

## Auteurs

Dr. A. (Ádám) Bognár, dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans, dr.ir. T (Twan) van Hooff, dr.ir. P.J. (Pieter-Jan) Hoes, Eindhoven University of Technology

# Integrale prestatieanalyse van gebouwen met behulp van sensoren

*Hoe kunnen verschillende datastromen binnen een gebouw worden samengevoegd ten behoeve van de integrale analyse van de energieprestatie van het gebouw en het binnenklimaat? In dit artikel wordt dit beschreven aan de hand van analyses die het afgelopen jaar zijn uitgevoerd. We laten onder andere zien hoe de maatregelen naar aanleiding van de corona-pandemie de bezettingsgraad van het Atlasgebouw van de TU Eindhoven beïnvloedden, én hoe de bezettingsgraad de energieprestaties van het gebouw beïnvloedde.*

Volgens de literatuur kan in de meeste gebouwen 14-50% thermische energie en 9-13% elektrische energie worden bespaard door de gebouwregeling te verbeteren [1]. Naast energie wordt ook steeds meer onderzoek gedaan naar het bewaken en optimaliseren van de kwaliteit van het binnenmilieu, vooral in kantoor- of onderwijsgebouwen [2,3]. De kwaliteit van het binnenmilieu beïnvloedt de gezondheid, het beleefde comfort en de productiviteit van de gebouwgebruikers. Met de ervaring van de coronapandemie is het belang van een goede luchtkwaliteit eens te meer zichtbaar geworden. Vanuit kosten oogpunt is het verstandig om te investeren in een goede kwaliteit van het binnenmilieu. Uit de literatuur blijkt een kostenverhouding van 1:5:200, waarbij voor elke euro die wordt uitgegeven aan bouwkosten van een gebouw, er vijf worden uitgegeven aan onderhoud en exploitatie van het gebouw en 200 aan personeels- en bedrijfskosten [4]. Gegeven het effect op de gezondheid en productiviteit van het personeel, kan het rendement op verbeteringen van het binnenmilieu dus hoog zijn; het daadwerkelijke effect van die extra investering zou dan bij voorkeur moeten worden ondersteund door een grondige evaluatie van de gebouwprestaties [5].

Inmiddels zijn er verschillende platforms beschikbaar voor energiebeheer en -regeling van gebouwen, vaak ook al aangevuld met informatie over het binnenmilieu. Sommige zijn hardware-onafhankelijk, zoals het Strukton PULSE-platform, Cloud Energy Optimizer, Spectral Smart Building Platform, Entronics facility analysis platform, en bGrid. Andere zijn geoptimaliseerd voor de hardware ontwikkeld door hetzelfde bedrijf, zoals regeloplossingen van Priva, Schneider Electric, Siemens, Johnson Controls, en SAIA. Voor verdere informatie over deze platforms zie de lijst met websites aan het einde van dit artikel.



Zoals blijkt uit de bovenstaande opsomming van bedrijven, is Nederland sterk vertegenwoordigd in de industrie van energiemonitoring en -regeling van gebouwen, met name op het gebied van leverancier-onafhankelijke oplossingen. Deze inspanningen, in combinatie met wetenschappelijk onderzoek op dit terrein, hebben baat bij een testfaciliteit die een omgeving biedt voor fundamenteel onderzoek met gebruikmaking van gemeten praktijkgegevens over energie en het binnenmilieu van gebouwen.

