale kosten effectief boven €5.000/MWh uitkomen, in lijn met de historische prijscaps op de onbalansmarkt (tot eind 2023 begrensd op €9.999,99/MWh; sinds 2024 geharmoniseerd op ±€15.000/MWh, zie ENTSO-E 2024). NBNL (2025) benadrukt dat de maatschappelijke waarde van flexibiliteit stijgt met toenemende activeringsfrequentie, maar dat de dure staart van de ladder in de praktijk beperkt blijft door proces- en contractrisico's.

De inzetbaarheid van IDSR wordt grotendeels bepaald door het type proces en het daaraan gekoppelde productieverlies. Agora Energiewende (2013) onderscheidt productieverhuizing, waarbij gemiste output later kan worden ingehaald, en productiestops, waarbij productie volledig stilvalt met directe economische schade. In batchprocessen (zoals voeding, papier en niet-continue chemie) volstaat doorgaans compensatie van de gemiste winstmarge of extra productiekosten om flexibiliteit rendabel te maken. In continue processen (zoals glas, keramiek en raffinage) leidt afschakeling tot een volledige productiestop, waarvoor een vergoeding ter hoogte van de dagomzet inclusief vaste kosten (circa 125%) noodzakelijk is. Dit verklaart waarom biedprijzen in continue sectoren substantieel hoger liggen (>€600/MWh) dan in meer verschuifbare sectoren als chemie of metaal (€150–€350/MWh).

Keten- en contractafhankelijkheden

Een belangrijke barrière die DNV (2025) benadrukt is de sterke ketenafhankelijkheid van industriële productie. Wanneer één schakel in de waardeketen afschaalt of stopt, raken downstream processen direct in de problemen, wat aanvullende compensatie of herplanning vereist. Vooral productiestops blijken daardoor slechts zeer beperkt inzetbaar: naast hoge kosten door omzetverlies (in sommige sectoren meer dan 125% van de dagomzet) kennen veel thermische en chemische processen lange af- en inschakeltijden die kunnen oplopen tot meerdere dagen of zelfs weken. Binnen veel industriële ketens laten contractuele leveringsverplichtingen, logistieke afspraken, just-in-time-processen en beperkte buffercapaciteit bovendien weinig ruimte voor vraagsturing op korte tijdschalen. Hierdoor vormt ketenafhankelijkheid in de praktijk een zwaardere beperking dan de directe technische mogelijkheden van afzonderlijke installaties: flexibiliteit kan pas worden gerealiseerd wanneer hele ketens meebewegen, niet slechts één fabriek.

Infrastructuur uitbreiding

Voldoende netinfrastructuur capaciteit wordt gezien als een randvoorwaarde voor industriële elektrificering en daarmee voor het ontsluiten van industriële vraagresponst ten behoeve van leveringszekerheid. Tegelijkertijd zorgt het niet vergroten van elektriciteitsvraag ook voor minder behoefte aan flexibiliteit, in het kader van leveringszekerheid. In perioden van lage hernieuwbare productie, zijn naast vraagresponst ook andere flexibiliteitsopties beschikbaar. Industriële vraagresponst kan daarbij een deel van de benodigde flexibiliteit kostenefficiënt afdekken. Wanneer dit potentieel ontbreekt, neemt de afhankelijkheid toe van alternatieven,

vaak kapitaalintensievere flexibiliteitsopties, wat de kosten van het borgen van leveringszekerheid kan verhogen.

Het wegnemen van belemmeringen voor elektrificatie vergroot niet alleen het aanbod van industriële vraagrespons, maar leidt ook tot een grotere behoefte aan flexibiliteit in het systeem. Netcongestie beïnvloedt daarmee zowel de potentiële bijdrage van IDSR als de systeemvraag naar flexibiliteit.

Regulering en beleid

Bestaande beleidsinstrumenten stimuleren doorgaans continu verbruik in plaats van flexibiliteit. Zo bieden huidige netwerktarieven kortingen bij hoge vollaasten, wat contraproductief werkt voor bedrijven die flexibel willen opereren (TenneT, 2021). Flexibiliteit wordt bovendien onvoldoende erkend in subsidies zoals de SDE++, waardoor investeringen in flexibele assets buiten de boot vallen (TKI E&I, 2022). Daarbij is er vaak onvoldoende aandacht voor sectorspecifieke proceskenmerken, zoals minimale afschakelduren of opstartverliezen, wat de implementatie bemoeilijkt. In bredere zin ontbreekt consistent beleid en blijft onzekerheid bestaan over de toekomstige energiemix en infrastructuur (bijv. kerncentrales), wat investeringsbereidheid remt.

Marktontwerp en kennis

Het huidige marktontwerp stelt specifieke technische en organisatorische vereisten aan deelname aan balancerings- en capaciteitsmarkten, zoals real-time metering, verificatie en prekwificatie (TenneT, 2025). Deze vereisten zijn functioneel vanuit systeembetrouwbaarheid, maar worden door met name industriële partijen met procesgebonden flexibiliteit als complex en kostbaar ervaren. De ervaren drempel hangt daarbij niet zozeer samen met de strengheid van de eisen op zichzelf, maar met de benodigde investeringen, organisatorische aanpassingen en onzekerheid over de terugverdienmogelijkheden. Voor veel industriële bedrijven heeft marktoptimalisatie geen prioriteit, omdat hun primaire aandacht uitgaat naar veiligheid, leverbetrouwbaarheid, kwaliteit en kostenbeheersing. Hierdoor blijft interne marktkennis beperkt en is aansluiting bij marktproducten of prikkels niet vanzelfsprekend.

TenneT (2021) identificeert vier voorwaarden voor bredere toepassing van industriële vraagrespons: toegankelijke markttoegang (eventueel via aggregators), transparante en voorspelbare prijsprikkels, actieve betrokkenheid van bedrijven en proportionele meet- en verificatie-eisen in relatie tot de waarde van de geleverde flexibiliteit. Zonder verdere standaardisatie van producten en duidelijkheid over vergoedingen blijft deelname aan met name balanceringsmarkten zoals aFRR en FCR voor veel industriële partijen beperkt.

De businesscase voor industriële vraagrespons is echter niet uitsluitend afhankelijk van balanceringsmarkten. Deze markten raken in toenemende mate verzadigd met batterijopslag, terwijl het grootste potentieel voor industriële vraagrespons ligt in load shifting en load shedding op basis van groothandelsmarktprijzen (day-ahead en intraday). Hiervoor zijn vooral transparante prijsprikkels, voorspelbare marktsignalen en passende contractvormen van belang.

Hoofdboodschap: Veel bedrijven beschikken momenteel nog over onvoldoende kennis van deze verdienmodellen en de bijbehorende technische mogelijkheden, wat grootschalige toepassing van industriële vraagrespons verder beperkt.

2.5 Oplossingsrichtingen voor grootschalige toepassing van industriële vraagrespons

De literatuur wijst op een breed palet aan oplossingsrichtingen om de toepassing van industriële vraagrespons (IDSR) in Nederland te vergroten. Deze variëren van beleidsaanpassingen en marktontwerp tot technologische innovaties, infrastructuurontwikkeling en kennisdeling. De verantwoordelijkheid voor flexibiliteit is verdeeld: de overheid bepaalt de kaders en publieke belangen (leveringszekerheid, systeemkosten), netbeheerders zijn verantwoordelijk voor de operationele inzet en borging van flexibiliteit op het net, en industriële partijen leveren flexibiliteit wanneer dit economisch en operationeel haalbaar is. Waar deze verantwoordelijkheden elkaar raken, is aanvullende coördinatie nodig.

Beleidsmaatregelen en marktontwerp

Een belangrijke oplossingsrichting ligt in verdere verfijning van het beleidskader en marktontwerp. Eerdere literatuur (TNO, 2023) wijst op de potentie van gebiedsgerichte flexibiliteitscontracten, waarbij netbeheerders op specifieke locaties flexibiliteit inkopen bij industriële gebruikers om lokale netbelasting te beheersen. Dergelijke contractvormen kunnen, mits zorgvuldig vormgegeven, een kostenefficiënte aanvulling vormen op fysieke netverzwaring.

Daarnaast benadrukt (TKI E&I, 2022) het belang van prikkels die bedrijven stimuleren hun elektriciteitsvraag af te stemmen op de belasting van het net. Voor TenneT-aangesloten grootverbruikers bevat het huidige tariefsysteem reeds een gewogen en deels dynamische component op basis van netbelasting. De effectiviteit van deze prikkels voor het ontsluiten van flexibiliteit hangt echter af van de mate waarin zij voldoende transparant, voorspelbaar en onderscheidend zijn ten opzichte van andere kostencomponenten. Zonder duidelijke en tijdig communiceerbare signalen blijft het voor bedrijven lastig om investeringen in flexibiliteit structureel te rechtvaardigen.

Internationale voorbeelden laten zien dat beleidsprogramma's cruciaal zijn om IDSR te stimuleren. De literatuur benadrukt daarnaast de rol van aggregators als intermediair: zij kunnen kleinere of minder flexibele installaties bundelen, markttoegang regelen en risico's overnemen. Programma's als Flex Assure in het VK laten zien dat kwaliteitsstandaarden en certificering belangrijk zijn voor vertrouwen in deze markt. (TenneT, 2021). Verder adviseert Strategy&PWC (2021) om markttoegang te vergemakkelijken door producten op de onbalans- en capaciteitsmarkten te vereenvoudigen en de rol van aggregators wettelijk te verankeren. Inmiddels wordt de rol van aggregators in de nieuwe Energiewet (in werking vanaf 2026) wettelijk verankerd via specifieke bepalingen over aggregatieovereenkomsten (artikel 2.34). Met de nieuwe Energiewet wordt de rol van onafhankelijke aggregators formeel verankerd, waardoor zij een grotere rol kunnen spelen bij het ontsluiten van IDSR voor zowel marktproducten als leveringszekerheidsvraagstukken. Daarmee wordt een belangrijke stap gezet richting markttoegang, al moeten de uitvoeringsregels over allocatiepunten, datatoegang en toezicht nog verder worden uitgewerkt (Eerste Kamer, 2025).

Ook het ontwikkelen van capaciteitsmechanismen en garantieregelingen wordt genoemd als optie om investeringsrisico's te verlagen en de leveringszekerheid op lange termijn te versterken. In eerdere analyses (TNO, 2020; TKI, 2021) wordt het invoeren van kW-gebaseerde tariefprikkels voorgesteld om industriële vraagrespons te stimuleren, bijvoorbeeld door lagere tarieven toe te passen wanneer er tijdelijk netruimte beschikbaar is. In recentere beleidsdiscussies, zoals de Actieagenda Elektrificatie Industrie (Ministerie van

EZK, 2025), wordt deze richting verder uitgewerkt in de vorm van niet-vaste of “non-firm” aansluit- en transportcontracten, waarmee industriële gebruikers hun flexibiliteit kunnen inzetten als alternatief voor fysieke netverzwaring. Daarnaast wordt het aanpassen van de SDE++ met gerichte tenders of sectorale beschotting genoemd als middel om complexe elektrificatieprojecten beter te ondersteunen.

Tot slot kan standaardisatie van flexibiliteitsproducten naar inzetduur, afroeptermijn en markttoepassing de markttoegang vereenvoudigen en vertrouwen opbouwen (Agora, 2013). De Agora-analyse laat zien dat een sectorspecifieke benadering van beleids- en marktmechanismen essentieel is. Contractvormen en flexproducten zouden moeten differentiëren naar inzetduur, responstijd en type flexibiliteit (schaalbaar, stapsgewijs of binair). Alleen door rekening te houden met deze proceskenmerken kunnen de juiste prikkels worden gecreëerd om zowel snel inzetbare flexibiliteit (bijv. compressoren, koeling) als incidentele maar waardevolle capaciteit (bijv. ovens) effectief in te zetten. Een onbeantwoorde vraag is of bedrijven zelf moeten ontdekken hoe zij flexibiliteit moeten leveren, of dat aanvullende ondersteuning, standaardisatie en coördinatie nodig is om flexibiliteit op een kosteneffectieve manier beschikbaar te maken.

Infrastructuur

Een belangrijk deel van de huidige belemmeringen voor industriële vraagrespons ligt in de beperkte infrastructuurcapaciteit en het ontbreken van gecoördineerde ontwikkeling tussen opwek, net en vraag. De uitbreiding van de elektriciteitsinfrastructuur die gepaard gaat met de Wind op Zee-agenda hangt direct samen met de mate waarin flexibiliteit aan de vraagzijde, met name vanuit de industrie, kan worden ontsloten. Om overbelasting van het net te voorkomen en investeringen doelmatig te richten, is het van belang dat aanbod (wind op zee), infrastructuurontwikkeling en industriële elektrificatie gelijktijdig worden gepland. De gebiedsgerichte en centraal gecoördineerde werkwijze van Wind op Zee laat zien hoe geïntegreerde planning kan leiden tot snellere realisatie en betere benutting van infrastructuur. Toepassing van een vergelijkbare aanpak op land, bijvoorbeeld in industriële clusters zoals Rotterdam-Moerdijk, kan bijdragen aan het afstemmen van nieuwe opwekcapaciteit en transportinfrastructuur op de beschikbare industriële vraagrespons. Zo ontstaat een meer gebalanceerde ontwikkeling van het energiesysteem, waarin IDSR een structurele rol speelt bij het efficiënt en betrouwbaar integreren van grootschalige hernieuwbare elektriciteit.

Daarnaast wordt door verschillende partijen (TenneT, 2023; ACM, 2022; Netbeheer Nederland, 2023) gepleit voor een verruiming van de structurele toepassing van congestiemanagement, mits dit aantoonbaar maatschappelijk kostenefficiënter is dan fysieke netverzwaring. Deze partijen benadrukken dat een duidelijk afwegingskader nodig is waarin zowel de betrouwbaarheid van het systeem als de economische efficiëntie worden geborgd. Een dergelijke structurele benadering van congestiemanagement kan bovendien de waarde van industriële vraagrespons versterken, doordat flexibiliteit beter kan worden verankerd in de planning en exploitatie van het elektriciteitsnet. Standaardisatie van flexibiliteitsproducten en contractvormen speelt hierbij een sleutelrol: het maakt de afweging tussen procescontinuïteit en flexibiliteit inzichtelijk, en creëert vergelijkbare voorwaarden voor bedrijven binnen en tussen clusters. Een onderbelicht punt is hoe flexibiliteit zich verhoudt tot investeringszekerheid voor industrie. Waar grote productielocaties geen mobiliteitsoptie hebben, kan een vorm van ‘take-or-pay’-zekerheid een noodzakelijke randvoorwaarde zijn om flexibiliteit te combineren met investeringsbereidheid.

Technologische interventies

Op technologisch vlak kan de inzet van flexibele elektrificatietechnologieën de praktische

toepasbaarheid van industriële vraagrespons aanzienlijk vergroten. In het Whitepaper Industriële Flexibiliteit (TKI Energie & Industrie, 2022) worden onder meer elektrische boilers, hybride compressoren, warmtepompen en modulaire elektrolyzers genoemd als technologieën die relatief snel en gecontroleerd kunnen reageren op marktsignalen. Naast IDSR kan ook hogetemperatuur warmteopslag (HT-warmteopslag) in de industrie een waardevolle rol spelen: volgens (TNO, 2025) kan industriële warmteopslag, via bijvoorbeeld ondergrondse of thermische buffers, seizoens- of meerdaagse flexibiliteit bieden, waardoor overtollige duurzame elektriciteit of restwarmte kan worden opgeslagen en ingezet tijdens perioden van lage hernieuwbare productie. De Routekaart Elektrificatie in de Industrie (TNO & TKI E&I, 2021) benadrukt dat vooral modulaire en dynamisch aanstuurbare elektrolyse-installaties kansen bieden voor regelbare elektriciteitsvraag in clusters met wind- en zonne-opwek.

Daarnaast benadrukt TNO (2023) dat verdere ontwikkeling van slimme sturing en voorspellende algoritmen kan helpen om industriële processen beter af te stemmen op de behoeften van het energiesysteem. Voorbeelden zijn *model predictive control*, AI-ondersteunde optimalisatie en de koppeling van processturing met markt- en weersvoorspellingen. Deze digitale aansturing maakt het mogelijk om flexibiliteit te benutten zonder concessies aan productkwaliteit, veiligheid of leveringszekerheid. Zo vormt digitalisering een belangrijke schakel tussen technologische mogelijkheden in de industrie en de marktvraag naar flexibiliteit. TNO maakt hierbij onderscheid tussen ‘enabling’ en ‘optimising’ oplossingen. Enabling-oplossingen maken flexibiliteit überhaupt mogelijk (zoals modulaire elektrolyzers, elektrische boilers of HT-opslag), terwijl optimising-oplossingen de inzet van flexibiliteit verbeteren binnen bestaande processen (zoals model predictive control en AI-gestuurde optimalisatie). Beide zijn nodig, maar zonder enabling-technologieën blijft het praktische IDSR-potentieel beperkt.

