



PROGNOSTIEK & GEZONDHEIDS- BEHEER IN HET TIJDPERK VAN AI

Introductie

Wat hebben vliegtuigen, raketten, windturbines, koffiemachines, kerncentrales, treinen, harde schijven, drones, fietsen, bruggen, schepen - en eigenlijk elk door de mens gemaakt systeem - gemeen? Ze kunnen, en zullen uiteindelijk, falen. Als mijn koffiezetapparaat kapot gaat, haal ik mijn schouders op en zet ik thee; maar als ik 10 km boven de Atlantische Oceaan ben, heb ik veel liever dat het vliegtuig probleemloos vliegt. De echte vraag is dus: **Hoe kunnen we onze systemen effectief beheren door te anticiperen op storingen zonder kostbare middelen te verspillen?**

Deze vraag heeft generaties ingenieurs en wetenschappers over de hele wereld ertoe aangezet om **Prognostiek en gezondheidsbeheer** (Prognostics & Health Management - **PHM**) te ontwikkelen: een holistisch paradigma dat ons helpt om de hartslag van onze

systemen te bewaken, hun prestaties te voorspellen en acties te plannen, zodat vrijwel *elk* systeem kan worden beheerd.

Nu richten we onze aandacht op het modewoord van het decennium: **Kunstmatige intelligentie (AI)**. AI is zeker geen hype, maar is bezig een aantal lacunes in PHM op te vullen. In dit artikel onderzoek ik twee ideeën: **agenten** die autonoom handelen, en **Large-Language Models (LLM's)** — die kunnen lezen, redeneren en uitleggen — waarbij ik hun potentieel belicht om een revolutie teweeg te brengen in - PHM door onze systemen een *stem* te geven, en *ons* te helpen *hen* te helpen.

Waarom PHM belangrijk is?

Onderhoudstechnici zijn bekend met reactief, gepland, toestandsafhankelijk, preventief en ander onderhoudsbeleid en proberen het juiste beleid te kiezen op basis van het probleem.

Tegenwoordig zetten veel industrieën echter in op twee “populaire” onderhoudsbenaderingen: voorspellend onderhoud, waarbij geavanceerde modellen waarschijnlijke scenario's voorspellen zodat we ons van tevoren kunnen voorbereiden; en prescriptief onderhoud, waarbij actieplannen op maat worden gegenereerd voor nauwkeurig en effectief ingrijpen.

Hier gebruik ik PHM als een verenigend raamwerk voor het leveren van *gezondheidsgebaseerde beslissingsondersteuning* voor onderhoud: de PHM fungeert als een technische laag van assetmanagement en plaatst elk systeem binnen zijn ecologische, economische en politieke context.

Dankzij de decennialange vooruitgang van hardware — krachtigere computers, meer opslagruimte en snellere netwerken — kunnen we enorme hoeveelheden gegevens verplaatsen,

verwerken en opslaan en ongekende inzichten ontsluiten. Alleen al in de afgelopen tien jaar zijn de openbaar beschikbare PHM-datasets meer dan verdubbeld, een echte gamechanger die de ontwikkeling van geavanceerde voorspellende algoritmen stimuleert en de deur wijd openzet voor AI.

De AI-revolutie: Het potentieel van agenten & LLM's voor PHM-systemen van de volgende generatie

AI roept debatten op — filosofisch, ethisch, technisch en politiek — die voortdurend controverses oproepen. Ik herinner me dat ik in bed lag, *Life 3.0* van Max Tegmark las en die dystopische en utopische scenario's voor me zag en dacht: 'Zal ik ooit leven om zoiets mee te maken?' Ik zei tegen mezelf: 'Dit zal niet snel gebeuren, misschien over een paar decennia.' Wat had ik het mis!

Met baanbrekende technologieën zoals **GPT**, **DeepSeek**, **Gemini** en andere "cool kids on the block", hebben

we de manier waarop we werken veranderd, wat nieuwe mogelijkheden biedt op veel gebieden, waaronder PHM. Ik denk dat een van de grootste uitdagingen van PHM het gebrek aan *integratiemechanismen* is: complexe systemen bestaan uit talloze subsystemen, werken onder uiteenlopende omstandigheden en zijn afhankelijk van expertise uit meerdere disciplines. Zonder cohesie kunnen PHM-opstellingen snel uit elkaar vallen — dus hoe kan AI helpen? *Laten we eens duiken in Agents en LLM's.*

Agent1: 'trillingspiek op engine fan blade.' → Agent2: 'hangarruimte reserveren voor bladinspectie.'

Artikelen zoals AI-2027 (<https://ai-2027.com/>) benadrukken de groeiende impact van softwareagenten in de moderne samenleving. Deze autonome entiteiten — producten van **Agent-Based Modelling (ABM)** — kunnen *waarnemen, handelen en leren*. Door detectie, besluitvorming en aanpassing in te bedden in elke agent, ondersteunt ABM opkomend gedrag op systeemniveau dat ontstaat uit lokale interacties op lagere niveaus.