#### Het Atlas Living Lab

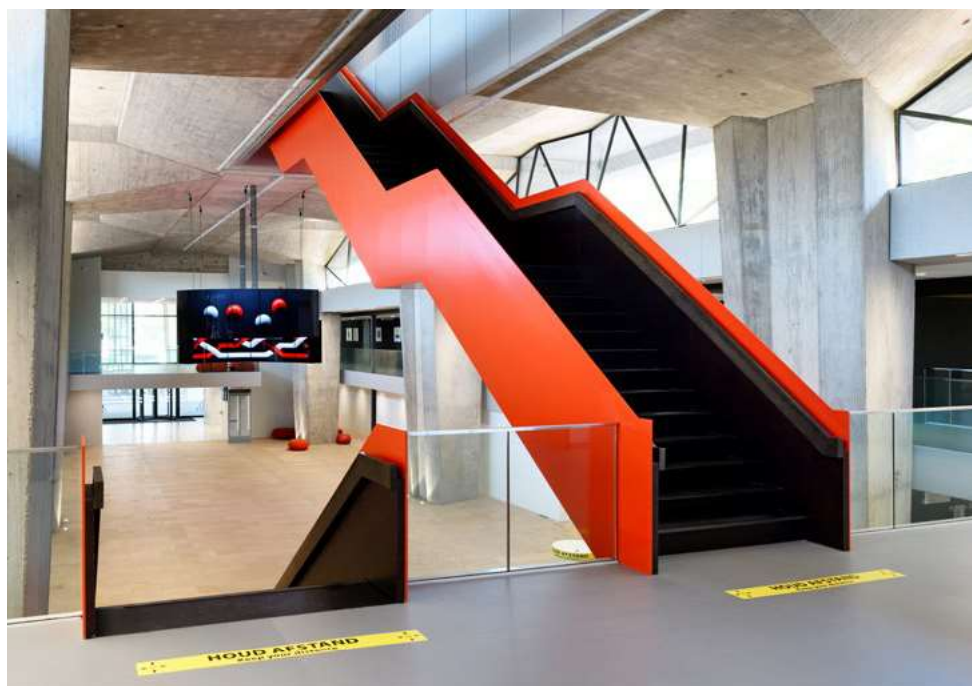
Om nieuw onderzoek naar energie, comfort en regelsystemen voor gebouwen te ondersteunen is de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) het Atlas Living Lab project gestart. In dit project fungeert het onlangs gerenoveerde Atlasgebouw (Foto 1) als bron van gemeten gegevens over

gebouwpresetaties en gebruikerscomfort, en levert daarmee input voor nieuw onderzoek. Daarnaast biedt het een platform om aanvullend onderzoek te doen, waaronder ook perceptieonderzoek, naar verschillende aspecten gerelateerd aan het gebouw. Het Atlasgebouw (voorheen Hoofdgebouw genaamd) dateert uit de jaren zestig van de vorige eeuw. Sindsdien dient het als hoofdgebouw van de TU/e-campus. Een uitgebreid renovatieproces startte in 2016, toen het gebouw volledig werd gestript en werd voorzien van een nieuwe gevel met op afstand te openen (horizontale) ramen die een groot deel van de gevel van een ruimte beslaan, een geautomatiseerd zonweringsysteem en nieuwe interieur- en gebouwssystemen.

Als onderdeel van het renovatieproces werd het gebouw tevens uitgerust met een groot aantal sensoren die kunnen worden ingedeeld in drie datastromen die iets kunnen zeggen over de prestaties van het gebouw:

- **Binnenklimaat:** 474 luchttemperatuur-, 460 aanwezigheids- en 126 CO<sub>2</sub>-concentratie sensoren geven informatie over de binnencondities in uurresolutie. Deze data worden opgeslagen en kunnen worden geëxporteerd vanuit het Building Management System (BMS). Deze parameters worden gebruikt om te beoordelen hoe effectief het gebouw is in het bereiken van zijn hoofddoel, namelijk het bieden van een gezond en comfortabel binnenklimaat tijdens de bezette uren.
- **Energie:** energiegebruik voor verwarming en koeling en elektrische metergegevens worden voor elke verdieping afzonderlijk gemeten met een interval van 5 minuten. Deze data worden opgeslagen in en kunnen worden geëxporteerd uit de database van een campusbreed slimme meter netwerk. Deze parameters worden gebruikt om de kosten (in energie en vervolgens in geld en emissies) van het bereiken van het gewenste binnenklimaat te beoordelen.

Foto 1 en 2: Atlas gebouw van de TU/e. Bron: Angeline Swinkels Fotograaf, TU/e image bank.



- **Weer:** Omgevingstemperatuur, relatieve vochtigheid, windsnelheid en zonnestralsingscomponenten worden op de campus gemeten met een interval van een minuut. Deze data zijn beschikbaar door deze te exporteren uit de database van een weerstation op de campus. De parameters helpen om de randvoorwaarden van het gebouw te beschrijven die van invloed zijn op hoe moeilijk (d.w.z. kostbaar in termen van energie) het is om het gewenste binnenklimaat te bereiken.

De sensorgegevens van deze drie datastromen worden opgeslagen in drie verschillende databases. Om de integrale energie- en binnenklimaatprestaties van het gebouw te kunnen beoordelen, moeten de drie datastromen worden samengevoegd om zo betere, waardevollere informatie over het gebouw te verkrijgen.