Kennisontwikkeling en beleidszekerheid

Naast technische en beleidsmatige maatregelen is kennisontwikkeling een cruciale randvoorwaarde. Zowel TenneT (2021) als TKI E&I (2022) benadrukken het belang van sectorale programma’s en pilotprojecten waarin bedrijven, netbeheerders en beleidsmakers ervaring kunnen opdoen met flexibiliteit. Dergelijke initiatieven kunnen dienen als leeromgeving en best practices breed beschikbaar maken. Transparantie over de behoefte aan flexibiliteit, het verdienpotentieel en de benodigde investeringen kan bedrijven helpen beter geïnformeerde beslissingen te nemen. Bovendien is beleidszekerheid essentieel: heldere doelen voor industriële elektrificatie richting 2030 en verder kunnen investeringsbereidheid vergroten. Regelluwe zones kunnen ruimte bieden voor experimenten met nieuwe marktmodellen en prikkels. Verder is voor veel bedrijven, met name in de procesindustrie, de locatie gebonden aan infrastructuur, vergunningen en fysieke ketens. Hierdoor hebben zij weinig strategische flexibiliteit om zich naar andere regio’s te verplaatsen wanneer netcapaciteit schaars is; dit maakt voorspelbaar beleid en infrastructuurplanning essentieel.

De inzichten suggereren dat beleid en marktmechanismen niet generiek op “industrie” gericht kunnen zijn, maar rekening moeten houden met proces- en plantgrootte. Het meeste potentieel ligt in kleinere installaties die sneller en goedkoper kunnen schakelen (bijvoorbeeld textiel en bepaalde voedingsmiddelen), of in niet-kritische eindproducten waar productie-uitstel weinig risico oplevert. Voor kapitaalintensieve continue processen zijn daarentegen sectorspecifieke contractvormen nodig die de hoge stilstand kosten afdekken en de langere afschakelduur reflecteren.

2.6 Internationaal perspectief voor IDSR inzet

Internationale literatuur laat zien dat industriële vraagrespons (IDSR) in veel elektriciteitssystemen wordt gezien als een potentieel kostenefficiënte aanvulling op conventionele flexibiliteitsopties, maar dat de mate waarin dit potentieel daadwerkelijk wordt ontsloten sterk afhankelijk is van marktorientatie en beleidskeuzes. In verschillende landen is vraagrespons formeel toegelaten tot elektriciteitsmarkten en ondersteunende mechanismen, maar blijft structurele en grootschalige participatie in de praktijk beperkt (Agora Energiewende, 2013; DNV & smartEn, 2022).

In landen met capaciteitsmechanismen, zoals België en het Verenigd Koninkrijk, komt vraagrespons in principe in aanmerking als capaciteitsbron. Evaluaties laten echter zien dat het aandeel daadwerkelijk gecontracteerde vraagrespons relatief beperkt blijft ten opzichte van het theoretisch potentieel. Dit wordt onder meer toegeschreven aan de complexiteit van capaciteitsproducten voor vraagzijde-assets, waaronder strikte beschikbaarheidsverplichtingen, monitoring- en verificatie-eisen en de moeilijkheid om probabilistische beschikbaarheid van vraagrespons te vertalen naar deterministische capaciteitsverplichtingen (CREG, 2021; Elia, 2022). In de Belgische capaciteitsmarkt wordt vraagrespons daardoor vaak wel impliciet meegenomen in adequacy-analyses, terwijl actieve deelname aan veilingen beperkt blijft.

Andere internationale ervaringen, onder meer in Frankrijk en de Verenigde Staten, wijzen erop dat IDSR effectiever kan worden ontsloten via energie- en balanceringsmarkten met duidelijke en voorspelbare prijsprikkels en productdefinities die aansluiten bij procesgebonden flexibiliteit. Met name deelname aan day-ahead en intraday markten, aangevuld met balanceringsproducten met proportionele eisen, blijkt beter aan te sluiten bij de operationele kenmerken van industriële processen (Agora Energiewende, 2015; DNV & smartEn, 2022). Aggregatie speelt hierbij een cruciale rol om schaalvoordelen te realiseren en transactiekosten te beperken.

De internationale literatuur concludeert daarmee dat IDSR vooral functioneert als aanvullende flexibiliteitsoptie binnen het elektriciteitssysteem en minder geschikt is als volwaardige vervanging van regelbaar vermogen binnen capaciteitsmechanismen. Beleidsmaatregelen die de inzet van IDSR ondersteunen richten zich primair op transparante prijsprikkels, proportionele productvereisten, duidelijke allocatie van verantwoordelijkheden en het beperken van vaste toetredingskosten. Tegelijkertijd benadrukken internationale ervaringen het belang van realistische aannames over de omvang en betrouwbaarheid van IDSR bij analyses van leveringszekerheid.

Implicaties en vergelijking met Nederland

De internationale ervaringen zijn in belangrijke mate relevant voor de Nederlandse context. Net als in andere landen is industriële vraagrespons in Nederland formeel toegestaan binnen energie- en balanceringsmarkten, en kan deze via aggregatie en portfolio-afrekening worden ingezet. Tegelijkertijd kent Nederland momenteel geen expliciet capaciteitsmechanisme, waardoor de rol van IDSR in leveringszekerheid primair via marktprijzen en balanceringsprikkels tot stand komt.

Dit sluit aan bij internationale bevindingen dat IDSR beter tot zijn recht komt in energie- en balanceringsmarkten dan in klassieke capaciteitsmarkten. Mocht Nederland in de toekomst overwegen aanvullende adequacy-instrumenten te introduceren, dan laten internationale ervaringen zien dat actieve deelname van IDSR aan capaciteitsmechanismen niet vanzelfsprekend is en gepaard gaat met aanzienlijke uitvoeringscomplexiteit. Voor de

Nederlandse situatie impliceert dit dat IDSR vooral moet worden beschouwd als een kostenefficiënte, maar beperkte en probabilistische bijdrage aan leveringszekerheid, en dat structurele adequacy-oplossingen primair gezocht moeten worden in regelbaar vermogen, opslag en netontwikkeling.

2.7 Conclusie

De literatuur laat zien dat de groei van hernieuwbare opwek de vraag naar flexibiliteit sterk vergroot en dat industriële vraagrespons daarbij een potentiële rol kan spelen. Er bestaan echter grote verschillen in hoe studies het potentieel van IDSR inschatten. De variatie in deze cijfers komt vooral door verschillen in definities, aannames en systeemgrenzen.

Tegelijkertijd wordt duidelijk dat er een aanzienlijke kloof bestaat tussen theoretisch potentieel en operationele inzetbaarheid. Waar de literatuur hoge volumes suggereert, blijkt uit de praktijk dat slechts een beperkt deel van het industriële vermogen daadwerkelijk flexibel kan worden ingezet. Deze onzekerheid creëert risico's: wanneer vraagzijdeflexibiliteit minder beschikbaar blijkt dan gedacht, neemt de druk op andere flexibiliteitsopties toe, en daarmee ook het risico op schaarste en hoge systeemkosten. Flexibiliteit aan de aanbodzijde kan een alternatief zijn, maar ook daarvoor is nog geen duidelijk kader dat kosten, effecten en verantwoordelijkheden systematisch afweegt. De literatuur biedt bovendien nog geen systematische vergelijking tussen vraagzijdeflexibiliteit en aanbodzijde flexibiliteit opties (zoals opslag en regelbaar vermogen), waardoor onduidelijk blijft waar flexibiliteit maatschappelijk het meest doelmatig kan worden georganiseerd.

Deze onzekerheden vormen de basis voor de verdere analyse in dit rapport, waar zowel de technische haalbaarheid als de economische en organisatorische randvoorwaarden van IDSR nader worden onderzocht.

Voor **toekomstig onderzoek** zijn drie richtingen urgent:

1. Verfijning van proces-specifieke flexibiliteitsdata (duur, kosten, granulariteit per subsector).
2. Evaluatie van markt- en tariefontwerp, inclusief de rol van aggregators, flexcontracten, capaciteitsmechanismen en stimuleringsregelingen.
3. Analyse van de lang termijn businesscase bij cumulatieve inzet van flexibiliteit op meerdere markten en in combinatie met infrastructuurontwikkeling.

Een integrale benadering waarin industrie, systeemoperators en beleidsmakers gezamenlijk optrekken is noodzakelijk om het potentieel van IDSR daadwerkelijk te verzilveren. Alleen door technologische innovatie, een stimulerend markt- en beleidskader en gerichte kennisontwikkeling kan IDSR bijdragen aan een betrouwbaar, betaalbaar en duurzaam energiesysteem.

3 Bottom-up analyse vanuit industriële processen

De literatuur geeft een bandbreedte van het technisch potentieel van IDSR, maar biedt weinig inzicht in welk deel hiervan ook daadwerkelijk inzetbaar is. Om dat te bepalen brengt dit hoofdstuk de feitelijke verdeling van elektrisch vermogen in de industrie in kaart (MIDDEN) en koppelt deze aan praktijkinzichten uit interviews met bedrijven. Deze combinatie maakt zichtbaar welke processen theoretisch flexibiliteit bieden en welke operationeel begrensd zijn.

Op basis van de MIDDEN-database wordt de schaal en spreiding van elektrische vermogens in de Nederlandse industrie inzichtelijk gemaakt. De MIDDEN-database laat zien waar grote elektrische vermogens zich bevinden, maar bevat geen dynamische procesparameters zoals ramp-rates, turndown-ratio's of startkosten. Omdat toekomstige elektrificatieprojecten (zoals e-boilers, warmtepompen, waterstofproductie en hybridisering) nog niet in MIDDEN zijn opgenomen, geeft de database slechts een deelbeeld van het toekomstige flexibiliteitspotentieel.

Waar kwantitatieve studies vooral potentieel inschatten, leveren de interviews empirisch inzicht in de operationele inzetbaarheid van industriële vraagresponso's. Deze gesprekken geven een beeld van hoe bedrijven daadwerkelijk omgaan met industriële vraagresponso's, welke operationele grenzen zij ervaren, welke prikkels werken, en welke belemmeringen investeringen afremmen.

3.1 Analyse van procestechnologieën en gebruik in modellering

In dit subhoofdstuk wordt de MIDDEN-database gebruikt als empirische basis om het elektrisch vermogen binnen de Nederlandse industrie in kaart te brengen. MIDDEN bevat plant- en procesgegevens voor energie-intensieve, veelal ETS-plichtige installaties, waaronder jaarverbruik, procesconfiguraties en afgeleide capaciteitsfactoren. De energie-intensieve industrie omvat industriële bedrijven en processen met een zeer hoog energieverbruik per eenheid product, doorgaans vanwege chemische reacties, hoge temperatuurprocessen of elektro-intensieve stappen. In beleids- en analysekaders wordt deze groep vrijwel altijd afgebakend via de EU-ETS-installaties: bedrijven met installaties ≥ 20 MWth of specifiek als ETS-plichtig aangewezen activiteiten.

Hoewel de database geen flexibiliteitsparameters bevat, laat zij wel zien waar grote elektrische vermogens zijn geconcentreerd en daarmee welke processen in theorie relevant zijn voor industriële vraagresponso's. Deze informatie vormt de kwantitatieve onderbouw van dit hoofdstuk en wordt vervolgens gebruikt om de MIDDEN-bevindingen te duiden in samenhang met literatuur en praktijkinterviews.

3.1.1 Empirische basis: elektrisch vermogen per proces

De MIDDEN-database bevat gegevens van ETS-plichtige installaties in Nederland en geeft daarmee inzicht in ongeveer 70–80% van het energieverbruik van de energie-intensieve industrie. De database weerspiegelt de situatie rond 2019–2020 en vormt daarmee een momentopname van de huidige industriële configuratie.

Op basis van jaarverbruiken en capaciteitsfactoren kan een indicatie worden afgeleid van het elektrisch geïnstalleerd vermogen per proces. Dit geeft een bovengrens van het schaalniveau waarop industriële vraagrespons theoretisch zou kunnen bijdragen aan flexibiliteit. MIDDEN beschrijft echter geen dynamische flexibiliteitsparameters. Daardoor is het geïnstalleerde vermogen niet gelijk aan flexibel vermogen zoals bedoeld in de DNV-analyse (~3,4 GW).

Belangrijke beperkingen zijn:

- geen tijdsresolutie of dynamische procesdata;
- geen parameters zoals responstijd, inzetduur, ramp-rate of kosten;
- alleen huidige ETS-industrie (geen MKB, geen recente elektrificatie);
- toekomstige processen en hybridisering ontbreken;
- geïnstalleerde vermogens worden deels afgeleid via aannames.

Ondanks deze beperkingen biedt MIDDEN waardevolle informatie over de spreiding van elektrisch vermogen en vormt het een nuttige basis voor een sectorale analyse. Tabel 3.1 toont de geïnstalleerde elektrische vermogens van de geaggregeerde (huidige) installaties binnen de gekozen industrie sectoren.

Tabel 3.1: Geïnstalleerd elektrisch vermogen en jaarlijks elektriciteitsverbruik per sector (MIDDEN), op basis van huidige installaties (2025).

Sector	Vermogen (MW)	Verbruik (TWh)	Verbruik (PJ)
Chemie	1062,5	8,54	30,8
Metaal	633,4	5,14	18,5
Olieraffinaderijen	396,4	2,85	10,3
Voedingsmiddelen	226,0	1,54	5,6
Papier	161,9	1,30	4,7
Keramiek	64,7	0,49	1,8
Glas	41,4	0,33	1,2
Totaal	2586,3	20,20	72,7

Deze verdeling laat zien waar binnen de Nederlandse industrie het grootste volume aan elektrisch vermogen geconcentreerd is en vormt daarmee de empirische bovenkant van het technisch potentieel voor industriële vraagrespons (IDSR). Een hoog geïnstalleerd elektrisch vermogen impliceert echter niet automatisch een hoog flexibiliteitspotentieel. De daadwerkelijke regelbaarheid wordt bepaald door operationele parameters zoals minimale belasting (turndown ratio), ramp-up- en ramp-down-snelheden, cyclustijden en herstartkosten. Deze proces-specifieke kenmerken ontbreken grotendeels in bestaande datasets, maar zijn cruciaal om te bepalen welk deel van het aanwezige vermogen daadwerkelijk flexibel inzetbaar is.

De daadwerkelijke regelruimte hangt af van operationele factoren op procesniveau, zoals:

- › de turndown-ratio (het minimumvermogen waarbij het proces nog stabiel blijft);
- › de ramp-up- en ramp-down-snelheden (hoe snel vermogen kan worden aangepast);
- › de duur van continue of batchgewijze cycli; en
- › de kosten, kwaliteits- of veiligheidsrisico's bij herstart of load-shifting.

Hierdoor kan een proces met een hoog elektrisch vermogen, zoals elektrolyse of compressie, in de praktijk beperkt regelbaar zijn, terwijl kleinere processen, bijvoorbeeld batch-droging of pompsystemen, juist een relatief groot flexibel aandeel kennen. Om deze verschillen te kunnen kwantificeren, is een nadere analyse nodig waarin MIDDEN-data wordt verrijkt met proces-specifieke flexibiliteitsparameters uit literatuur en praktijk.

In Appendix A.2 staan de verschillen tussen de literatuur analyse, de MIDDEN analyse en de praktijk interviews nader uitgelegd.

3.1.2 Dominante processen en schaalniveaus van elektrisch vermogen

Hoewel MIDDEN geen flexibiliteitsparameters bevat, maakt de database zichtbaar dat een beperkt aantal procescategorieën verantwoordelijk is voor het grootste deel van het elektrische vermogen in de industrie. Het gaat met name om:

- › compressoren en persluchtinstallaties;
- › koel- en vriesinstallaties;
- › elektrochemische processen;
- › waterbehandeling en pompsystemen;
- › elektrische aandrijvingen en mechanische processen;
- › *opkomende elektrificatietechnologieën (e-boilers, warmtepompen, elektrolyse – nog beperkt opgenomen).*

Deze processen bepalen in grote lijnen het schaalniveau waarop industrieel schakelvermogen beschikbaar kan zijn. Of dit vermogen ook flexibel inzetbaar is, hangt af van technische, economische en organisatorische randvoorwaarden, zoals beschreven in de volgende paragrafen.