Conventionele heuristieken, veelal gewaardeerd om hun interpreteerbaarheid, hebben het moeilijk in dynamische, hoogdimensionale ruimtes en raken snel achterhaald. Door agenten in zorgvuldig gecreëerde digitale werelden te "dropen", laten we ze door uitgestrekte wiskundige landschappen navigeren en hun beleid door ervaring aanpassen, waarbij ze strategieën tijdens het proces verfijnen. Het modulaire ontwerp van ABM ondersteunt ook *contextbewuste agenten* die optimale strategieën leren voor verschillende scenario's en *multi-agent systemen* die samenwerken aan gedeelde doelen.

Toepassingen van ABM in PHM nemen een hoge vlucht. Agenten kunnen bijvoorbeeld de hyperparameters van andere modellen (gedefinieerd vóór modelkalibratie) beheren als een *regelmechanisme*, waardoor diagnostische en prognostische algoritmen zich voortdurend kunnen aanpassen en topprestaties kunnen behouden. Ook kunnen ze de aftakelingsprofielen van componenten bestuderen om *onderhoudsbeleid te leren* dat de kosten minimaliseert en de betrouwbaarheid maximaliseert. Deze adaptieve benaderingen veranderen onderhoud in een zelfoptimaliserend, feedbackgestuurd proces.

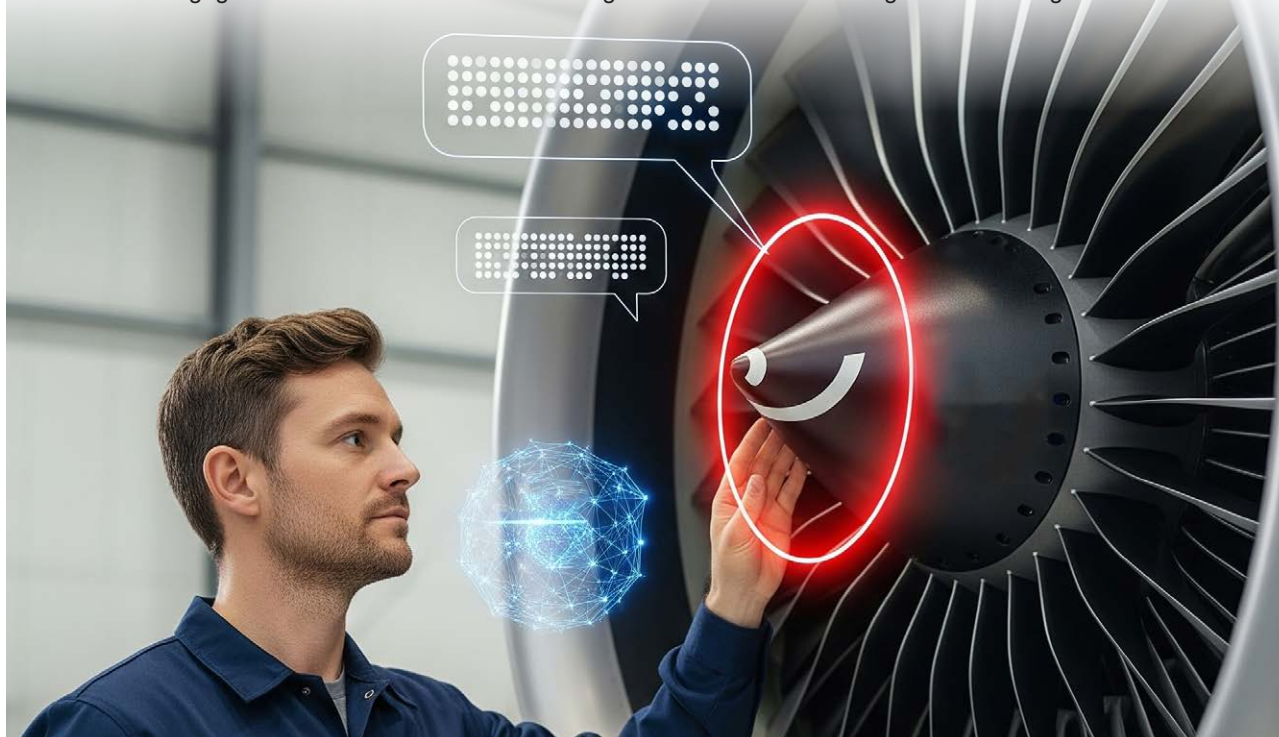


‘Mijn diagnose is dat je een ernstige angstaanval hebt gehad.’ — J.A.R.V.I.S

Een van mijn favoriete Marvel-personages is J.A.R.V.I.S., de AI van Tony Stark. Niet alleen vanwege de scherpe humor, maar ook omdat het de PHM-systemen belichaamt die ik voor ogen heb. In deze scène – Systeem: “Tony Stark” → Taak: “Diagnostiek” → Resultaat: “Ernstige angstaanval vastgesteld” – communiceert de AI een complex medisch inzicht in gewone taal. Die “stem” slaat een brug tussen systeem, hardware, software en eindgebruikers; je hoeft geen ingenieur, wetenschapper of arts te zijn om het te begrijpen. De belangrijkste uitdaging is dat deze volgende generatie PHM-systemen geavanceerde, multidisciplinaire technieken moet verweven onder een naadloze *communicatielaag*.