#### Van data naar informatie

Om de gegevens verkregen uit de drie verschillende datastromen samen te voegen en op te schonen, is een geautomatiseerd proces ontwikkeld in de programmeertaal Python met de volgende hoofdstappen:

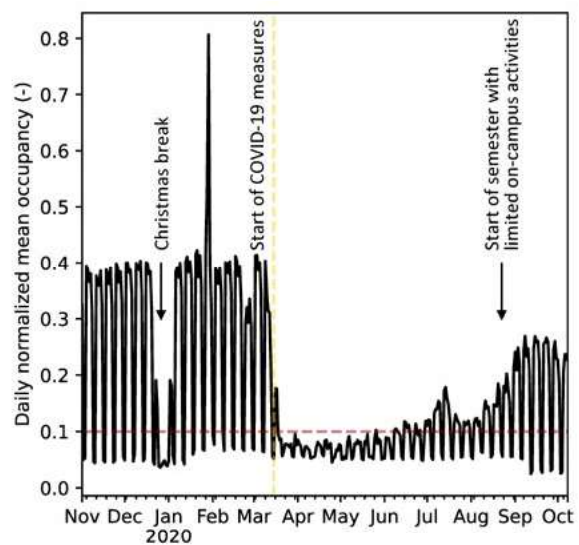
- **Zoek de temporele overlap van de tijdreeksen:** De officiële opening van het Atlasgebouw was op 21 maart 2019, het inbedrijfstellingsproces van bepaalde datalogsysteem duurde echter langer. Daarom zijn alle datastromen gelijktijdig beschikbaar vanaf 1 november 2019.
- **Identificeer ontbrekende waarden:** In het geval van een klein hiaat (bv. voor gemeten warmte < 1 uur) in een van de gegevensbronnen kan het ontbrekende deel worden vervangen door lineaire interpolatie. In het geval van een groter hiaat (bv. > 1 uur) worden de gegevens voor hetzelfde deel ook uit de andere gegevensbronnen verwijderd.
- **Foutieve waarden identificeren:** Foutieve waarden kunnen negatieve of onmogelijk grote gemeten waarden zijn, die kunnen optreden als gevolg van clipping of bijvoorbeeld het resetten van warmtemeters. Wanneer de foutieve waarden worden gedetecteerd, worden ze verwijderd en wordt het proces voor ontbrekende waarden gevolgd.
- **Verrijk de dataset met afgeleide parameters:** Sommige nuttige parameters kunnen worden berekend uit de gemeten parameters. Eén zo'n afgeleide parameter is de totale invallende zonnestraling op de gevel van het Atlasgebouw, die wordt berekend uit de geveleppervlakken en de afzonderlijk gemeten zonnestralsingscomponenten (globale horizontale, directe normale en diffuse horizontale instraling).
- **Resamplen van alle tijdreeksen tot een gemeenschappelijke tijdsresolutie:** De uurlijkse, 5-minuten en 1-minuut datasets worden geresampled naar een uurlijkse of dagelijkse frequentie.

De opgeschoonde en voorbereikte tijdreeksen worden

opgeslagen in een nieuwe database die wordt gebruikt voor het analyseren van de energieprestatie en het binnenklimaat van het gebouw. In de toekomst zal deze database ook beschikbaar zijn voor studenten en andere onderzoekers aan de TU/e om onderzoek aan het gebouw te kunnen doen. In de volgende paragrafen worden enkele voorbeelden getoond van visualisaties van de opgeschoonde en samengevoegde sensorgegevens (met toenemende complexiteit). De data die hiervoor is gebruikt bestrijkt de periode november 2019-oktober 2020. In die periode was nog geen commissioning uitgevoerd op de data die beschikbaar is voor het energiegebruik. De getoonde gegevens hebben derhalve in eerste instantie met name een illustratieve intentie. De data zijn in januari 2021 gecommissioned. Uit een eerste vergelijking blijkt dat de orde van grootte van de resultaten vóór en na commissioning hetzelfde is.

#### Het effect van de COVID-19 pandemie op de bezetting van het Atlasgebouw

Figuur 1 toont de Daily Normalized Mean Occupancy (DNMO) van het atlasgebouw. De DNMO wordt bepaald op basis van de data van de 460 aanwezigheidsensoren in het gebouw: op elke tijdstap wordt de verhouding van de bezette zones berekend, vervolgens worden deze verhoudingen gemiddeld over de dag. Bv. als 50% van de dag 50% van de sensoren een bezetting aangeeft, is de DNMO 0,25. In Figuur 1 zijn de kerstvakantie van 2019, de start van de COVID-19 lockdown en het begin van het semester in 2020 duidelijk te zien.