3.1.3 Verschillen tussen studies

De cijfers uit MIDDEN zijn niet direct vergelijkbaar met flexibiliteitsschattingen uit studies zoals DNV GL (2020) of TenneT (2021). MIDDEN beschrijft het geïnstalleerd elektrisch vermogen op basis van jaarverbruik en capaciteitsfactoren, maar bevat geen informatie over responstijden, inzetduur, herstelltijden of kosten van flexibiliteit. Literatuurstudies zoals DNV vertalen dit vermogen wél naar flexibiliteitsparameters en economisch inzetbaar potentieel. De combinatie van beide perspectieven is noodzakelijk: MIDDEN toont waar vermogens geconcentreerd zijn, terwijl DNV toont hoe en onder welke voorwaarden deze vermogens flexibel kunnen worden ingezet.

Daarnaast verschillen MIDDEN en DNV vermogens methodisch sterk. MIDDEN biedt een bottom-up, proces-specifieke dataset van ETS-installaties, terwijl DNV een top-down sectoraanpak gebruikt met aannames over vollasturen, stilstand kosten en standaardwaarden voor responstijden. Hierdoor vallen flexibiliteitsschattingen van DNV vaak

hoger uit dan wat bedrijven in interviews aangeven: de praktijk kent ketenafhankelijkheden, kwaliteitsrisico's en langere herstarttijden dan in modelaannames wordt verondersteld.

De inzichten uit praktijkinterviews bevestigen dat economisch potentieel eveneens bepalend is: flexibiliteit wordt pas aantrekkelijk bij zeer hoge prijssignalen of bij specifieke marktregelingen. Dit verklaart verschillen tussen studies zoals die van NBNL (300–2000 €/MWh voor flexactivatie) en DNV, dat uitgaat van frequente inzet op balanceringsmarkten. Daarmee laat de vergelijking zien dat aannames over prijsniveaus, technologie, kosten en marktdesign essentieel zijn voor het bepalen van realistisch inzetbare IDSR.

3.1.4 Gebruik van MIDDEN voor modellering en beleid

De kracht van de MIDDEN-database ligt in de gedetailleerde procesinformatie, die, wanneer verrijkt met flexibiliteitsparameters uit literatuur en praktijk, zoals responstijden, inzetvormen en kostenbanden, een solide basis vormt voor verdere systeemmodellering. Daarmee kan niet alleen beter worden ingeschat hoeveel industriële vraagrespons in theorie beschikbaar is, maar ook onder welke condities deze inzetbaar is voor balancerings- en leveringszekerheid.

Tegelijkertijd blijkt dat de benutting van dit technisch potentieel sterk wordt beïnvloed door institutionele factoren: onduidelijkheid over eigenaarschap van industriële vraagrespons, beperkte markttoegang voor kleinere spelers en het ontbreken van gestandaardiseerde contracten beperken de deelname aan balanceringsmarkten en groothandelsmarkten. Betere markttoegang, ondersteuning via aggregatoren en duidelijkere juridische kaders zijn cruciale randvoorwaarden om industriële vraagrespons te ontsluiten.

De MIDDEN-database bevat ook gegevens over toekomstige elektrificatie-intensieve routes, zoals grootschalige elektrolyse, e-crackers en waterstofgebaseerde reductieprocessen. Deze technologieën vergroten het potentieel schaalniveau van industriële vraagrespons aanzienlijk, hoewel hun inzetbaarheid nog onzeker is.

Tot slot vraagt de structurele inzet van industriële vraagrespons om kennisontwikkeling bij bedrijven zelf, over de interactie tussen decarbonisatie, prijssignalen en operationele kansen. Deze inzichten benadrukken dat de structurele inzet van flexibiliteit niet alleen afhangt van technische gegevens, maar ook van de kwaliteit van de onderliggende data. De volgende stap is daarom om de MIDDEN-database verder te verrijken met flexibiliteitskenmerken en procesdynamiek, zodat haar waarde voor modellering en beleidsvorming volledig kan worden benut.

3.1.5 Naar een geïntegreerde benadering van het flexibiliteitspotentieel van industriële processen

De MIDDEN-database bevat waardevolle procesdata waarmee het elektrisch vermogen en energieverbruik van de Nederlandse industrie in kaart kunnen worden gebracht. Op basis van deze gegevens is zichtbaar dat het technisch potentieel voor industriële vraagrespons (IDSR) sterk verschilt tussen sectoren en processen: elektrochemische en compressieprocessen bieden de meeste ruimte voor flexibele inzet, terwijl thermisch continue processen, zoals in glas en raffinage, nauwelijks regelbaar zijn.

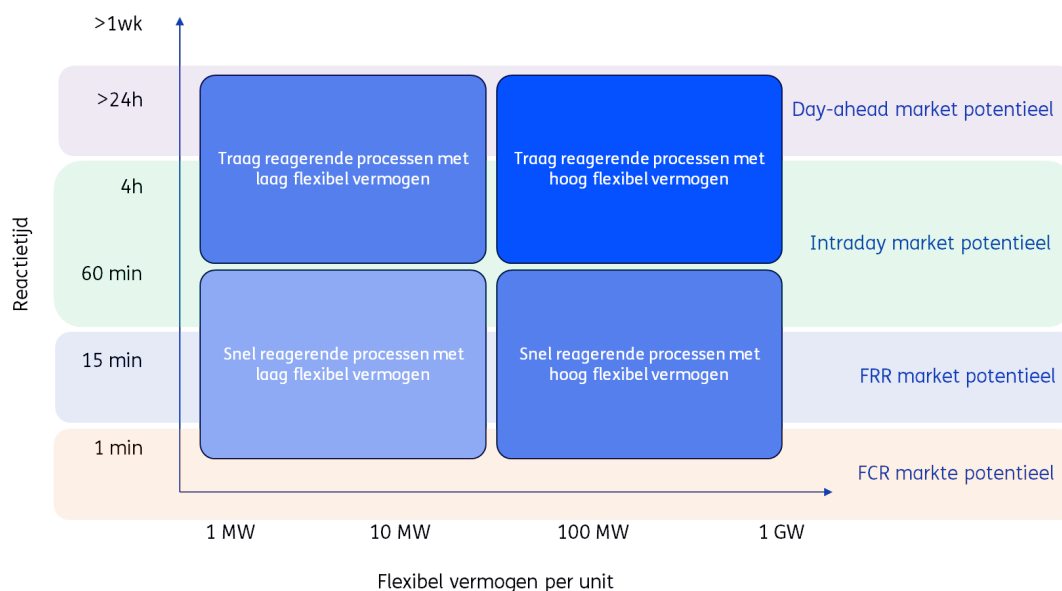
De MIDDEN-data bieden echter nog geen directe informatie over responstijden, omschakelbaarheid, rendementsverliezen of herstartkosten. Deze parameters zijn essentieel om flexibiliteit kwantitatief te duiden. Een volgende onderzoeksstap ligt daarom in het

verrijken van MIDDEN-data met proces-specifieke flexibilitetskenmerken uit literatuur, simulatie en praktijk. Daarmee kan een consistent raamwerk ontstaan waarmee het flexibilitetspotentieel per sector en per type technologie systematisch kan worden bepaald.

Een dergelijk raamwerk zou zowel bestaande technologieën (zoals elektrolyse, compressie, e-boilers) als opkomende elektrificatie-opties (zoals Power-to-X, modulaire elektrochemie en hybride warmtepompen) omvatten. Deze toekomstige technologieën zijn vaak intrinsiek flexibeler, maar hun inzetbaarheid en interactie met markt- en systeemcondities moeten nog empirisch worden getoetst.

In Figuur 3.1 wordt conceptueel weergegeven hoe de flexibiliteit van industriële technologieën zich verhoudt tot hun responstijd en inzetduur. Deze visualisatie illustreert hoe het IDSR potentieel over processen en sectoren is verdeeld: elektrolyse en compressieprocessen bieden snelle en omvangrijke regelcapaciteit, terwijl thermische processen zoals ovens en stoomsystemen vooral geschikt zijn voor tragere load shifting. De grafiek dient als voorbeeld van hoe een volledig overzicht van IDSR eruit zou kunnen zien en benadrukt dat deze potentie niet uniform verdeeld is, maar een breed spectrum vormt met uiteenlopende technische kenmerken.

Deze indeling naar vermogen en tijdsschaal maakt een gerichte koppeling mogelijk met verschillende functies binnen het elektriciteitssysteem en de energiemarkten. Processen met korte responstijden en hoge vermogens (zoals compressoren of e-boilers) sluiten aan bij de behoefte in real-time regel- en balanceringsmarkten (zoals FCR en aFRR). Processen met een inzetduur van uren tot dagen (zoals elektrolyse of chloorproductie) kunnen waarde creëren op de day-ahead en intraday markten door vraagverschuiving in reactie op prijsprikkels.



Figuur 3.1: Schematische indeling industriële processen op reactietijd en flexibel vermogen per unit. Hiermee is een betere duiding te maken voor welke processen geschikt zijn voor welke markten.

Flexibiliteit met een inzetduur van meerdere dagen tot weken, zoals bij hoogovens of raffinageprocessen, is in beginsel minder geschikt voor operationele markten, maar kan relevant zijn voor leveringszekerheid in situaties van langdurige schaarste. Dergelijke

flexibiliteit kan in theorie bijdragen aan capaciteitsmechanismen, waarin beschikbaarheid van vermogen of vraagreductie vooraf wordt geborgd, en daarmee de behoefte aan zeldzaam en kostbaar piekvermogen verminderen. Capaciteitsmechanismen zijn hierbij nadrukkelijk gericht op leveringszekerheid en niet op het oplossen van lokale netcongestie.

Door deze proceskenmerken te koppelen aan de MIDDEN-database ontstaat een kwantitatief fundament om het IDSR potentieel niet alleen technisch te duiden, maar ook systemisch te positioneren in relatie tot marktrollen en beleidsdoelstellingen.

In het volgende hoofdstuk worden deze inzichten verder verdiept aan de hand van gesprekken met industriële bedrijven. Daarmee ontstaat een proces specifiek beeld van de operationele inzetbaarheid van het theoretische potentieel dat in de MIDDEN data is geschetst.

3.1.6 Conclusie procesdata vanuit MIDDEN

De koppeling van MIDDEN-procesdata met inzichten uit literatuur biedt een scherpere kijk op waar binnen de industrie de grootste kansen voor IDSR liggen. Met name de sectoren chemie en basismetalen beschikken over direct regelbare vermogens via elektrolyse-, compressie- en cryogene processen. In sectoren als glas, voeding en raffinage is flexibiliteit beperkter en sterk procesafhankelijk, vanwege de continue aard van thermische processen en de beperkte regelruimte in productieketens.

De elektrificatie-intensieve transitiepaden, zoals grootschalige elektrolyse, power-to-X en hybride warmtetechnologieën, wijzen op een toenemend technisch potentieel voor flexibele inzet, mits de onderliggende infrastructuur, marktvoorwaarden en regelkaders zich in dezelfde richting ontwikkelen. De MIDDEN-database vormt hierbij een waardevolle bouwsteen, omdat zij een uniforme en gedetailleerde basis biedt voor beleidsanalyse en modellering van toekomstige energiesystemen.

Het ideaalbeeld dat uit deze analyse naar voren komt, is dat industriële vraagresponso geen uniforme bron van regelvermogen is, maar een spectrum van procesgebonden mogelijkheden met uiteenlopende technische, economische en organisatorische randvoorwaarden. Het in kaart brengen van dit spectrum is essentieel om flexibiliteit gericht te kunnen waarderen en stimuleren.

De volgende stap is om deze inzichten te toetsen aan de praktijk. De MIDDEN database laat zien waar het technisch potentieel zich bevindt, maar zegt nog weinig over de feitelijke toepasbaarheid van flexibiliteit binnen bedrijfsprocessen. Om dit te verkennen is in het vervolg van deze studie een reeks interviews uitgevoerd met representatieve industriële bedrijven. Deze praktijkinzichten, gepresenteerd in hoofdstuk 5, vormen een essentiële aanvulling om de aannames in systeemstudies van TNO, PBL en TenneT te valideren en het reële potentieel van industriële vraagresponso beter te begrijpen.

3.2 Praktijk inzichten uit sector interviews

De analyse op basis van de MIDDEN-data (hoofdstuk 3) heeft laten zien waar in de industrie de grootste concentraties van elektrisch vermogen aanwezig zijn en welke processen technisch de meeste aanknopingspunten voor het inzetten van industriële vraagrespons. Daarmee geeft MIDDEN een kwantitatieve bovengrens van het haalbare potentieel van ETS-plichtige bedrijven in Nederland. Het schetst de schaal en spreiding van elektrisch vermogen, maar zegt nog weinig over de feitelijke flexibiliteit van deze vermogens in de praktijk.

Om dit theoretische beeld te toetsen en te verfijnen, is in deze studie een vervolgstap gezet: een reeks diepte-interviews met representatieve bedrijven uit verschillende energie-intensieve sectoren. Waar de MIDDEN data laat zien waar industriële vraagrespons technisch kan worden gevonden, brengen deze gesprekken in beeld hoe bedrijven daadwerkelijk omgaan met industriële vraagrespons, welke operationele grenzen zij ervaren, welke prikkels werken, en welke belemmeringen investeringen afremmen.

Waar kwantitatieve studies vooral potentieel inschatten, leveren de interviews empirisch inzicht in de operationele inzetbaarheid van industriële vraagrespons. Ze laten zien onder welke condities bedrijven bereid zijn om flexibel te opereren, en hoe factoren als veiligheid, productkwaliteit, contractstructuren en netbeperkingen hun besluitvorming beïnvloeden. Door deze praktijkinzichten te koppelen aan de procesdata uit MIDDEN ontstaat een proces specifiek beeld van de operationele inzetbaarheid van IDSR.

De resultaten van de gesprekken vormen zo een cruciale schakel tussen technisch potentieel en praktische toepasbaarheid. Ze helpen om de aannames in bestaande systeemstudies, zoals die van DNV, TNO, PBL en TenneT, te valideren en te verfijnen, en dragen bij aan een beter begrip van hoe industriële vraagrespons zich in de praktijk ontwikkelt.

In de volgende paragrafen worden de belangrijkste bevindingen per sector besproken: welke vormen van industriële vraagrespons vandaag al bestaan, welke barrières bedrijven ervaren, en welke oplossingsrichtingen zij zelf zien om industriële vraagrespons op te schalen.

3.2.1 Doel en aanpak van de interviews

Het doel van dit hoofdstuk is het in kaart brengen van het huidige technische potentieel van industriële vraagrespons vanuit productieprocessen, inclusief de mogelijkheden om industriële warmtevraag flexibel in te zetten als buffer voor variabel duurzaam elektriciteitsaanbod, en daarmee bij te dragen aan de leveringszekerheid van het elektriciteitssysteem tijdens perioden van beperkte beschikbaarheid van hernieuwbare opwek.

De literatuur- en MIDDEN data hebben laten zien dat het technisch potentieel voor industriële vraagrespons aanzienlijk is, maar dat de toepassing op schaal wordt beperkt door technische, economische, regelgevende en markt gerelateerde barrières. Om beter te begrijpen hoe deze belemmeringen zich in de praktijk manifesteren, zijn zeven diepte-interviews uitgevoerd met bedrijven uit de meest energie-intensieve industriële sectoren van Nederland.

Waar MIDDEN de technisch haalbare bovenkant van het industriële vraagrespons potentieel in beeld brengt, bieden de gesprekken met bedrijven een realiteitscheck van wat daarvan in de praktijk daadwerkelijk uitvoerbaar is. Zo ontstaat een empirisch kader waarmee de

theoretische aannames uit eerdere studies, zoals DNV (2020) en TKI E&I (2022), kunnen worden gevalideerd en aangescherpt.

De selectie van bedrijven is gebaseerd op een analyse van de MIDDEN-database, die een vrijwel volledig overzicht biedt van ETS-plichtige industriële installaties in Nederland. Uit deze database zijn representatieve bedrijven gekozen uit vier sectoren met een hoog elektriciteitsverbruik: chemie, metaal, voeding en glas. Daarnaast is ook de raffinagesector meegenomen vanwege haar strategische rol in de energietransitie en elektrificatiepotentie. Een sector die in dit onderzoek minder vertegenwoordigd is, is de petrochemische sector.

De deelnemende bedrijven zijn: Nobian (chemie; chlooralkali), OCI Nitrogen (chemie; ammoniak), Air Liquide (chemie – industriële gassen), Nyrstar (metaal), Cargill (voedingsmiddel), de glasindustrie (O-I, Ardagh Group en LC Glass), en BP (raffinaderij). Samen vertegenwoordigen zij circa 22% van het totaal geïnstalleerd elektrisch vermogen en ongeveer 12% van de industriële CO₂-uitstoot in de MIDDEN-database (zie Tabel 3.2).

Tabel 3.2: Energieverbruik en CO₂-uitstoot per geïnterviewde sector, op basis van huidige installaties (2025).