Geavanceerde LLM's bestaan al, GPT is een van de meest tastbare voorbeelden, en het is slechts een kwestie van tijd voordat ook PHM-systemen hiervan gebruik zullen maken. Als gespecialiseerde communicatiekanalen kunnen LLM's technische analyses vertalen naar duidelijke, bruikbare aanbevelingen tussen onderhoudsingenieurs en technici. In combinatie met agenten maken ze *co-ontwerpmechanismen* mogelijk - echte samenwerkingen tussen mens en agent - die beslissingsondersteunende tools mogelijk maken. Deze tools kunnen onderhoudsstrategieën voorstellen die zijn toegesneden op elke situatie, zorgen dat wordt voldaan aan regelgeving en rekening houden met beperkte middelen, en begeleiding bieden in een taal die iedereen begrijpt, in elk domein.

Door gebruik te maken van de feedbackgestuurde leerprocessen van agenten, kunnen we onderhoudsstrategieën verfijnen en tegelijkertijd de gegevensverzameling revolutioneren. Een belangrijk knelpunt in PHM is de schaarste aan rijke datasets uit de praktijk, wat modeltraining en validatie bemoeilijkt. Door agenten te integreren met LLM's kunnen gecentraliseerde platforms statistieken verzamelen over de effectiviteit van het onderhoud, gezondheidsindicatoren van componenten en operationele contexten - waardoor rommelige gegevensprocessen worden gestroomlijnd, zinvolle datasets worden gegenereerd en de continue verbetering en innovatie van PHM-algoritmen wordt gevoed.



Het is niet allemaal rozengeur en maneschijn: wat kan er misgaan?

Ondanks de veelbelovendheid van AI moeten we een evenwicht zien te vinden tussen snelle innovatie

en robuuste veiligheid. In PHM zijn betrouwbaarheid en verklaarbaarheid cruciaal: als AI kritieke beslissingen moet sturen, hebben we manieren nodig om redeneringen te verifiëren en te auditen, en om de overvloed aan informatie te beheren wanneer modellen sneller evolueren dan kan worden gecontroleerd.

Agenten brengen hun eigen obstakels met zich mee: mensen wantrouwen “black-box” actoren, en het afstemmen van hyperparameters of het garanderen van ABM-convergentie in complexe opstellingen blijft een uitdaging. Om agenten betrouwbaar in te zetten in PHM, hebben we nieuwe algoritmen nodig die deze dynamiek aankunnen

Ondanks de veelbelovendheid van AI moeten we een evenwicht zien te vinden tussen snelle innovatie en robuuste veiligheid. In PHM zijn betrouwbaarheid en verklaarbaarheid cruciaal: als AI kritieke beslissingen moet sturen, hebben we manieren nodig om redeneringen te verifiëren en te auditen...

en tegelijkertijd transparant en voorspelbaar blijven onder verschillende operationele omstandigheden.

Traditionele LLM's en agentarchitecturen zijn niet gemaakt voor PHM, dus moeten we ze aanpassen door ze uit te rusten met domeinkennis, fysica-gebaseerde beperkingen in te bouwen en agenten aan te passen aan sensor-gestuurde feedback. Dit vraagt om aanhoudend, gericht onderzoek naar AI-gedreven PHM-technologieën.

We worden ook geconfronteerd met ethische, wettelijke en regelgevende vragen: wie is verantwoordelijk wanneer een AI-gebaseerde onderhoudsbeslissing mislukt? Naarmate PHM-systemen autonomer worden, zal het van vitaal belang zijn om kaders voor verantwoording en naleving op te stellen. Privacy en beveiliging van gegevens zijn ook belangrijk, omdat PHM-platforms gevoelige operationele gegevens zullen verzamelen.

Ondanks deze obstakels ben ik ervan overtuigd dat de reis de moeite waard is.

Of we nu uiteindelijk slagen of wegversperringen tegenkomen, het verkennen van deze technologieën belooft doorbraken in systeembeheer en duurzaamheid - en persoonlijk verwacht ik veel plezier onderweg! ■

Auteur:



dr. ir. Lisandro Jimenez
Data Scientist,
lisandro.jimenez@nlr.nl
Royal NLR - Netherlands
Aerospace Centre