Figuur 1: Dagelijkse genormaliseerde gemiddelde bezetting (DNMO) van het Atlas-gebouw. De rode lijn geeft de drempel voor "bezet" aan.

### Bezettingsgraad en energiegebruik

Figuur 2a toont de uurlijkse genormaliseerde bezetting (verhouding tussen bezette zones en alle zones) als functie van het uur van de dag, met het gemiddelde verwarmingsvermogen per uur aangegeven met kleuren. De opwarmperiodes in de vroege ochtend met een hogere verwarmingsvraag kunnen worden waargenomen tussen 06:00 en 08:00 uur. In deze periode wordt de verwarmingsvraag minder beïnvloed door de bezetting, aangezien het hele gebouw in deze periode op stand-by temperatuur is.

Na 08:00 uur begint de bezettingsgraad echter de verwarmingsvraag te beïnvloeden en een hogere bezettingsgraad leidt tot een hogere verwarmingsvraag. Bovendien kan worden waargenomen dat de vraag naar verwarming in de ochtend doorgaans hoger is dan in de middag. Dit kan worden verklaard door de toenemende buitentemperaturen en de invallende zonnewinsten in de loop van de dag.

Figuur 2b toont een vergelijkbare grafiek met de koelvraag aangegeven met kleuren. Hier kan worden waargenomen dat er het hele jaar door een homogene koelvraag is, ongeacht de bezetting. Dit is het gevolg van de koelvraag van de serverruimtes in het gebouw, met servers die altijd aan staan. Daarnaast is te zien dat de koelvraag het hoogst is in de namiddag, maar de bezetting is dan laag. De in het algemeen lage bezetting van het gebouw tijdens de zomerperiode, de periode met een extra koelvraag naast die voor de serverruimtes, was het gevolg van de COVID-19-maatregelen.

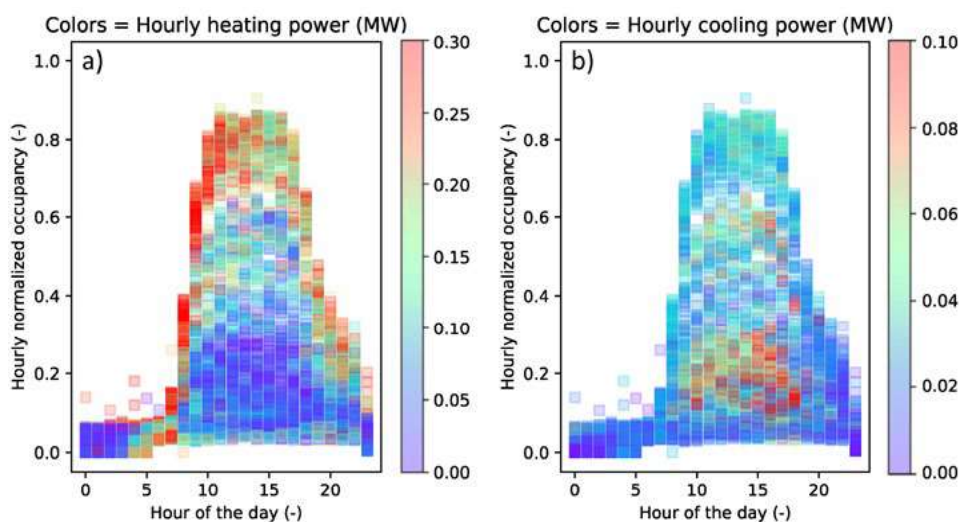
### Energy signature

In de vorige figuren is de bezetting van het gebouw onderzocht als functie van tijd en uur van de dag, samen met het energiegebruik van het gebouw. In de volgende twee figuren is ook het effect van de randvoorwaarden (omgevingstemperatuur en gesommeerde invallende zonnestraling) in de analyse opgenomen, met behulp van zogenaamde energy signatures.