Sector	Bedrijf	Totaal geïnstalleerd elektrisch vermogen (MW)	Totaal elektriciteitsverbruik (PJ/jaar)	Totale CO ₂ -uitstoot (kt CO ₂ /jaar)
Chemie (chlooralkali)	Nobian	257	2.25	372
Chemie (kunstmest)	OCI Nitrogen	19	0.15	1754
Chemie (gassen)	Air Liquide	25	0.21	959
Metaal	Nyrstar	150	1.15	26
Voedingsmiddelen	Cargill	18	0.15	300
Glas	O-I, Ardagh, LC Glass	30	0.23	320
Raffinaderij	BP	82	0.59	2027
<i>Subtotaal geïnterviewde sectoren</i>	–	581	4.73	5759
<i>Aandeel van totaal (MIDDEN-database)</i>	–	22%	23%	12%
Totaal industrie (MIDDEN)	–	2,586	20.19	48,293

Het doel van de interviews is om een sectoraal beeld te vormen van hoe industriële bedrijven in de praktijk omgaan met industriële vraagresponso: welke vormen van vraagresponso reeds worden toegepast, welke belemmeringen zij ervaren en onder welke voorwaarden zij bereid zijn verder te investeren. De inzichten die hieruit voortkomen vormen de empirische basis voor de analyse van barrières en oplossingsrichtingen in de volgende paragrafen.

De interviews zijn ontworpen door TNO-experts als verdieping op de literatuur- en MIDDEN data. In de gesprekken is systematisch ingegaan op drie hoofdthema's:

- de **perceptie en motivatie** om industriële vraagresponso te ontwikkelen,
- de **technische en economische mogelijkheden** voor industriële vraagresponso, en
- de **randvoorwaarden voor effectieve toepassing** van IDSR binnen verschillende productieomgevingen.

Deze gestructureerde aanpak maakte het mogelijk om inzichten uit diverse sectoren te vergelijken en gemeenschappelijke patronen in kansen en belemmeringen te identificeren.

3.2.2 Algemene inzichten uit de interviews

De interviews laten zien dat actieve toepassing van industriële vraagrespons momenteel beperkt blijft tot een klein aantal procescategorieën die historisch al flexibel worden bedreven. In het merendeel van de industriële processen is vraagrespons nog geen expliciet onderdeel van operationele of strategische besluitvorming. Dit geldt ook voor bedrijven die worden geconfronteerd met toenemende prijsvolatiliteit en netbeperkingen. Industriële vraagrespons wordt daar vooral gezien als een theoretische of toekomstige optie, en nog beperkt als een concreet investeringsdomein.

Percepties en motivaties

De houding ten opzichte van industriële vraagrespons verschilt sterk per sector. In de chemie en gasindustrie wordt flexibiliteit veelal gezien als een strategische kans om kosten te besparen, risico's van prijsspieken te beperken en beter in te spelen op een volatiel energiesysteem. Bedrijven als Nobian en Air Liquide beschouwen flexibele aansturing van elektrolyse en compressoren als een integraal onderdeel van hun toekomstige bedrijfsstrategie.

In andere sectoren, zoals de voedingsmiddelen- en glasindustrie, overheerst juist voorzichtigheid. Hier staat de continuïteit van productie centraal en wordt flexibiliteit alleen overwogen wanneer de impact op productkwaliteit, leveringszekerheid en veiligheid volledig beheersbaar is. De interviews maken daarmee duidelijk dat niet alleen technische mogelijkheden, maar vooral risicoperceptie en vertrouwen bepalend zijn voor de bereidheid om industriële vraagrespons toe te passen. Zonder overtuigend bewijs dat flexibiliteit veilig, betrouwbaar en economisch aantrekkelijk kan worden ingezet, blijft adoptie beperkt.

Technische en operationele mogelijkheden

Deze uiteenlopende percepties vertalen zich direct naar verschillen in technische inzet en operationele ruimte voor industriële vraagrespons. Bedrijven met elektrochemische of mechanische processen, zoals elektrolyse, compressie en pompsystemen, beschikken over substantiële regelcapaciteit die in sommige gevallen kan oplopen tot tientallen megawatt. Nyrstar en Nobian maken hier reeds gebruik van en leveren actief regelvermogen aan de aFFR-markt.

In continue thermische processen, zoals glasproductie en ammoniakproductie, zijn de mogelijkheden beperkter. Productieprocessen kunnen hier slechts in beperkte mate en veelal gepland worden aangepast. Tegelijkertijd zien bedrijven elektrificatieprojecten, bijvoorbeeld via e-boilers of elektrische ovens, als een kans om op termijn meer regelbaarheid in deze processen te integreren. Verdere benutting van industriële vraagrespons is daarbij sterk afhankelijk van technologische ondersteuning, zoals slimme processturing, voorspellende algoritmen en transparante monitoring van energiegebruik per processtap.

Economische randvoorwaarden

Vanuit economisch perspectief geldt sectorbreed dat industriële vraagrespons pas aantrekkelijk wordt wanneer investeringsrisico's beheersbaar zijn en inkomsten voldoende stabiel en voorspelbaar zijn. Dit vormt een belangrijke randvoorwaarde voor deelname aan balancerings- en groothandelsmarkten, waar betrouwbaarheid en beschikbaarheid centraal staan. Tegelijkertijd geven bedrijven aan dat het toekomstige verdienmodel van industriële vraagrespons vooraf moeilijk te kwantificeren is. Investeringskosten worden daardoor vaak

gebaseerd op onzekerheid en verwachte upside, in plaats van op gegarandeerde opbrengsten. Deze onzekerheid beperkt de investeringsbereidheid, met name wanneer langjarige prikkels of risicodelende mechanismen ontbreken.

Markt- en infrastructuurbelemmeringen

De geïnterviewde bedrijven benoemen energie-infrastructuur en marktontwerp als belangrijke belemmeringen, met name in relatie tot elektrificatie van industriële processen. Vrijwel alle respondenten wijzen op beperkte aansluitcapaciteit en lange wachttijden voor netverzwaring als directe redenen waarom elektrificatieprojecten worden uitgesteld. Daarnaast worden de relatief hoge Nederlandse nettarieven ervaren als een structureel nadeel ten opzichte van buurlanden.

Deze knelpunten vormen echter niet één-op-één een belemmering voor het ontsluiten van industriële vraagrespon. Hoewel verdere elektrificatie het absolute flexibiliteitspotentieel kan vergroten, leidt dit niet automatisch tot een hoger relatief inzetbaar aandeel van flexibiliteit. Bovendien gaat toenemende elektrificatie gepaard met een groeiende systeembehoefte aan flexibiliteit. Voor expliciete IDSR gericht op leveringszekerheid spelen netcapaciteitsbeperkingen daarom een andere, vaak meer indirecte rol dan voor elektrificatie zelf.

Daarnaast ervaren bedrijven onzekerheid over de houdbaarheid van gecontracteerde transportcapaciteit, onder andere door principes als use-it-or-lose-it en GOTORK. Deze onzekerheid bemoeilijkt investeringsbeslissingen voor flexibele elektrificatie, zoals e-boilers of elektrolyse-installaties. Deelname aan balancerings- en groothandelsmarkten wordt bovendien als complex ervaren, met administratieve lasten en beperkte transparantie over prijsvorming als belangrijke drempels, met name voor middelgrote bedrijven. Echter, deze markten geven in de praktijk slechts beperkt inzicht in de potentiële rol van IDSR bij langdurige leveringszekerheidsvraagstukken.

Randvoorwaarden en oplossingsrichtingen

De interviews maken duidelijk dat technische mogelijkheden voor industriële vraagrespon pas tot waarde komen wanneer economische, organisatorische en institutionele randvoorwaarden gelijktijdig worden versterkt. Bedrijven noemen daarbij het belang van het verlagen van investeringsrisico's, bijvoorbeeld via CAPEX-steun of langjarige vergoedingsstructuren, terwijl zij tegelijkertijd wijzen op de noodzaak om marktverstoringe prikkels te vermijden. Aangepaste nettarieven worden door sommige partijen gezien als een meer structurele en marktconforme prikkel voor flexibel gedrag.

Ook op infrastructuurniveau zien bedrijven kansen in nauwere samenwerking binnen industriële clusters, bijvoorbeeld via gezamenlijke planning van aansluitcapaciteit en betere afstemming met netbeheerders. Meer transparantie over uitbreidingsplannen en tijdslijnen wordt daarbij als cruciaal genoemd. Daarnaast benadrukken bedrijven het belang van kennisdeling, training en standaardisatie, zodat industriële vraagrespon structureel kan worden verankerd in de dagelijkse bedrijfsvoering en operationele besluitvorming.

Deze inzichten sluiten aan bij de doelen van de Actieagenda Elektrificatie Industrie (EZK, 2024), waarin elektrificatie en industriële vraagrespon worden gezien als complementaire pijlers van industriële verduurzaming. De praktijkinzichten uit dit onderzoek laten zien waar deze beleidsdoelen in de uitvoering tegen grenzen aanlopen en welke randvoorwaarden bepalend zijn voor verdere opschaling.

3.2.3 Barrières en drempels voor opschaling vraagsturing

De interviews laten zien dat bedrijven bij de inzet van industriële vraagrespons tegen uiteenlopende, maar ook grotendeels vergelijkbare barrières aanlopen. Deze belemmeringen zijn technisch, infrastructureel, financieel en organisatorisch van aard, en beperken de mogelijkheid om industriële vraagrespons op schaal te realiseren.

Technisch en operationeel

Veel industriële installaties zijn chemisch of thermisch complex, waardoor plotselinge aanpassingen in het productieproces risico's opleveren. Bedrijven uit de glas- en chemiesector benadrukken dat korte stops kunnen leiden tot schade, kwaliteitsverlies of langdurige stilstand. Veiligheidsoverwegingen zijn daarbij doorslaggevend: operators geven aan dat industriële vraagrespons alleen mogelijk is binnen strikt gecontroleerde condities en op vooraf geplande momenten. Hier liggen de mogelijkheden vooral in flexibilisering van het energiesysteem dat de productie faciliteert en met nadruk niet in flexibilisering van de productie doorvoer zelf.

Infrastructuur en samenwerking

Vrijwel alle geïnterviewde bedrijven noemen het elektriciteitsnet als een van de grootste belemmeringen. Een tekort aan aansluitcapaciteit en lange wachttijden voor uitbreiding zorgen ervoor dat elektrificatieplannen worden uitgesteld. Daarnaast ervaren bedrijven de hoge Nederlandse nettarieven als een structureel concurrentienadeel ten opzichte van buurlanden. Ook bestaat onzekerheid over de houdbaarheid van bestaande transportcontracten; onder het huidige reguleringskader van de ACM kan capaciteit in sommige gevallen opnieuw worden beoordeeld of herverdeeld. Dit gebrek aan zekerheid bemoeilijkt investeringsbeslissingen (FID) voor projecten zoals e-boilers of elektrolyse-installaties.

Financiële prikkels

Bedrijven geven aan dat de ontwikkeling van industriële vraagrespons vaak hoge kapitaalinvesteringen vergt, terwijl de opbrengsten onzeker zijn. Industriële vraagrespons inzetten via het productieproces is zelden onderdeel van de kernactiviteit, waardoor investeringen moeilijk te rechtvaardigen zijn zonder stabiele inkomstenstroom of gerichte steun. Het ontbreken van langjarige prikkels of garantieregelingen maakt dat veel projecten niet verder komen dan de verkennende fase.

Markttoegang

Deelname aan balanceringsmarkten (zoals FCR, aFRR en mFRR) en aan flexibiliteitsinzet via groothandelsmarkten (day-ahead en intraday) wordt door meerdere partijen als complex en administratief belastend ervaren. Onduidelijke of versnipperde regels, vaste toetredingskosten en beperkte transparantie over prijsvorming en opbrengsten maken dat bedrijven terughoudend zijn om actief flexibiliteit aan te bieden. Vooral kleinere industriële spelers missen vaak de interne capaciteit en kennis om deze markten zelfstandig te bedienen, waardoor deelname veelal beperkt blijft tot grotere partijen of gespecialiseerde aggregators.

Contractuele en organisatorische rigiditeit

Hoewel veel recente PPA's en leveringscontracten prijs geïndexeerd zijn (bijvoorbeeld aan de day-ahead markt) en daarmee in principe prijsprikkels voor flexibiliteit bevatten, zijn flexibiliteitsrechten en -verplichtingen vaak niet expliciet contractueel vastgelegd. In veel

gevallen zijn volumepatronen, risicoverdeling en operationele verantwoordelijkheden zodanig ingericht dat actieve aanpassing van het verbruik in de praktijk beperkt blijft.

Daarnaast ontbreekt binnen bedrijven vaak een duidelijke organisatorische inbedding van flexibiliteit, bijvoorbeeld in de vorm van een expliciete verantwoordelijkheid voor marktdeelname en flexibiliteitsaansturing. Bedrijven geven aan dat meer standaardisatie van contractvormen, kennisdeling en begeleiding nodig is om bestaande prijsprikkels daadwerkelijk te vertalen naar operationele inzet van flexibiliteit binnen bedrijfsprocessen.

3.2.4 Kansen en voorwaarden voor verdere toepassing

Naast deze belemmeringen benoemen bedrijven verschillende oplossingsrichtingen die kunnen bijdragen aan de versnelling van industriële vraagrespon.

Technisch en operationeel

Bedrijven zien mogelijkheden om flexibiliteit te vergroten via procesoptimalisatie en slimme sturing. Toepassing van voorspellende algoritmen en beter inzicht in energieverbruik per processtap kan helpen om flexibiliteit te benutten zonder risico's voor productkwaliteit of veiligheid. Daarnaast worden hybride technologieën zoals e-boilers en elektrolyzers genoemd als kansrijke bouwstenen, mits de operationele randvoorwaarden helder zijn.

Infrastructuur en samenwerking

Bedrijven geven aan dat een nauwere afstemming met netbeheerders en clusterpartners essentieel is om structurele transportschaarste, zoals beperkingen in aansluit- en transportcapaciteit, gezamenlijk aan te pakken. Initiatieven waarbij industrie, overheid en netbeheerders gezamenlijk plannen ontwikkelen voor toekomstige aansluitcapaciteit en netverzwaring worden als positief ervaren. Transparantie over netuitbreidingsplannen en tijdslijnen helpt bedrijven om investeringsbeslissingen beter te timen en onzekerheid over elektrificatie en flexibiliteitsopties te verkleinen.

Financiële prikkels

Meerdere bedrijven pleiten voor eenmalige investeringssteun (CAPEX-subsidies) en voor de opname van IDSR in bestaande stimuleringsregelingen zoals de SDE++. Daarnaast worden lange termijn afspraken met gegarandeerde vergoedingen of capaciteitsmechanismen genoemd als middel om het risico op onrendabele investeringen te verkleinen.

Aan de tariefkant zijn reeds stappen gezet: voor TenneT-aangesloten grootverbruikers is het capaciteitstarief sinds januari 2024 gebaseerd op een kWmax-gewogen component, waarbij piekafname tijdens perioden met hogere systeembelasting zwaarder wordt belast. Deze aanpassing introduceert expliciete financiële prikkels voor flexibel gedrag. De mate waarin dit tariefsignaal investeringsbeslissingen voor IDSR daadwerkelijk ondersteunt, hangt echter af van de voorspelbaarheid, scherpheid en samenhang met andere markt- en contractprijken.

Markttoegang

Markttoegang vormt voor veel bedrijven een drempel door complexe procedures, hoge administratieve lasten en onduidelijke prijsvorming. Als oplossingsrichtingen worden vereenvoudiging van markttoegang, standaardisatie van contractvormen en betere prijstransparantie genoemd. Ook kan de inzet van digitale platforms en duidelijkere rollen voor aggregators en netbeheerders de deelname vergemakkelijken. Dit betreft met name het bundelen van flexibel vermogen, het verzorgen van prekwificatie en meetverplichtingen, en het vereenvoudigen van contractuele en administratieve processen voor individuele

bedrijven. Een voorspelbaar en transparant marktontwerp wordt door bedrijven gezien als voorwaarde om IDSR op schaal te realiseren. Wanneer flexibiliteit in het huidige proces al in die mate en termijn geboden kan worden dat er aantrekkelijke verdiensten op deze markten behaald kunnen worden, wordt dit door sommige spelers met voldoende in-huis kennis al naar tevredenheid benut.

Kennis en beleid

Om flexibiliteit structureel te verankeren, zien bedrijven behoefte aan kennisdeling en standaardisatie. Training van operators, uitwisseling van best practices tussen sectoren en duidelijke richtlijnen vanuit marktpartijen of toezichthouders worden genoemd als praktische voorwaarden voor opschaling.

De bevindingen uit de interviews sluiten aan bij de inzet van de Actieagenda Elektrificatie Industrie, waarin elektrificatie en flexibiliteit worden gezien als pijlers van industriële verduurzaming. De praktijkinzichten uit dit onderzoek geven een concreet beeld van waar die beleidsdoelen in de uitvoering nog tegen grenzen aanlopen en hoe sectorspecifieke maatregelen kunnen bijdragen aan versnelling.

