

Uafhængighed af GPS til tids-synkronisering i elnettet

Baggrund: GPS og tids-synkronisering i elnettet

I dag benyttes GPS (Global Positioning System) i stor stil til præcis tids-synkronisering af måle- og kontroludstyr i elnettet. **Phasor Measurement Units** (PMU'er) er et godt eksempel – de måler spændings- og strømfase rundt om i netværket og tidsstempler disse målinger inden for få mikrosekunder ved hjælp af en fælles tidskilde (typisk GPS) ¹ ². Denne høje tidsnøjagtighed muliggør **synkrofasendata**, som giver real-time overblik over net-tilstanden på tværs af geografi. Ud over PMU'er bruges GPS-tidssignaler også i mange andre kritiske elnet-funktioner: fejlregistrering, frekvensmåling, beskyttelsesrelæer, SCADA-systemer, tidsstempling af hændelser og mere ³ ⁴. Kort sagt er en præcis fælles tidsreference blevet en hjørnesten i det moderne digitaliserede elnet.

Problemet: Sårbarhed ved afhængighed af GPS

Den udbredte afhængighed af GPS betyder, at elnettet arver GPS-systemets sårbarheder. GPS-satellitssignaler er ekstremt svage, når de når jordoverfladen, og kan let forstyrres eller blokeres ³. Dette kan ske utilsigtet (f.eks. solstørme eller elektronisk støj) eller intentionelt via **jamming** (støjtransmission, der overdøver signalet) og **spoofing** (udsendelse af falske signaler). Begge dele er realistiske trusler: Billigt udstyr kan imitere GPS-signaler og få modtagere til at rapportere forkert tid, hvilket kan vildlede udstyret ⁵. Konsekvensen af en GPS-tidsfejl kan være alvorlig – f.eks. registrerede en GPS-fejl i 2016 et 13-mikrosekunders tidsoffset, hvilket forstyrrede systemer, der kræver høj præcision ². Uden korrekte tidsinput kan synkroniseringen mellem måleenheder bryde ned, og kontrollen af elnettet blive "blind" (som en ekspert siger: *"nettet vil ikke nødvendigvis falde sammen uden nøjagtige tidssignaler, men det bliver umuligt at styre"* ⁶).

Derudover er der geopolitiske og sikkerhedsmæssige dimensioner. GPS kontrolleres af USA; selv om signalerne er offentligt tilgængelige, kan der være strategiske risici forbundet med at basere kritisk infrastruktur på udenlandske systemer. Andre GNSS (globale navigationssatellitssystemer) som det europæiske Galileo eller kinesiske BeiDou kan supplere eller erstatte GPS, men de deler mange af de samme sårbarheder over for jamming og spoofing, da de også er rum-baserede signaler ⁷ ⁸. I lyset af disse risici kigger TSO'er som Energinet mod alternative timingløsninger for at opnå større robusthed og uafhængighed af GPS.

Alternative løsninger for robust tids-synkronisering

Der findes flere tilgange til at opnå præcis tid uden at være afhængig af GPS alene. Disse inkluderer andre satellitsservices, jordbaserede radiosendere, fiberoptisk tidsdistribution og lokale referenceure. Nedenfor gennemgås de vigtigste alternativer med fokus på robusthed, omkostninger og praktisk implementering.

Andre satellitbaserede systemer (GNSS-alternativer)

En umiddelbar måde at reducere GPS-afhængigheden er at udnytte de **andre GNSS-systemer** i verden. Galileo (EU), GLONASS (Rusland) og BeiDou (Kina) tilbyder alle præcise tids- og positionssignaler svarende til GPS. Moderne GNSS-modtagere kan typisk bruge flere konstellationer på én gang, hvilket **øger redundansen**: Hvis ét system fejler eller forstyrres, kan de andre stadig levere tidssignaler. Dette forbedrer tilgængeligheden og pålideligheden under normale forhold. For Danmarks vedkommende kunne Energinet eksempelvis sikre, at alt PMU-udstyr bruger multi-GNSS-modtagere i stedet for kun GPS. **Galileo** er særlig relevant, da det er et civilt europæisk system: Det giver en vis strategisk uafhængighed fra GPS og har desuden en krypteret Public Regulated Service (PRS) beregnet til kritisk infrastruktur med højere beskyttelse mod spoofing.

Robusthed: Multi-GNSS tilgang reducerer sårbarhed over for fejl i en enkelt satellitkonstellation og nogle typer spoofing, men **alle GNSS-signaler deler de generelle rum-baserede sårbarheder** (svag signalstyrke og lignende frekvensbånd). En angriber med en stærk jammer kan forstyrre GPS, Galileo m.fl. samlet, da frekvenserne ligger relativt tæt. GNSS er også sårbare overfor antisatellit-våben eller alvorlige solstorme ⁷ ⁸ .