Terwijl het energieverbruik voor elektrische apparatuur en verlichting onmiddellijk wordt beïnvloed door de bezetting, wordt aangenomen dat de vraag naar verwarming/koeling (niet voor warm tapwater) wordt beïnvloed door gebeurtenissen op een langere tijdschaal als gevolg van de thermische responsietijd van het gebouw. De verwarmings- en koelvraag van een bepaalde dag kan daarbij worden beïnvloed door de bezetting op die dag, de totale zonnestraling op de gevels en de temperatuur van de omgevingslucht op die dag en de vorige dag. Daarom worden de zonnestraling en de omgevingstemperatuur bepaald met een lopend venster van twee dagen. Figuur 3 toont de dagelijkse energievraag voor ruimteverwarming van het Atlasgebouw als functie van de omgevingstemperatuur en met de gesommeerde zonninstraling aangegeven met kleuren. Bovendien is de dataset opgesplitst in twee sets op basis van een arbitraire bezettingsdrempel van 0,1 DNMO (aangegeven in Figuur 1).

Figuur 3 laat zien dat naast de omgevingstemperatuur ook de zonninstraling van invloed is op de verwarmingsvraag. Op bewolkte dagen die kouder zijn dan 16 °C kan een 30-50% toename in verwarmingsvraag worden waargenomen vergeleken met zonnige dagen met dezelfde omgevingstemperatuur. Bovendien hebben dagen met zeer lage bezetting over het algemeen een lagere verwarmingsvraag.

In Figuur 4 kan worden waargenomen dat bij een omgevingsluchttemperatuur hoger dan ongeveer 12 °C de koelvraag begint toe te nemen, vooral op zonnige dagen. Maar het onderscheid tussen dagen met een hogere en een zeer lage bezetting is minder duidelijk. Zoals eerder



**Figuur 2:** Uurgenormaliseerde bezetting als functie van het uur van de dag, met het gemiddelde uurlijkse (a) verwarmings- (b) en koelvermogen aangegeven met kleuren.

aangegeven, is dit waarschijnlijk te wijten aan de ongewoon lage bezetting in de zomerperiode, als gevolg van COVID-19 maatregelen.

### Conclusies

Dit artikel beschrijft kort hoe verschillende datastromen binnen een gebouw kunnen worden samengevoegd ten behoeve van de integrale analyse van de energieprestatie van het gebouw en het binnenklimaat. De analyses laten zien hoe de maatregelen naar aanleiding van de COVID-19 pandemie de bezettingsgraad van het Atlasgebouw beïnvloedden en hoe de lage bezettingsgraad de energieprestaties van het gebouw beïnvloedde.

Dit is echter slechts een kleine selectie van de analysemogelijkheden die de beschikbare data toelaat. Binnen het hier beschreven project wordt bijvoorbeeld ook nog meer in detail gekeken naar de energiestromen, ook in relatie tot het gebruik van de warmte-koude-opslag die op de campus aanwezig is. In eerste instantie zal dat via een simulatiemodel gaan, gezien de beperkte hoeveelheid aan data op dit moment en het niet realistische gebruik van het gebouw in de afgelopen periode vanwege COVID-19.

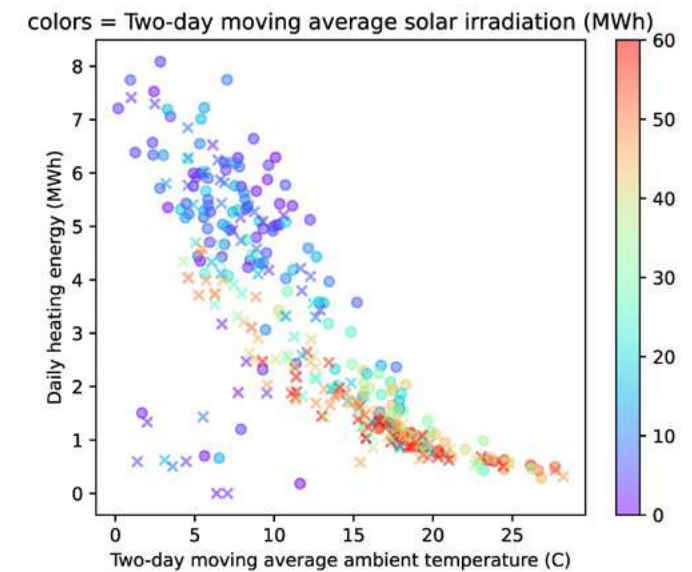
Echter, op termijn kunnen de uit het Atlas-gebouw beschikbaar komende data gebruikt worden om die uitkomsten te toetsen. Daarnaast kan ook het gebruik van de speciale ramen in Atlas worden meegenomen om het gebruik daarvan, met name ook buiten de gebruikstijd, te optimaliseren voor bijvoorbeeld vrije koeling. Zoals aangegeven is dit slechts een beperkt overzicht van de mogelijkheden die de 'schat' aan data die beschikbaar komt toelaat. Het is mooi dat het Atlas-gebouw de mogelijkheid biedt om deze verder te onderzoeken.