Overige inzichten

Naast de genoemde thema's leven bij bedrijven bredere zorgen over de betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening en de internationale concurrentiepositie. Sommige respondenten waarschuwen dat een gebrek aan tijdige beleidsactie kan leiden tot vertraging in de verduurzaming of tot koolstoflekkage.

3.3 Samenvattend overzicht en interpretatie van sectorale inzichten

De sectorale verdieping laat zien dat industriële vraagrespons (IDSR) in Nederland technisch haalbaar is, maar dat de toepasbaarheid sterk verschilt per sector. De sectoren chemie en basismetalen beschikken over direct inzetbare flexibiliteit, met name via elektrolyse, compressie en processturing. In de voedingsmiddelen-, glas- en raffinagesector is de regelruimte beperkter, al kunnen elektrificatie en hybride technologieën in de toekomst nieuwe mogelijkheden openen.

Tabel 3.3 geeft een samenvattend overzicht van de belangrijkste technische kenmerken van IDSR per sector. Hieruit blijkt dat het beschikbare flexvermogen en de responstijd sterk variëren: van enkele megawatts in de voedings- en glassector tot meer dan 100 MW in de basismetallindustrie. Hoewel de technische potentie in veel gevallen aanwezig is, wordt de operationele inzetbaarheid begrensd door sectorspecifieke proceskenmerken, infrastructuurbependingen en marktvoorwaarden.

Over de sectoren heen komen drie dominante belemmeringen naar voren: onzekerheid over netcapaciteit, onvoldoende economische prikkels en complexe markt- en regelkaders. Tegelijkertijd tonen de gesprekken dat bedrijven bereid zijn te investeren in flexibiliteit zodra er duidelijkheid is over aansluitzekerheid, vergoeding en regelgeving.

Tabel 3.3: Overzicht van technisch flexibiliteitspotentieel per industriële sector op basis van interviews

Sector	Hoofdproces	Flexoptie	Flexvermogen	Flex %	Tijd op-/afschakelen
Chemie (chloor-alkali)	Elektrolyse van chloor / waterstof	Regelvermogen via aFRR / mFRR, chlooropslag, warmtepompen	20–30 MW	30–70 %	Minuten - uren
Chemie (ammoniak)	Ammoniak- / kunstmestproductie	E-boilers, compressoren,	5–10 MW	1–5 %	Minuten - uren
Chemie (industriële gassen)	Productie van zuurstof, stikstof en waterstof	Elektrolyzers, compressoren, vloeibaar-gasinstallaties	5–10 MW	10–20 %	Uren – 1 dag
Metaal	Elektrolyse van zink	aFRR / day-ahead optimalisatie	50–100 MW	25–30 %	Uren – 1 dag
Voeding	Verwerking agrarische grondstoffen	Biogas-WKK, elektrische bijstook, warmtebuffering	1-5 MW	5–10 %	Uren – 1 dag
Glas	Glasproductie in continu-ovens	Hybride ovens, elektrische boosters	5-10 MW	10–15 %	Uren - dagen
Raffinage	Olieverwerking en stoomproductie	E-boilers	60–70 MW	5–10 %	Minuten - uren

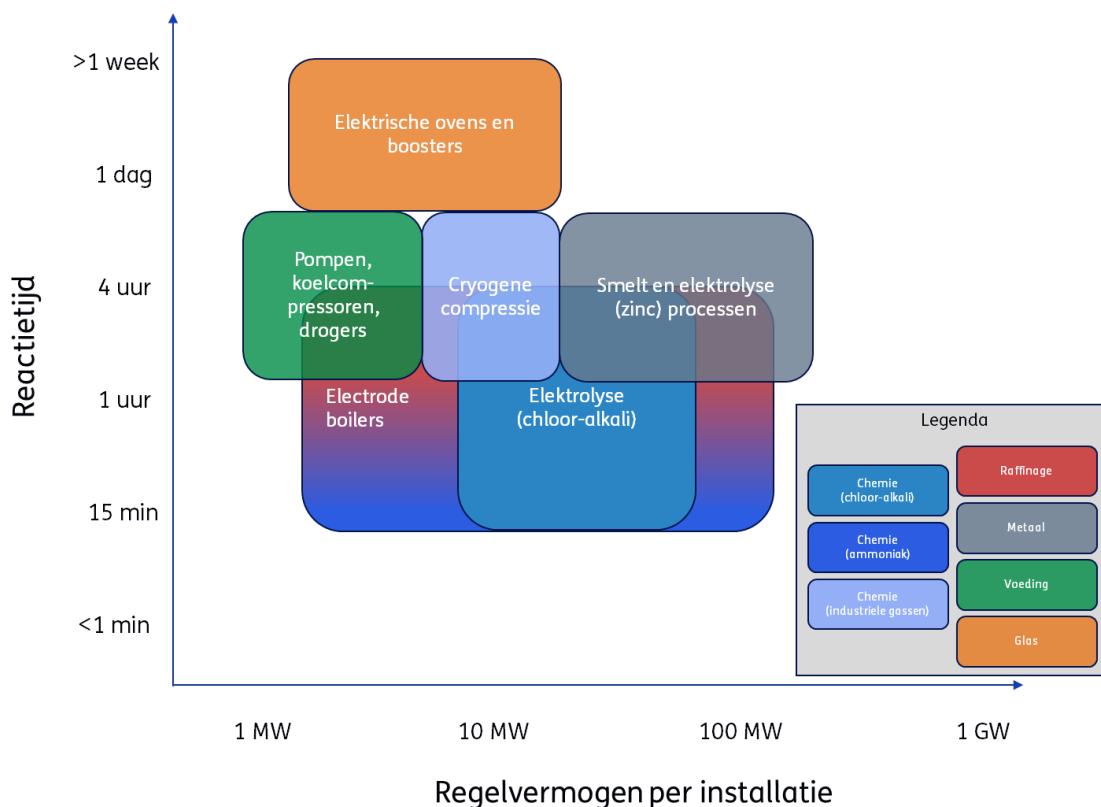
De in Tabel 3.3 weergegeven flexibiliteitsvermogens en -percentages zijn indicatief en gebaseerd op een beperkt aantal interviews met industriële partijen. Zij zijn niet representatief voor sectorale gemiddelden, maar illustreren de bandbreedte van technisch en operationeel haalbare flexibiliteit per procestype. De resultaten dienen primair als validatie en nuancering van top-down schattingen uit de literatuur, en niet als zelfstandige kwantificatie van nationaal inzetbaar flexibiliteitsvermogen.

3.4 Naar een geïntegreerde benadering van het potentieel van industriële vraagrespons per proces

De in hoofdstuk 3 gepresenteerde MIDDEN data biedt een kwantitatieve basis voor het inzicht in geïnstalleerde vermogens per sector. De interviews vullen dit aan met empirische informatie over operationele grenzen, responstijden en organisatorische belemmeringen. Door beide perspectieven te combineren ontstaat een genuanceerder beeld van het IDSR potentieel: hoge elektrische vermogens duiden op schaal, maar niet per definitie op inzetbare flexibiliteit. De mate van flexibiliteit wordt in de praktijk bepaald door procesdynamiek, veiligheid, productkwaliteit en de mate waarin productie onderbroken of verschoven kan worden zonder economische schade.

Figuur 3.2 illustreert dit geïntegreerde beeld: het combineert de kwantitatieve MIDDEN-data met de kwalitatieve inzichten uit de interviews en positioneert de flexibiliteit van verschillende processen langs twee dimensies:

- › het regelvermogen (x-as, kW – GW), en
- › de responstijd of inzetduur (y-as, <1 minuut – >1 week).



Figuur 3.2: Regelvermogen en reactietijd/duur per categorie van processen, verdeeld over de industrie sectoren.

De figuur laat zien dat elektrolyse en compressieprocessen geschikt zijn voor snelle regelcapaciteit, terwijl thermische en continue processen, zoals raffinage en glas, vooral waarde bieden voor tragere load shifting.

Verdere sectorale verdieping in specifieke flexibiliteitsparameters is nodig om een compleet beeld te krijgen van de potentie van industriële vraagrespons. Het ontsluiten van dit potentieel vraagt daarom om een gerichte beleidsaanpak per sector, waarin technische innovatie, infrastructuurplanning en marktprikkels structureel worden verbonden. Alleen dan kan IDSR uitgroeien tot een volwaardige pijler van het toekomstige energiesysteem.

4 Discussie: Interpretatie van bevindingen en implicaties voor leveringszekerheid

Dit rapport laat zien dat IDSR technisch mogelijk is voor verschillende processen, maar in de huidige praktijk slechts beperkt en onder specifieke voorwaarden inzetbaar is. In dit hoofdstuk staan een aantal (8) onderwerpen ter discussie, om te evalueren waar de rol en waarde van IDSR zit in het energiesysteem, ten behoeve van leveringszekerheid. Per discussiepunt is nog een vervolgvraag gedefinieerd, die niet in dit onderzoek apart is behandeld of beantwoord.

1. De behoefte aan IDSR binnen de flexibiliteitsmix van het energiesysteem

De bevindingen uit literatuur, MIDDEN en interviews laten zien dat IDSR technisch mogelijk is en in specifieke processen substantiële volumes kan bieden. Deze flexibiliteit is echter procesgebonden, kortdurend en afhankelijk van kwaliteits- en ketenvoorwaarden. Daarmee kan IDSR niet worden gezien als structurele drager van leveringszekerheid, maar als aanvullende flexibiliteit die vooral bij korte schaarstemomenten inzetbaar is. Deze observatie raakt aan een bredere systeemvraag:

Welke flexibiliteit heeft het energiesysteem nodig, tegen welke kosten, en waar past IDSR binnen deze mix?

Tijdens langdurige tekorten (zoals bij winterluwtes) verschuift het systeemoptimum richting aanbodflexibiliteit: opslag, regelbaar vermogen of aanvullende productiecapaciteit. Interviews bevestigen dat veel industriële processen wel kortdurend kunnen variëren, maar beperkt uren- of dagenlange reducties kunnen leveren zonder gevolgen.

2. Marginale systeemkosten en de waarde van IDSR

Het is belangrijk om de kosten en waarde van IDSR economisch te kunnen kwantificeren. Een manier om deze afweging te structureren is via een marginale aanbodcurve voor stabiliteitsdiensten, waarin flexibiliteitsopties worden geordend op kosten en inzetduur. De literatuur bevestigt dat IDSR zich vooral in het segment van lage kosten, korte duur bevindt, terwijl langere flexibiliteit duurder wordt en verschuift naar supply-side opties. De aanvullende techno-economische vraag om de systeemkosten te vergelijken:

Onder welke omstandigheden is IDSR maatschappelijk goedkoper dan opslag of regelbaar vermogen, en wanneer verschuift het optimum?

Het antwoord vereist consistente kosten- en inzetprofielen, die momenteel ontbreken. Dit maakt de systematische positionering van IDSR binnen adequacy- en stabiliteitsanalyses nog onzeker.

3. Flexibiliteit verandert met elektrificatie: afhankelijkheid én potentieel groeien tegelijk

De analyses laten zien dat de mate van elektrificatie van industriële processen grote invloed heeft op de aard en beschikbaarheid van flexibiliteit. Meer elektrificatie vergroot de afhankelijkheid van een stabiele elektriciteitsvoorziening, maar creëert ook extra

mogelijkheden voor kortdurende flexibiliteit, zoals via elektrolyse of hybride warmtevoorziening. Minder elektrificatie verlaagt de directe elektrische vraag, maar kan de behoefte aan flexibiliteit verschuiven naar waterstof- of biogasproductieketens, die vaak indirect alsnog elektrisch worden gevoed.

Hiermee wordt flexibiliteit niet primair bepaald door het elektrificatiepercentage, maar door de gekozen procesroutes en energiedragers binnen toekomstige industrieconfiguraties. De beleidsvraag die hieruit volgt is:

Hoe verschillen de aard en betrouwbaarheid van IDSR tussen elektrificatie- en waterstofscenario's, en welke rol is in elk scenario realistisch voor leveringszekerheid?

4. Toekomstige procestechnologieën kunnen mogelijk IDSR potentie verhogen

Hoewel huidige processen slechts beperkte flexibiliteit toelaten, laten literatuur en interviews zien dat nieuwe elektrificatietechnologieën, zoals flexibele elektrolyse, elektrische ovens, hybride warmteopwekking en e-crackers, op termijn meer regelbaarheid zouden kunnen bieden. Deze technologieën worden echter nog nauwelijks toegepast en vereisen substantiële investeringen, terwijl de economische waarde van flexibiliteit voor bedrijven nog onvoldoende zichtbaar is.

De toekomst van IDSR hangt daarom deels af van technologische keuzes die bedrijven de komende jaren maken. Zonder duidelijk perspectief op inkomsten uit flexibiliteit wordt vooral geïnvesteerd in processen die zijn geoptimaliseerd voor continuïteit in plaats van regelbaarheid. De discussie die op nationaal niveau gevoerd moet worden:

Welke procestechnologieën bieden op termijn de meest kosteneffectieve flexibiliteit, en welke prikkels zijn nodig om investeringen in flexibele processen aantrekkelijk te maken?

5. Operationele ketenafhankelijkheden begrenzen inzetbaarheid van IDSR

De interviews laten zien dat een aanzienlijk deel van het technisch flexibiliteitspotentieel in de praktijk niet inzetbaar is door proces- en ketenafhankelijkheden. Veel industriële processen zijn geïntegreerd in continue productieketens, waarbij variatie direct gevolgen heeft voor productkwaliteit, veiligheid, procesbeheersing en leveringsverplichtingen richting afnemers. Zelfs wanneer een installatie technisch kan terugregelen, kan dat operationeel onmogelijk zijn vanwege downstream-kwaliteitseisen, batch-synchronisatie, warmtebalans, of contractuele afspraken binnen internationale supply chains.

Deze inzichten verklaren waarom bedrijven flexibiliteit vooral inzetten als risicobeperking (bij extreme prijzen) en zelden als structureel instrument. De inzetbaarheid wordt daarmee niet alleen begrensd door kosten en techniek, maar vooral door factoren die niet door marktprikkels kunnen worden weggeprijsd. Hierdoor ligt de operationele inzetbaarheid van IDSR structureel lager dan wat literatuur en modelstudies veronderstellen. De beleidsvraag die hieruit volgt:

Wat zijn de belangrijkste ketenafhankelijkheden in industriële processen, en wat betekenen deze voor het verschil tussen technisch potentieel en operationeel inzetbare industriële vraagrespons?

6. Onzekerheid over rollen en verantwoordelijkheden belemmert opschaling

De analyses laten zien dat niet techniek, maar governance de grootste beperking vormt voor structurele inzet van industriële vraagrespons (IDSR). Hoewel de overheid verantwoordelijk is voor leveringszekerheid en netbeheerders voor operationele systeemstabiliteit, is nog niet vastgelegd welke rol bedrijven hierin structureel hebben. Interviews laten zien dat bedrijven geen verantwoordelijkheid willen dragen voor systeemstabiliteit, geen directe aansturing door netbeheerders accepteren en alleen investeren wanneer er langdurige zekerheid bestaat

over vergoeding, aansturing en risicoverdeling. Daardoor blijft IDSR nu een vrijwillige bijdrage, geen geborgd onderdeel van de leveringszekerheidsketen.

Voor structurele marktdeelname zijn functies nodig zoals monitoring, prekwalificatie, real-time optimalisatie en risicobeheer. Individuele bedrijven kunnen dit niet efficiënt zelf organiseren. Aggregators en gespecialiseerde dienstverleners zouden deze rol kunnen vervullen, maar de industriële aggregatiemarkt in Nederland is nog nauwelijks ontwikkeld. Hierdoor blijft onduidelijk wie operationeel verantwoordelijk is voor het ontsluiten en aansturen van flexibiliteit. De kernvraag die hieruit voortkomt luidt:

Wie is verantwoordelijk voor het ontsluiten, aansturen en vergoeden van IDSR, en hoe wordt deze rol structureel geborgd?

Zonder een heldere governance-architectuur blijft IDSR afhankelijk van losse initiatieven en kan het niet opschalen tot een betrouwbare flexibiliteitsbron.

7. Collectief belang versus private prikkels

Een kernspanning die uit de interviews naar voren komt, is dat de maatschappelijke baten van flexibiliteit niet in lijn lopen met de private kosten. Afschakeling tijdens schaarstemomenten verlaagt systeemkosten, stabiliseert marktprijzen en vermindert de behoefte aan dure piekcapaciteit. Maar de kosten en risico's van flexibiliteit, zoals productieverlies, kwaliteitsrisico's, lange afkoel- of opstarttijden en ketenimpact, liggen vrijwel volledig bij het individuele bedrijf. Dit creëert een klassiek tragedy-of-the-commons-probleem:

Het collectieve optimum vraagt om flexibiliteit, terwijl individuele bedrijfsoptimalisatie flexibiliteit vaak onaantrekkelijk maakt.

Zonder langjarige vergoedingen, risicodeling of gerichte contractvormen blijft structurele inzet van IDSR daarom beperkt.

8. Studies gebruiken verschillende aannames; dat beïnvloedt verwacht beleid

Top-downanalyses en modelstudies gebruiken andere aannames dan bedrijven zelf hanteren. Dit leidt tot verschillende interpretaties van “beschikbaar vermogen” en van de rol die IDSR kan spelen in adequacy-studies. Deze inconsistentie heeft gevolgen:

- beleidsmakers baseren keuzes soms op IDSR volumes waarvan de inzetbaarheid onzeker is;
- netbeheerders modelleren IDSR die in de praktijk niet gegarandeerd beschikbaar is;
- de industrie herkent zich niet in de aannames van studies en mist mogelijke samenwerkingen of vergoedingskansen voor inzet van IDSR.

Het energiesysteem heeft daarom behoefte aan een **gemeenschappelijke lens** waarin vraag- en aanbodflexibiliteit integraal worden beoordeeld op kosten, betrouwbaarheid en maatschappelijke waarde. Dit vraagt om afstemming tussen top-down (systeem) en bottom-up (proces) analyses, aannames en datagebruik.

Synthese

De discussie maakt duidelijk dat de kernvraag niet is hoeveel IDSR theoretisch beschikbaar is, maar onder welke voorwaarden deze flexibiliteit betrouwbaar, betaalbaar en systematisch inzetbaar wordt. IDSR kan een waardevolle aanvullende bron van flexibiliteit zijn, maar vervangt supply-side opties zoals opslag en regelbaar vermogen niet. Een heldere rolverdeling, passende economische prikkels en betere integratie van vraag- en aanbodflexibiliteit zijn noodzakelijk om de bijdrage van IDSR realistisch te verankeren in de leveringszekerheidsstrategie.

5 Conclusie: Randvoorwaarden voor inzetbaarheid IDSR

Deze verkenning laat zien dat industriële vraagrespons (IDSR) technisch mogelijk is in diverse industriële processen, maar dat het operationeel inzetbare potentieel richting 2030 aanzienlijk lager ligt dan het technisch potentieel suggereert. De inzetbaarheid wordt in de praktijk vooral bepaald door proces- en ketenrandvoorwaarden, en niet door technisch vermogen alleen.

De analyse van literatuur, MIDDEN-data en praktijkinterviews bevestigt dat IDSR in Nederland technisch haalbaar en strategisch relevant is voor leveringszekerheid en systeemkostenreductie. In specifieke processen, zoals chloor- en zink-elektrolyse, compressie en cryogene installaties, kan tientallen tot meer dan 100 MW per locatie aan technisch flexibel vermogen beschikbaar zijn. Chemische en gasproducenten nemen al deel aan balanceringsmarkten. Deze mogelijkheden zijn echter sterk sectorspecifiek en operationeel slechts beperkt inzetbaar. Sectoren met thermisch continue processen, zoals glas, voeding en raffinage, kennen in de praktijk weinig regelruimte. Zonder verdere investeringen in procesflexibiliteit en maatwerkafspraken dreigt een deel van het technisch potentieel onbenut te blijven.

Literatuurstudies schatten het technisch potentieel van IDSR richting 2030 op circa 3,5–4 GW. Deze verkenning laat zien dat slechts een deel hiervan onder realistische condities praktisch en betrouwbaar inzetbaar is. Het operationeel inzetbare potentieel varieert sterk per sector, procesconfiguratie en marktcontext. Verdere kwantificering van operationele flexibiliteit is nodig om dit potentieel betrouwbaar te kunnen bepalen in adequacy- en systeemanalyse.

Randvoorwaarden voor inzetbaarheid

Uit de praktijkinterviews en literatuurvergelijking blijkt dat de inzetbaarheid van IDSR wordt bepaald door onderstaande randvoorwaarden:

1. *Groot technisch potentieel (3,4 GW), maar beperkt operationeel inzetbaar*

Het technisch potentieel ligt voornamelijk in de grote elektriciteitsverbruikende processen zoals elektrolyse, compressie, cryogene installaties en e-boilers, die over tientallen tot meer dan 100 MW flexibel vermogen beschikken per locatie. Door gebrek aan praktijkdata kon het potentieel niet volledig worden gekwantificeerd. Het potentieel van 3,4 GW uit de literatuur geeft slechts een theoretische indicatie van het inzetbare potentieel. Interviews laten zien dat slechts een deel daarvan in de praktijk inzetbaar is door productkwaliteitseisen, beperkte ramp-rates en turndown-ratio's, ketenafhankelijkheden, batchcycli en risico's op ongeplande stilstand.

2. *IDSR is primair inzetbaar bij kortdurende productieschaarste*

IDSR blijkt vooral effectief in het opvangen van kortdurende prijs- of systeemstress (minuten tot enkele uren). Bij langdurige tekortperiodes verschuift de behoefte naar aanbodzijdeflexibiliteit, zoals opslag of regelbaar vermogen.

3. *Proces- en ketenafhankelijkheden begrenzen inzetduur en frequentie*

Veel industriële processen kunnen niet autonoom worden af- of opgeschaald.

Upstream/downstream afhankelijkheden, continue productie-eisen en veiligheidsmarges bepalen in sterke mate de operationele inzetbaarheid.

4. *Economische prikkels zijn onvoldoende voor structurele inzet van IDSR*

Bedrijven gebruiken IDSR primair om extreme prijzen te voorkomen, niet als structurele marktactiviteit. Zonder stabiele vergoedingsmechanismen, risicodeling, betrouwbare dispatch-signalen of langjarige contracten blijft structurele IDSR-deelname beperkt.

Daarnaast blijkt uit interviews dat de economische haalbaarheid sterk varieert: stilstandkosten, herstartverliezen en onzekerheid over vergoedingsmechanismen maken dat de businesscase voor veel processen nu onrendabel of onzeker blijft.

5. *Grote variaties in aannames beperken beleidsduidelijkheid*

Doordat literatuurstudies vaak uitgaan van andere aannames dan bedrijven in de praktijk hanteren (zoals responstijd, inzetfrequentie, afschakelduur en stilstandkosten), ontstaat een vertekend beeld van de daadwerkelijke inzetbaarheid van flexibiliteit, waardoor betrouwbare adequacy-analyses en effectief beleid worden bemoeilijkt.

IDSR en leveringszekerheid

IDSR is richting 2030 slechts beperkt en onder bepaalde voorwaarden inzetbaar voor leveringszekerheid; de operationele inzetbaarheid ligt structureel lager dan het technisch potentieel suggereert. IDSR kan potentieel wel een betekenisvolle bijdrage leveren aan leveringszekerheid door het verminderen van piekbelasting en het opvangen van kortdurende schaarstemomenten. IDSR is echter geen substituuut voor structurele productiecapaciteit, netverzwaring of (middel)lange termijn opslag, en kan langdurige tekorten niet zelfstandig oplossen.

Financiële prikkels zijn daarbij cruciaal: gerichte vergoedingen vanuit systeempartijen zoals TenneT en overheidssubsidies kunnen de drempel voor investeringen in flexibele assets aanzienlijk verlagen. Tegelijk is het belangrijk dat decarbonisatie technologieën die intrinsiek flexibel kunnen opereren, zoals elektrolyse, hybride warmtesystemen en compressie, expliciet worden meegenomen in stimuleringsregelingen.

6 Aanbevelingen: Beleidsrichtingen en vervolgonderzoek

De discussiepunten en de conclusies maken duidelijk dat de meerwaarde van IDSR vooral zit in kortdurende, procesgebonden flexibiliteit, en dat de inzetbaarheid wordt begrensd door ketenafhankelijkheden, economische prikkels en onduidelijke governance. Tegelijkertijd groeit de behoefte aan flexibiliteit richting 2030. TNO heeft daarom aanbevelingen voor:

1. **Beleidsrichtingen en handelingsopties** om IDSR realistisch te positioneren binnen de flexibiliteitsmix en de randvoorwaarden voor inzetbaarheid te verbeteren.
2. **Een kennisagenda en programmatische onderzoeksaanpak** om de empirische basis te versterken en onzekerheden in modellen en beleid te verminderen.

6.1 Beleidsrichtingen en handelingsopties

De beleidsrichtingen in dit hoofdstuk geven richting aan hoe industriële vraagrespons realistisch kan worden ingezet als aanvullende flexibiliteitsbron. Ze zijn gegroepeerd in vijf thema's:

1. Positioneer IDSR expliciet als aanvullende flexibiliteit binnen de flexibiliteitsmix

IDSR kan een waardevolle aanvullende bron zijn, maar vervangt supply-side opties niet.

- Positioneer IDSR in systeemanalyse en beleid nadrukkelijk als aanvullende, kortdurende flexibiliteit, vooral gericht op het verminderen van piekbelasting en het opvangen van korte schaarstemomenten.
- Ontwikkel, samen met TenneT, netbeheerders en kennisinstellingen, een gemeenschappelijk raamwerk voor de vergelijking van IDSR, opslag en regelbaar vermogen op basis van kosten, inzetduur en betrouwbaarheid (marginale aanbodcurve voor flexibiliteit).
- Gebruik dit raamwerk in adequacy- en stabiliteitsanalyses om te voorkomen dat onrealistische IDSR-volumes worden verondersteld in de leveringszekerheidsstrategie.

2. Verbeter de economische condities en contractvormen voor flexibiliteit

De spanning tussen collectieve baten en private kosten beperkt de bereidheid om flexibiliteit beschikbaar te stellen.

- Ontwikkel marktproducten en contractvormen die niet alleen geleverde energie (MWh), maar ook beschikbaarheid en bereidheid tot flexibiliteit belonen, bijvoorbeeld via capaciteits- of beschikbaarheidsvergoedingen tijdens schaarste.
- Ontwerp risicodelingsmechanismen (bijv. vergoeding van productieverlies, kwaliteitsrisico's, of standby-capaciteit) om de mismatch tussen maatschappelijke baten en private risico's te verkleinen.
- Zorg dat stimuleringsinstrumenten voor decarbonisatie (zoals elektrificatie- en waterstofregelingen) expliciet rekening houden met de flexibiliteitswaarde van nieuwe

assets, zodat regelbare technologieën niet worden benadeeld ten opzichte van inflexibele alternatieven.

3. Borg governance en rolverdeling voor industriële vraagrespons

Onzekerheid over wie verantwoordelijk is voor ontsluiten, aansturen en vergoeden van flexibiliteit belemmert opschaling.

- Ontwikkel een sectorbreed governance kader waarin rollen en verantwoordelijkheden van overheid, netbeheerders, aggregators en bedrijven bij IDSR expliciet worden vastgelegd.
- Stimuleer de ontwikkeling van een industriële aggregatiemarkt, met duidelijke eisen aan monitoring, prekwificatie en betrouwbaarheid, zodat functies als real-time optimalisatie en risicobeheer efficiënt kunnen worden georganiseerd.
- Leg in beleids- en marktregels vast hoe aansturingsrechten, procesrisico's en onbalanskosten worden verdeeld, zodat bedrijven vooraf weten onder welke condities zij flexibiliteit beschikbaar stellen.

4. Adreseer ketenafhankelijkheden en procesrandvoorwaarden in sectorale strategieën

Veel van de beperkingen zitten in kwaliteit, veiligheid, contracten en internationale supply chains.

- Breng per sector de belangrijkste ketenafhankelijkheden en procesrandvoorwaarden in kaart (kwaliteitseisen, batchcycli, warmtebalans, leveringscontracten) en ontwikkel sectorspecifieke richtlijnen voor veilige en verantwoorde inzet van flexibiliteit.
- Verbind IDSR aan cluster- en transitieagenda's (zoals de Actieagenda Elektrificatie Industrie) zodat flexibiliteit vanaf het ontwerp wordt meegenomen in procesroutes en investeringsbeslissingen.
- Stimuleer clusterpilots waarin meerdere schakels in de keten tegelijk ervaring opdoen met flexibiliteit, zodat de impact op kwaliteit, leveringszekerheid en ketenperformance zichtbaar wordt.

5. Veranker flexibiliteit in toekomstige procestechnologieën en elektrificatie strategieën

Toekomstige IDSR-capaciteit hangt sterk af van technologische keuzes van vandaag.

- Zorg dat flexibiliteit expliciet wordt meegenomen in technologie- en investeringsprogramma's voor elektrificatie (bijv. e-boilers, elektrolyse, elektrische ovens, hybride warmte).
- Ontwikkel beleidsprikkelers en beoordelingscriteria die flexibele procestechnologieën bevoordelen wanneer zij vergelijkbare of betere CO₂-reductie bieden dan inflexibele alternatieven.
- Stimuleer dat nieuwe grootschalige assets worden ontworpen met flexibiliteitsopties en aanstuurbaarheid als integraal onderdeel, niet als bijproduct.

Deze beleidsrichtingen geven samen richting aan hoe IDSR realistisch, aanvullend en betrouwbaar kan worden verankerd binnen de leveringszekerheidsstrategie, zonder het te overvragen als structurele drager van het systeem.

6.2 Kennisagenda en vervolgonderzoek

Naast gerichte beleidsmaatregelen is verdere kennisontwikkeling nodig om onzekerheden in de inzetbaarheid van IDSR te verkleinen en modellen en beleid beter te voeden. De discussiepunten laten zien dat vooral de empirische basis en de koppeling tussen proces- en systeemniveau nog beperkt zijn. Dit vraagt om een programmatische onderzoeksaanpak waarin literatuur, data, pilots en modellering structureel worden gecombineerd.

De belangrijkste elementen van de kennisagenda zijn:

1. *Vastlegging van procesflexibiliteit en parameters in een Monitor Industriële Flexibiliteit*
Verzamel en standaardiseer actuele procesdata over inzetduur, ramp-rates, turndown-ratio's, herstartkosten, ketenafhankelijkheden en stilstandrisico's, zodat realistisch inzetbare flexibiliteit beter kan worden gekwantificeerd. Ontwikkel een Monitor Industriële Flexibiliteit om deze data en operationele ontwikkelingen te volgen en te analyseren.
2. *Eenduidige aannames en methodieken in adequacy- en systeemstudies*
Ontwikkel een consistent en transparant raamwerk voor de representatie van IDSR, inclusief uniforme aannames over responstijden, inzetfrequentie en kosten. Dit vermindert variatie tussen studies en vergroot de betrouwbaarheid van beleidsanalyses.
3. *Gerichte marktproducten en voorspelbare vergoedingsmechanismen*
Ontwerp marktproducten die aansluiten op procesrealiteit (kortdurende schaarstemomenten, beperkte inzetduur) en bied stabiele, langjarige en kostendekkende vergoedingen. Hiermee wordt deelname aan flexibiliteitsmarkten aantrekkelijker en risico's worden beter gedeeld.
4. *Pilots en operationele arrangementen voor aggregatie en dispatch-zekerheid*
Richt praktijkpilots in waarin verificatie, communicatie, data-uitwisseling en operationele zekerheid kunnen worden getest. Dit helpt om onduidelijkheden in inzetbaarheid, betrouwbaarheid en interactie tussen industrie, netbeheerders en aggregators weg te nemen.
5. *Integratie van IDSR in regionale net- en systeemanalyse*
Veranker IDSR expliciet in cluster- en netcapaciteitsplanning, waarbij aandacht wordt besteed aan locatiespecifieke beperkingen, interacties met elektrificatietrajecten en de impact op regionale netcongestie.
6. *Heldere governance en verantwoordelijkheidstoedeling*
Ontwikkel een sectorspecifiek kader voor de rolverdeling tussen industrie, aggregators, netbeheerders en overheid, inclusief afspraken over risicoverdeling, verificatie, dispatch-zekerheid en contractuele verantwoordelijkheden. Dit is noodzakelijk om de betrouwbaarheid en effectiviteit van IDSR op systeemniveau te kunnen garanderen ten behoeve van de leveringszekerheid.

Slotbeschouwing

Partijen die vandaag al actief industriële vraagresponso inzetten, zoals Nobian, Nyrstar en Air Liquide, verfijnen hun flexibele inzet al jaren. Tegelijkertijd blijft het aantal bedrijven dat zich structureel voorbereidt op een toekomst waarin industriële vraagresponso een relevante systeemfunctie vervult, beperkt. Zonder gericht beleid, gedeelde leerervaringen en samenhangende kennisontwikkeling dreigt IDSR een nichetoepassing te blijven en kan de leveringszekerheid in gevaar komen.