### Dankwoord

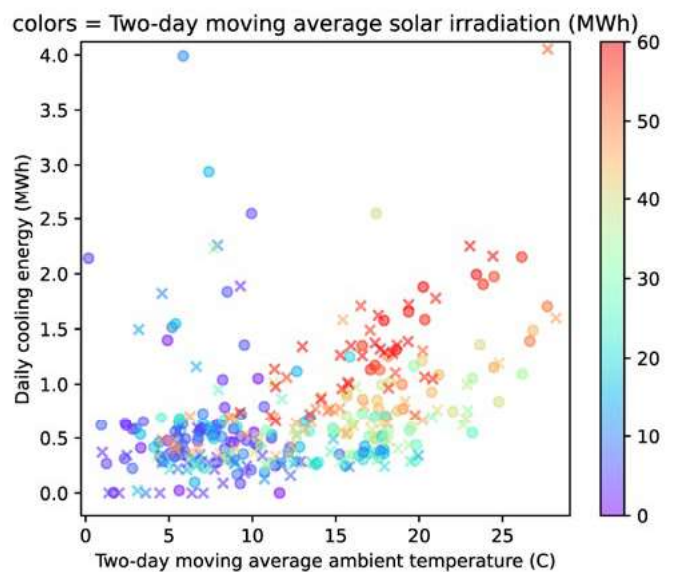
Wij zijn zeer erkentelijk richting Real Estate TU/e voor de financiering van dr.ir. Ádám Bognár om dit werk te kunnen uitvoeren. De hulp van alle betrokkenen bij het Atlasproject om alle noodzakelijk informatie te verkrijgen wordt zeer gewaardeerd.

### Referenties

- Schneider, G.F., Kontes, G.D., Qiu, H., Silva, F.J., Bucur, M., Malanik, J., Schindler, Z., Andriopolous, P., de Agustin-Camacho, P., Romero-Amorrortu, A., Grün, G., 2020. Design of knowledge-based systems for automated deployment of building management services. *Autom. Constr.* 119, 103402. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103402>
- Van Kemenade, P., Loomans, M.G.L.C., Opschoor, S., Hensen H.L.M., Building comfort performance assessment using a monitoring tool, in: Y. Li (Ed.), *Proc. 13th Int. Conf. Indoor Air Qual. Clim. (Indoor Air 2014)*, Hongkong, 2014, pp. 1–7
- Boerstra, A.C., New health & comfort promoting CEN standard, *REHVA J.* 4 (2019) 2. <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/new-health-comfort-promoting-cen-standard>
- Evans, R., Haryott, R., Haste, N., Jones, A., The long-term costs of owning and using buildings. (The Royal Academy of Engineering, London, United Kingdom, 1998).
- Thoen, H. M. J., Roelofs, P., Mishra, A. K., Loomans, M. G. L. C., Hoes, P., & Hensen, J. L. M. (2019). Monitoren van werknemersproductiviteit in kantoren. *TVVL Magazine*, (01), 30-34.



Figuur 3: Verwarmingsenergie signature van het Atlasgebouw voor perioden van bezetting (o) en lage bezetting (x).



Figuur 4: Koelenergie signature van het Atlas-gebouw voor perioden van bezetting (o) en lage bezetting (x).

### Websites

- <https://www.struktonpulse.nl/energy>
- <https://www.cloudenergyoptimizer.com/en/Technique>
- <https://spectral.energy/solutions/sbp/>
- <https://entronix.io/>
- <https://bgridsolutions.com/#how>
- <https://www.priva.com/solutions/building-automation/priva-bi-metrics>
- <https://www.se.com/ww/en/product-range-presentation/62111-ecostruxure%E2%84%A2-building-operation/?parent-subcategory-id=1210#tabs-top>
- <https://new.siemens.com/global/en/products/buildings/automation/desigo.html>
- [https://www.johnsoncontrols.com/en\\_gb/building-automation-and-controls/building-automation-systems/metasys](https://www.johnsoncontrols.com/en_gb/building-automation-and-controls/building-automation-systems/metasys)
- <https://www.saia-pcd.com/en-gb/solutions/energy/monitoring/>