Een programmatische aanpak, vergelijkbaar met de Routekaart Elektrificatie Industrie (TKI E&I, 2021), kan deze impasse doorbreken door kennisdeling, pilots en modelontwikkeling te bundelen. Deze verkenning laat zien dat industriële vraagresponso geen uniforme bron van vermogen is, maar een spectrum aan procesgebonden flexibiliteitsopties. Mits realistisch gewaardeerd en passend ondersteund kan deze flexibiliteit uitgroeien tot een betekenisvolle aanvullende pijler van een betaalbaar, betrouwbaar en duurzaam energiesysteem. De bevindingen uit dit rapport bieden daarmee directe aanknopingspunten voor de Actieagenda Elektrificatie Industrie en vormen een inhoudelijke basis voor toekomstige systeemanalyses van kennisinstellingen en netbeheerders.

Referenties

- ACER. (2022). *Market monitoring report: Electricity wholesale markets*. Agency for the Cooperation of Energy Regulators.
- Autoriteit Consument & Markt (ACM). (2023a). *Kader congestiemanagement elektriciteit*. ACM.
- Autoriteit Consument & Markt (ACM). (2023b). *Methodebesluit elektriciteit regionale netbeheerders 2022–2026*. ACM.
- Agora Energiewende. (2013). *Lastmanagement in der Industrie: Kurzstudie Süddeutschland*. Agora Energiewende.
- Agora Energiewende. (2015). *Flexibility in thermal power plants: With a focus on existing coal-fired power plants*. Agora Energiewende.
- Boston Consulting Group. (2022). *Versnelling verduurzaming van de industrie: Eindrapport*. CE Delft. (2014). *Markt en flexibiliteit: De rol van flexibiliteitsopties in de Nederlandse elektriciteitsmarkt*. CE Delft.
- CREG. (2021). *Study on the design and implementation of the Belgian capacity remuneration mechanism*. Commission for Electricity and Gas Regulation.
- Deutsche Energie-Agentur (dena). (2016). *Demand side management: Potenziale in der Industrie*. dena.
- DNV GL. (2020a). *De mogelijke bijdrage van industriële vraagrespons aan leveringszekerheid*. Rapport voor TenneT TSO B.V.
- DNV GL. (2020b). *Industrial demand side response potential in the Netherlands*. Report for TenneT TSO B.V.
- DNV & smartEn. (2022). *Mapping and assessing the potential of demand-side flexibility in Europe*. smartEn.
- Eerste Kamer der Staten-Generaal. (2025). *Nota van toelichting bij het Energiebesluit (Energiewet)* (Kamerstuk 36 298).
- Elia & E-CUBE. (2017). *Industrial demand response in Belgium*. Elia Group.
- Elia Transmission Belgium. (2022). *Adequacy and flexibility study for Belgium*. Elia.
- ENTSO-E. (2017). *Commission Regulation (EU) 2017/2195 establishing a guideline on electricity balancing*. Official Journal of the European Union.
- ENTSO-E. (2022). *European resource adequacy assessment*. ENTSO-E.
- Fraunhofer ISI & FFE. (2013). *Industrielles Lastmanagement in Deutschland*. Fraunhofer ISI.
- Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). (2018). *Roadmap elektrificatie Nederlandse industrie*. ECN.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). *Kamerbrief voortgang verduurzaming cluster 6 en Top-60-rapportage* (Kamerstuk 32 637, nr. 594).
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2024). *Actieagenda elektrificatie industrie: 95% CO₂-reductie in 2050*.
- Movares. (2014). *Industriële demand response in Nederland*. Movares.
- Movares. (2016). *Flexibiliteitsopties voor de Nederlandse industrie*. Movares.
- Netbeheer Nederland. (2023a). *I13050-scenario's: Elektriciteitsvoorziening 2050*. Netbeheer Nederland.
- Netbeheer Nederland. (2023b). *Onderzoeksroadmap flexibiliteit*. Netbeheer Nederland.
- Netbeheer Nederland. (2023c). *Scenarioanalyse elektrificatie en flexibiliteit 2030–2040*. Netbeheer Nederland.
- Netbeheer Nederland. (2024). *Voorstel voor tijdsafhankelijke transporttarieven*. Netbeheer Nederland.

- Strategy&. (2021). Unlocking industrial demand side response. PwC.
- TenneT TSO B.V. (2021). Unlocking industrial demand side response. TenneT.
- TenneT. (2023). Productinformatie balancing services. TenneT.
- TenneT TSO B.V. (2025). *Monitor leveringszekerheid 2025*.
- TKI Energie & Industrie. (2022). *Whitepaper industriële flexibiliteit*. Topsector Energie.
- Topsector Energie. (2021). Electrification of industrial heat: Opportunities for accelerated decarbonisation. Topsector Energie.
- TNO. (2020). Verkenning instrumentatie voor industriële elektrificatie (P11648). TNO Energy Transition.
- TNO. (2021). Routekaart elektrificatie in de industrie. TNO Energy Transition.
- TNO. (2022). Extra opgave elektriciteitsvoorziening 2030 (M10695). TNO.
- TNO. (2023). *Flexibiliteit in het elektriciteitssysteem* (Interimrapport P11051). TNO Energy Transition.
- TNO. (2025). Hoge-temperatuur warmteopslag voor de industrie: Potentieel, systeemwaarde en toepassingsmogelijkheden.
- Tweede Kamer der Staten-Generaal. (2023). *Industriebeleid* (Kamerstuk 32 637, nr. 595).

Bijlage A

Sectorale analyse van interviewbevindingen

De interviews laten zien dat de praktijkervaringen grotendeels aansluiten bij de bevindingen uit de literatuur: het technisch potentieel is aanwezig, maar de toepassing wordt beperkt door proceskarakteristieken, hoge investeringsdrempels, markttoegang en tariefstructuren. Tegelijkertijd brengen de gesprekken aanvullende inzichten naar voren, zoals de nadruk op veiligheid, frustratie over netkosten en de internationale concurrentiepositie, die in de literatuur slechts zijdelings aan bod komen. In de volgende subsector analyse worden de belangrijkste inzichten systematisch vergeleken met de literatuur.

In Tabel A.1 zijn de geïnterviewde bedrijven en contactpersonen weergegeven. De selectie omvat representatieve spelers uit de belangrijkste energie-intensieve sectoren; chemie, metaal, glas, voeding en raffinage.

Tabel A.1: Geïnterviewde bedrijven

Industrie sector	Bedrijf	Contactpersonen
Chemie (chlooralkali)	Nobian	Peter Hoving, Douwe Tuinstra
Chemie (kunstmest)	OCI Nitrogen	Ruud Swarts
Chemie (gassen)	Air Liquide	Robert Haffner, Daan Mast
Metaal	Nyrstar	Paul Hamers, Philip Eyckmans
Voedingsmiddelen	Cargill	Maurice van Bourgonje
Glas	O-I Ardagh LC Glass / VNG	Joost Laven Sven Roger Kahl Marco van Valburg
Raffinaderij	BP	Cornelis Boot, Cheyhong Hsia, Cyriel Pieters

A.1 Chemische industrie (chlooralkali; Nobian)

Technisch potentieel en praktijkervaring

Nobian behoort tot de meest ervaren industriële spelers in vraagresponso. Het bedrijf biedt al jaren regelvermogen aan via mFRR- en aFRR-markten, van enkele tot tientallen megawatt. De fabriek in Rotterdam heeft een geïnstalleerd vermogen van 180 MW, waarvan een deel flexibel inzetbaar is. Ook wordt buffercapaciteit in chlooropslag benut om productie enkele uren te verschuiven, al beperken veiligheidsregels de speelruimte. Daarnaast beschikken de zoutfabrieken over warmtepompen van circa 6 MW die deels stroom gestuurd opereren en tot ongeveer 30% van hun capaciteit kunnen worden ingezet voor aFRR-regelvermogen, wat extra flexibiliteit biedt binnen bestaande processen.

Belangrijkste barrières

De beperkingen zitten vooral in het technische bereik van elektrolyse en de veiligheidsbalans tussen chloor- en waterstofproductie. Onder 30% belasting moet de fabriek worden stilgelegd, terwijl frequent schakelen leidt tot extra slijtage en kwaliteitsverlies. Operationeel is het lastig om binnen minuten te reageren, en contractueel ervaren bedrijven onzekerheid over de effecten van flexibiliteitsinzet op piekbelasting en transportkosten. Ook de administratieve complexiteit van deelname aan balanceringsmarkten en groothandelsmarkten vormt een barrière.

Kansen en voorwaarden

Nobian ziet ruimte voor groei via kortere marktintervallen (bijvoorbeeld sub-uur) en duidelijkere afspraken met netbeheerders en marktpartijen over flexibele contractvormen. Met name uitbreiding en verdere verfijning van marktproducten en liquiditeit op de day-ahead en intraday markten binnen de Single Day-Ahead Coupling (SDAC), evenals een bredere inzetbaarheid van aFRR-capaciteit voor vraagzijde-flexibiliteit, kunnen de businesscase voor IDSR versterken. Op termijn bieden industriële warmtepompen (zoals MVR) en ketensamenwerking met klanten aanvullend flexibiliteitspotentieel. Flexibiliteit wordt daarbij niet alleen gezien als operationeel vereiste, maar ook als strategisch instrument om prijsvolatiliteit en marktrisico's beter op te vangen.

Kenmerk	Beschrijving
Hoofdproces	Elektrolyse voor chloor- en waterstofproductie
Flexibiliteitsoptie	aFRR/mFRR via elektrolyse, buffercapaciteit in chloortanks, warmtepompen (~6 MW) in zoutproductie
Flexvermogen	20–30 MW regelbaar vermogen
Flexpercentage	20–30% van geïnstalleerd elektrisch vermogen
Tijdverloop op-/afschakelen	Minuten tot enkele uren
TRL / wanneer beschikbaar	Nu beschikbaar

A.2 Chemische industrie (ammoniak; OCI Nitrogen)

Technisch potentieel en praktijkervaring

OCI Nitrogen heeft beperkte mogelijkheden om flexibiliteit te leveren vanwege de continue en chemisch gevoelige aard van de ammoniakproductie. Het tijdelijk stilleggen van installaties is alleen rendabel bij extreem hoge elektriciteitsprijzen, aangezien zelfs korte stops kunnen leiden tot dagenlange stilstand en veiligheidsrisico's. Enkele ondersteunende eenheden, zoals compressoren, kunnen beperkt deelnemen aan de onbalansmarkt. Via ondersteunende units binnen het cluster kan beperkt worden deelgenomen aan de onbalansmarkt. De inzet van een aankomende e-boiler op Chemelot biedt mogelijk een kans voor flexibele stoomproductie en arbitrage tussen eigen productie en import van waterstof.

Belangrijkste barrières

De voornaamste drempels voor bedrijven liggen in veiligheid en processtabiliteit, hoge energie- en nettarieven en onzeker beleid. Hybride elektrificatie leidt daarbij tot dubbele vaste kosten, terwijl beperkte aansluitcapaciteit en onduidelijkheid over de beschikbaarheid en timing van toekomstige CO₂-infrastructuur investeringsbeslissingen belemmeren, zoals aansluiting op grootschalige CCS-projecten. Deze onzekerheden remmen niet alleen emissiereductie-investeringen, maar beperken ook de bereidheid van bedrijven om processen flexibel in te richten en beschikbaar te stellen voor industriële vraagrespons. Beleidsinstrumenten zoals ETS, CBAM en nationale klimaatheffingen vergroten de druk op kosten en concurrentiepositie, terwijl afnemers veelal niet bereid zijn een meerprijs te betalen voor duurzame producten. In deze context worden flexibiliteitsinvesteringen door bedrijven vooral gezien als additioneel risico, tenzij het markt- en beleidskader voldoende voorspelbaar is.

Kansen en voorwaarden

Volgens OCI liggen de grootste kansen in collectieve infrastructuurinvesteringen binnen industriële clusters en heldere afspraken met netbeheerders over capaciteit en tariefstructuren. E-boilers kunnen een rol spelen bij systeembalancering, mits deze marktconform kunnen worden ingezet. Verder is behoefte aan stabiel en voorspelbaar beleid rond energie- en klimaatwetgeving en aan gerichte steun of gegarandeerde vergoedingen om investeringen in flexibiliteit rendabel te maken.

Kenmerk	Beschrijving
Hoofdproces	Ammoniak- en kunstmestproductie via continue thermische processen
Flexibiliteitsoptie	E-boilers voor flexibele stoomvoorziening, compressoren, waterstofarbitrage
Flexvermogen	5–10 MW (geschat bij e-boilerimplementatie)
Flexpercentage	1–5% van elektrisch vermogen
Tijdverloop op-/afschakelen	Minuten tot kwartieren voor hulpsystemen, dagen voor hoofdproces
TRL / wanneer beschikbaar	Flex in compressoren nu mogelijk, e-boiler online eind 2025, waterstofarbitrage na 2030

A.3 Chemische industrie (industriële gassen; Air Liquide)

Technisch potentieel en praktijkervaring

De gassenindustrie, met name producenten van zuurstof, stikstof en waterstof, beschikt over aanzienlijke mogelijkheden voor vraagrespons. Bij Air Liquide zijn elektrolyse-installaties en compressoren de belangrijkste flexibele assets. Nieuwe installaties kunnen op- en afregelen binnen enkele megawatts, terwijl productie-eenheden voor vloeibare gassen tijdelijk kunnen worden uitgeschakeld bij lage prijzen. De bestaande infrastructuur maakt deelname aan balanceringsmarkten zoals mFRR en groepsregeling technisch haalbaar, al blijft dit nog beperkt toegepast.

Belangrijkste barrières

De voornaamste belemmeringen liggen op financieel-economisch en marktvlak. Er bestaat onzekerheid over toekomstige elektriciteitsprijzen en over de vergoeding voor flexibiliteit, waardoor investeringen als speculatief worden beschouwd. De businesscases zijn complex, sterk asset specifiek en kennen terugverdientijden van meer dan tien jaar. Daarnaast wordt flexibiliteit vaak niet als kernactiviteit gezien, waardoor prioriteit en interne capaciteit ontbreken. Verschillen in nettarieven tussen Nederland en buurlanden verhogen operationele kosten van investeringen in flexibele productiecapaciteit.

Kansen en voorwaarden

Bedrijven zien perspectief in garantieregelingen of capaciteitsmechanismen die de onderkant van de businesscase afdekken. Duidelijkheid over de vergoeding voor flexibiliteit en langetermijncontracten voor regelvermogen zijn essentieel om investeringszekerheid te creëren. Daarnaast bieden internationale elektriciteitsmarkten kansen om flexibiliteit over grenzen heen te verhandelen, mits congestiebeheer en tarieven beter worden geharmoniseerd. Tot slot wordt benadrukt dat ondersteuning bij investeringen in niet-kernactiviteiten, zoals batterijen of e-boilers, de bereidheid tot deelname aan balancerings- en groothandelsmarkten aanzienlijk kan vergroten.

Kenmerk	Beschrijving
Hoofdproces	Productie van zuurstof, stikstof en waterstof via elektrolyse en compressie
Flexibiliteitsoptie	Elektrolyzers, compressoren, vloeibaar-gasinstallaties (load shifting)
Flexvermogen	5–10 MW regelbaar per installatie
Flexpercentage	10–20% van elektrisch vermogen
Tijdverloop op-/afschakelen	Binnen minuten (1–5 min)
TRL / wanneer beschikbaar	Nu beschikbaar met contract TenneT

A.4 Basismetaalindustrie (Nyrstar)

Technisch potentieel en praktijkervaring

De basismetaalindustrie, en in het bijzonder Nyrstar, behoort tot de meest actieve industriële spelers op het gebied van vraagrespons. Het bedrijf levert momenteel ongeveer 100 MW aan aFRR-flexibiliteit door de elektriciteitsvraag in de elektrolyseprocessen tijdelijk terug te schalen, doorgaans binnen vijf minuten. Daarnaast is nog enkele megawatt extra regelvermogen beschikbaar binnen de bestaande installaties. Verdere uitbreiding van de elektrolysecapaciteit, met circa 25%, wordt technisch haalbaar geacht, maar vereist substantiële investeringen in productie- en netinfrastructuur.

Belangrijkste barrières

De grootste belemmering ligt in de financiële en regulatoire randvoorwaarden. De hoge Nederlandse netwerkkosten vormen een structureel nadeel ten opzichte van buitenlandse vestigingen en drukken zwaar op de operationele marge. Daarnaast kunnen onder huidige voorwaarden bepaalde capaciteitsregelingen (zoals de NRA-contracten) deelname aan balanceringsmarkten beperken, doordat bedrijven tijdelijk geen regelvermogen mogen aanbieden wanneer transportcapaciteit is ingeperkt. Hierdoor blijft de businesscase voor uitbreiding van flexopties onzeker, ondanks het aantoonbare technische potentieel.

Kansen en voorwaarden

Volgens Nyrstar kan een eenmalige investeringssteun (CAPEX-subsidie) de drempel voor uitbreiding van flexibele elektrolyse verlagen. Een dergelijke investering zou bijdragen aan systeemstabiliteit, kan helpen negatieve prijsperiodes te mitigeren en kan bijdragen aan het leveren van goedkoop regelvermogen. Ook pleit het bedrijf voor opname van industriële vraagsturing in stimuleringsregelingen zoals de SDE++, en voor een stabiel, transparant kader voor nettarieven en vergoedingen voor flexibiliteit. Actieve betrokkenheid van de overheid bij het erkennen en waarderen van IDSR wordt als essentieel gezien voor toekomstige investeringsbeslissingen.

Kenmerk	Beschrijving
Hoofdproces	Elektrolyse van zink
Flexibiliteitsoptie	aFRR via op-/afschakelen van elektrolyse, optimalisatie op day-ahead markt
Flexvermogen	70–100 MW regelbaar vermogen
Flexpercentage	25–30% van elektrisch vermogen
Tijdverloop op-/afschakelen	Binnen 5 minuten
TRL / wanneer beschikbaar	Nu beschikbaar, elektrolyse capaciteit uitbreiding komende jaren

A.5 Voedingsmiddelenindustrie (Cargill)

Technisch potentieel en praktijkervaring

Cargill beschikt over beperkte maar diverse mogelijkheden voor vraagrespons. De bestaande installaties, waaronder biogas gestookte motoren en warmtesystemen met buffering, kunnen in beperkte mate worden af- of opgeschakeld, vooral op kortere tijdschalen. De productieprocessen zijn grotendeels continu, waardoor substantiële flexibiliteit slechts in specifieke situaties mogelijk is. Elektrisch bijstoken en het tijdelijk omleiden van biogas naar stoomproductie bieden in specifieke installaties enige regelruimte, maar afschakeling wordt zelden toegepast.

Belangrijkste barrières

De grootste belemmeringen liggen in netcongestie en infrastructuurbeperkingen, omdat elektrificatie en nieuwe industriële processen (naast de gas en elektrische boilers) mogelijk meer flexibel in te zetten zijn als vraagrespons. Een geplande uitbreiding van het aansluitvermogen kon niet volledig worden gerealiseerd, waardoor verdere elektrificatie wordt vertraagd. De elektrische infrastructuur is ontoereikend en niet goed afgestemd op verduurzamingsinitiatieven, wat investeringsbeslissingen afremt. Daarnaast zijn de technische processen moeilijk abrupt te stoppen zonder kwaliteits- of veiligheidsrisico's. Ook de stijgende energiekosten en het gebrek aan financiële prikkels maken investeringen in flexibiliteit minder aantrekkelijk.

Kansen en voorwaarden

Cargill ziet kansen in stabiele langetermijncontracten voor elektriciteitsprijzen, beter afgestemde samenwerking met netbeheerders, en financiële compensatie voor beschikbaarheid van flexibiliteit. Daarnaast kan duurzame stoomproductie een alternatief vormen voor directe elektrificatie, mits deze systeemdiensten kan leveren. Duidelijkheid over tarieven, markttoegang en netuitbreidingsplannen is cruciaal om elektrificatie en flexibele inzet rendabel te maken.

Kenmerk	Beschrijving
Hoofdproces	Verwerking van agrarische grondstoffen (batchprocessen, stoomsystemen)
Flexibiliteitsoptie	Biogasgeneratoren, elektrische bijstook, warmtebuffering
Flexvermogen	1–2 MW regelbaar
Flexpercentage	5–10% van elektrisch vermogen
Tijdverloop op-/afschakelen	15–30 minuten
TRL / wanneer beschikbaar	Gasgeneratoren nu beschikbaar, overige flex niet komende jaren

A.6 Glasindustrie (O-I, Ardagh, LC Glass)

Technisch potentieel en praktijkervaring

De glasindustrie kent slechts beperkte mogelijkheden voor industriële vraagrespons. De ovens zijn continu-processen die 24/7 draaien en gevoelig zijn voor temperatuurschommelingen. Kleine vormen van flexibiliteit zijn mogelijk via elektrische boosters en hybride ovens, waarmee het verbruik tijdelijk met ongeveer 10–15% kan worden verlaagd, meestal voor een periode van minder dan een uur. Sommige fabrieken compenseren dit door tijdelijk gas bij te schakelen of door productie beter af te stemmen op beschikbare hernieuwbare elektriciteit via langjarige PPA's. Het terugschakelen van 1 uur afschakelen naar het gewenste niveau duurt echter veel langer; 12-16 uur.

Belangrijkste barrières

De grootste beperkingen zijn technisch en infrastructuur gerelateerd. Ovens opereren soms wel 15 jaar continue en kunnen niet snel worden uitgeschakeld zonder risico op schade, kwaliteitsverlies of verhoogde emissies. Het herstellen kan dagen tot vele weken duren, in het geval van oven reparaties zelfs enkele maanden. Temperatuurschommelingen leiden snel tot glasdefecten en veiligheidsrisico's, waardoor operators slechts binnen smalle marges kunnen sturen. Daarnaast vormt netcongestie een structurele drempel: uitbreidingen van aansluitcapaciteit zijn in sommige gevallen pas na 2030 voorzien. Ook is de inzet van alternatieve energiedragers zoals waterstof of biogas beperkt door vergunningseisen, hoge kosten en beperkte beschikbaarheid. De levensduur van een oven is al snel 20 jaar. Aanstaaende oven vervangingen waarbij verdere elektrificatie (efficiency, emissie reductie) of flexibiliteit niet van toepassing zijn, zijn een gemiste kans voor 2 decennia of langer.

Kansen en voorwaarden

Bedrijven zien vooral perspectief in de hybride elektrificatie van ovens, waarbij 60–80% van de warmte elektrisch wordt geleverd en gas dient als flexibele buffer. Daarnaast bieden PPA's met wind- en zonne-energie mogelijkheden om productie en energieaanbod beter op elkaar af te stemmen. Pilotprojecten op locatie kunnen waardevolle ervaring opleveren met flexibele inzet van ovens, terwijl een aangepast regelgevend kader, bijvoorbeeld langere tijdvakken voor afregelcapaciteit, de praktische deelname aan markten kan vergroten. Structurele investeringen in netversterking en maatwerkafspraken per industrieterrein blijven daarbij cruciaal.

Kenmerk	Beschrijving
Hoofdproces	Glasproductie in continu-smeltovens
Flexibiliteitsoptie	Hybride ovens (60–80% elektrisch), elektrische boosters, kortdurende reductie verbruik
Flexvermogen	1–3 MW per fabriek
Flexpercentage	10–15% van elektrisch vermogen
Tijdverloop op-/afschakelen	Minuten tot 1 uur
TRL / wanneer beschikbaar	Nu beschikbaar, elektrische ovens in toekomst

A.7 Raffinaderijen (BP)

Technisch potentieel en praktijkervaring

De raffinagesector kent beperkte directe mogelijkheden voor industriële vraagresponso vanwege het continue karakter van de productieprocessen. De flexibiliteit ligt vooral in de stoomvoorziening: e-boilers van circa 60–70 MW kunnen mogelijk in de toekomst worden ingezet om tijdelijk elektriciteit te gebruiken voor stoomproductie wanneer prijzen laag zijn of overschotten ontstaan. Door deze inzet af te wisselen met conventionele ketels die op minimumlast blijven draaien, kan op systeemniveau regelvermogen worden geleverd zonder de primaire processen te onderbreken.

Belangrijkste barrières

De grootste knelpunten liggen op het vlak van infrastructuur en regelgeving. Uitbreiding van aansluitcapaciteit is onzeker en pas op de langere termijn mogelijk, terwijl onder het huidige reguleringskader bestaande capaciteit kan opnieuw worden beoordeeld of herverdeeld onder ACM-toezicht. Ook de hoge Nederlandse nettarieven vormen een structureel nadeel ten opzichte van buitenlandse raffinaderijen. Bovendien beperken vergunningseisen en ACM-regels de mogelijkheden voor directe samenwerking of collectieve oplossingen binnen industriële clusters. Beleidsinstabiliteit rond CO₂-heffingen, stikstofregels en maatwerkafspraken vergroot de onzekerheid bij investeringsbeslissingen.

Kansen en voorwaarden

BP ziet perspectief in clustermaatwerk, waarbij overheid, netbeheerder en industrie gezamenlijk afspraken maken over aansluitcapaciteit en prioritering van verduurzamingsprojecten. Ook worden CAPEX-steun, aangepaste nettarieven en langetermijncontracten voor flexibiliteit genoemd als voorwaarden om elektrificatieprojecten economisch haalbaar te maken. De raffinagesector kan zo, binnen de context van de Rotterdamse energie- en waterstofhub, bijdragen aan systeemflexibiliteit en aan de integratie van wind-op-zee-elektriciteit, pijpleidingen en CCS-projecten.

Kenmerk	Beschrijving
Hoofdproces	Olieverwerking en stoomproductie
Flexibiliteitsoptie	E-boilers naast WKKs
Flexvermogen	60–70 MW e-boilers (potentieel in de toekomst)
Flexpercentage	5–10% van elektrisch vermogen
Tijdverloop op-/afschakelen	Minuten tot kwartier (voor stoomsystemen)
TRL / wanneer beschikbaar	E-boiler investeringen uitgesteld

Bijlage B

Methodische verschillen in literatuur van TNO analyse

De bestaande literatuur over IDSR laat een breed scala aan schattingen zien voor het technisch en operationeel inzetbare flexibiliteitspotentieel. Deze variatie komt niet voort uit tegenstrijdige visies op het belang van flexibiliteit, maar uit methodische verschillen in definities, aannames, tijdschalen en datakwaliteit. Deze bijlage geeft een overzicht van de belangrijkste verschillen en maakt duidelijk hoe de TNO-analyse, op basis van MIDDEN-data en bedrijfsinterviews, een realistischer duiding biedt van operationele inzetbaarheid.

Waar verschillen de studies van elkaar?

De verschillen tussen studies zijn vooral het gevolg van vier factoren:

1. Definities van flexibiliteit

De manier waarop “flexibiliteit” wordt gedefinieerd, bepaalt in sterke mate de omvang van het gerapporteerde potentieel.

2. Markt- en prijsassumpties

Studies nemen verschillende aannames over wanneer en waarom bedrijven flexibiliteit zouden inzetten.

3. Technische en operationele aannames

De mate waarin rekening wordt gehouden met proces- en ketenbeperkingen verschilt sterk.

4. Datakwaliteit en detailniveau

Top-down schattingen gebruiken vaak generieke aannames; bottom-up studies gebruiken procesdata en interviews.

Deze variatie maakt dat schattingen moeilijk vergelijkbaar zijn en soms een misleidend beeld van inzetbaarheid geven. De vergelijking van literatuur en praktijkervaringen laat zien dat het geschatte potentieel en de inzetbaarheid van industriële vraagresponso (IDSR) sterk variëren tussen studies. Deze verschillen zijn niet zozeer het gevolg van uiteenlopende visies op het belang van flexibiliteit, daarover bestaat brede consensus, maar worden vooral bepaald door verschillen in methodiek, aannames en de mate waarin rekening wordt gehouden met sector-specifieke kenmerken. Dit maakt de discussie minder een vraag of er potentieel is, maar vooral h^oe en onder welke voorwaarden dit potentieel daadwerkelijk kan worden ingezet.

Verskillende definities van flexibiliteit

Een eerste bron van variatie ligt in de manier waarop flexibiliteit wordt gedefinieerd. DNV GL (2020) rekent met een technisch potentieel op basis van proceskenmerken en tijdschalen. Daarbij wordt verondersteld dat flexibiliteit in principe volledig inzetbaar is wanneer een proces technisch afschakelbaar is. Agora (2013) neemt een andere invalshoek en maakt onderscheid tussen schaalbare, stapsgewijze en binaire flexibiliteit, met nadruk op sectorspecifieke beperkingen zoals minimale afschakelduren en hoge herstartkosten. Dat leidt tot een realistischer, maar beperkter, beeld van inzetbaarheid, vooral bij thermische processen zoals glas en keramiek. TKI E&I (2022) richt zich juist op praktijkcases en pilots, waarbij flexibiliteit vooral wordt bepaald door buffercapaciteit of hybride technologieën. Ook de interviews bevestigen dat bedrijven moeite hebben om hun flexibiliteit in cijfers te vatten, juist omdat definities en meetmethoden niet eenduidig zijn. Dit wijst op de noodzaak om tot

gestandaardiseerde definities en parameters te komen, bijvoorbeeld voor ramp-up tijden en minimale stilstandsduren, zodat analyses beter vergelijkbaar worden.

Markt- en prijsassumpties

Een tweede verschilpunt betreft de vraag onder welke omstandigheden flexibiliteit wordt aangesproken. In de scenario's van Netbeheer Nederland (2023, I13050) komt industriële vraagresponso pas in beeld bij hoge elektriciteitsprijzen, variërend van 300 €/MWh voor datacenters tot wel 2000 €/MWh voor overige industrie. Daarmee ontstaat een beeld van flexibiliteit als "laatste redmiddel", inzetbaar bij extreme prijsspieken. Andere studies, zoals DNV GL (2020) en TenneT (2021), gaan juist uit van een regelmatige inzet in balancerings- en onbalansmarkten, waarbij flexibiliteit ook bij lagere prijzen kan bijdragen aan systeembalans en kostenreductie. Dit verschil in aannames heeft grote impact: waar de één uitgaat van incidentele inzet met hoge marktwaarde, ziet de ander juist potentieel voor structurele deelname. Uit de interviews blijkt bovendien dat veel bedrijven zich in de praktijk nauwelijks laten leiden door prijssignalen op korte termijn, maar vooral door vaste contracten, nettarieven en klantverplichtingen. Er is dus meer onderzoek nodig naar hoe prijssignalen en contractvormen zich werkelijk vertalen naar beslissingen in de industrie.

Technische en operationele grenzen

Ook de aannames over de beschikbaarheid van flexibiliteit verschillen sterk. DNV GL (2020) hanteert relatief optimistische uitgangspunten, bijvoorbeeld dat elektrolyseprocessen urenlang inzetbaar zijn. Agora (2013) en de praktijkinterviews tonen echter dat veel continue processen slechts incidenteel en tegen hoge kosten kunnen worden afgeschakeld. De TKI Whitepaper (2022) wijst in dit verband nadrukkelijk op de noodzaak van nieuwe technologie, zoals e-boilers, hybride compressoren en modulaire elektrolyse, om flexibiliteit daadwerkelijk veilig en betrouwbaar in te zetten. De interviews onderstrepen dit: bedrijven zien flexibiliteit vaak niet als technisch onmogelijk, maar wijzen op veiligheidsrisico's, productieverlies en schade bij verkeerde aansturing. Dit maakt duidelijk dat empirische data op procesniveau cruciaal is om realistische aannames te kunnen doen over beschikbaarheid en kosten.

Beschikbaarheid en nauwkeurigheid van data

Tot slot verschillen studies in de mate van detail en datadichtheid. DNV GL (2020) gebruikt top-down schattingen per sector in megawatt, terwijl Agora (2013) en TKI E&I (2022) meer bottom-up analyses hanteren, gebaseerd op interviews en proceskenmerken. De praktijkinterviews laten zien dat bedrijven zelf vaak geen exacte cijfers hebben over ramp-up tijden of marginale kosten, waardoor modelaannames niet altijd aansluiten bij de werkelijkheid. Dit wijst op de noodzaak om top-down systeemanalyses systematisch te voeden met bottom-up praktijkdata. Daarnaast ontbreekt in veel studies een dynamisch perspectief: de meeste aannames zijn statisch, terwijl elektrificatietechnologie en automatisering zich juist snel ontwikkelen. Toekomstig onderzoek zou meer rekening moeten houden met leer- en innovatiecurves die het flexibiliteitspotentieel vergroten naarmate nieuwe technieken rijpen.

Synthese

Samenvattend laten alle studies zien dat er in de Nederlandse industrie een technisch potentieel van enkele gigawatt aan vraagresponso aanwezig is. De verschillen zitten niet in de omvang van het potentieel, maar in de aannames over hoe vaak, hoe snel en tegen welke prijs dit potentieel daadwerkelijk inzetbaar is. Daarmee ligt de uitdaging niet zozeer in het vinden van meer flexibiliteit, maar in het ontwikkelen van transparante aannames, betere empirische data en een programmatische aanpak waarin literatuur, pilots en praktijkervaringen samenkomen. Alleen dan kan het theoretische potentieel van IDSR worden vertaald naar robuust en betrouwbaar systeemvermogen.

Energy & Materials Transition

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam
www.tno.nl