Omkostninger: At udnytte flere GNSS kræver primært opgradering af modtagere – en beskedent merudgift pr. enhed. Selve signalerne er gratis at modtage. Galileo-PRS kræver særligt godkendt udstyr og kan have licensomkostninger. Samlet set er **økonomien fordelagtig**, da infrastrukturen (satellitterne) allerede eksisterer, finansieret af de respektive systemejere.

Praktik: Implementeringen er relativt **lige til** – mange leverandører tilbyder GNSS-modtagere med multi-konstellationsunderstøttelse. For Energinet kunne dette være et quick-win: sikre at nye tidssynkronisatorer og PMU'er bruger både GPS og Galileo for at øge robustheden. Det skal dog påpeges, at denne løsning primært adresserer afhængighed af *én* GNSS (GPS), men ikke gør systemet uafhængigt af satellitter generelt – derfor bør det kombineres med nogle af de følgende ikke-satellit løsninger for ægte robusthed.

Jordbaserede radiosignaler (langbølge og eLoran)

En anden klasse af løsninger er brug af kraftige jordbaserede radiosendere til distribution af præcise tidssignaler. Historisk har man brugt LF/MF-langbølgesignaler til at udsende tid (f.eks. DCF77 senderen i Tyskland eller WWVB i USA), om end med begrænset præcision. En moderne variant er **eLoran** (enhanced LORAN), et terrestrisk radionavigationssystem, der kan levere både position og tid. **eLoran** opererer omkring 100 kHz med meget høj sendestyrke fra store mastestationer, hvilket giver signaler, der kan række hundreder af kilometer ind over land og til havs. Med ny teknologi og differential-korrektioner kan eLoran nå tidsnøjagtigheder på ~100 ns i forhold til UTC ⁹ ¹⁰ , altså fuldt på højde med GPS' mikrosekundsøjagtighed.

Robusthed: ELoRAN's store fordel er signalstyrken og frekvensbåndet: Det lave frekvensbånd tillader signalet at følge jordens overflade (groundwave) og trænge gennem bygningsmaterialer bedre end GNSS. Samtidig kræver det **meget kraftige og specialiserede forstyrrelsessendere at jamme eLoran**, hvilket gør systemet langt mere **jamming-resistent** end GPS ¹¹ ¹² . ELoRAN-sendere på land er også lettere at reparere eller beskytte end satellitter i rummet. Som backup til GPS vurderes eLoran generelt som en **særdeles robust** tidskilde. Den er dog ikke uden fejlmuligheder – f.eks. kan store antennemaster også saboteres fysisk, og signalet kan påvirkes af atmosfæriske forhold, men med differensstationer kan mange fejl elimineres.

Omkostninger: Udfordringen ved eLoran er, at infrastrukturen først skal etableres. I Danmark (og generelt Europa) findes der pt. ingen aktiv eLoran-dækning, efter at Loran-C stationerne blev udfaset. Implementering vil kræve opsætning af nye sendestationer (eller opgradering af gamle Loran-C stationer) plus drift heraf. Et fuldt nationalt system vil kræve flere sendere for at dække hele Danmark med overlap (for redundans). **Omkostningsestimat:** USA har tidligere anslået, at en landsdækkende eLoran kunne sættes i drift for i størrelsesorden \$100–400 millioner (USD) i etablering ¹³ og \$10–50 millioner årligt i drift ¹⁴. Danmark dækker et mindre areal, men vil sandsynligvis indgå i et regionalt samarbejde (f.eks. med EU eller nabolande) om at dele sendere. ELoRAN-modtagere til brugerne er relativt simple og billige (en rapport nævnte ca. \$300 ekstra per enhed i masseproduktion) ¹⁵. Samlet set er eLoran en **mærkbar investering**, men ikke urealistisk dyr i forhold til værdien af et sikkert elnet.

Praktik: Teknologisk er eLoran **modent** – systemet er standardiseret internationalt og har allerede været i drift i visse lande. **Kina** har netop i 2024 færdiggjort et nationalt eLoran-baseret tidssystem ¹⁶ ¹⁷, og Sydkorea er også i gang med at bygge et eLoran-netværk efter oplevede GPS-forstyrrelser. Udfordringen er primært organisatorisk: Det kræver politisk vilje og samarbejde at genoplive sådanne store radiosendere. I Europa kunne Energinet næppe alene bygge eLoran, men f.eks. via EU's initiativer for **komplementær PNT** kunne Danmark få del i et jordbaseret timing-system. Ifht. integration vil eLoran-modtagere kunne indsættes i kontrolrum eller større stationer som en parallel tidskilde til GNSS. En vigtig pointe er, at eLoran også kan udsende identisk tidsskala (UTC) som GPS, så de to kan backupe hinanden uden større ændringer i dataformat. Jordbaserede tidssendere (som DCF77 og eventuelt fremtidige europæiske eLoran-stationer) er således et **praktisk supplement**, men de kræver år at planlægge og implementere – realistisk kunne et fuldt dækkende system være 5-10 år ude i fremtiden, hvis man starter nu.

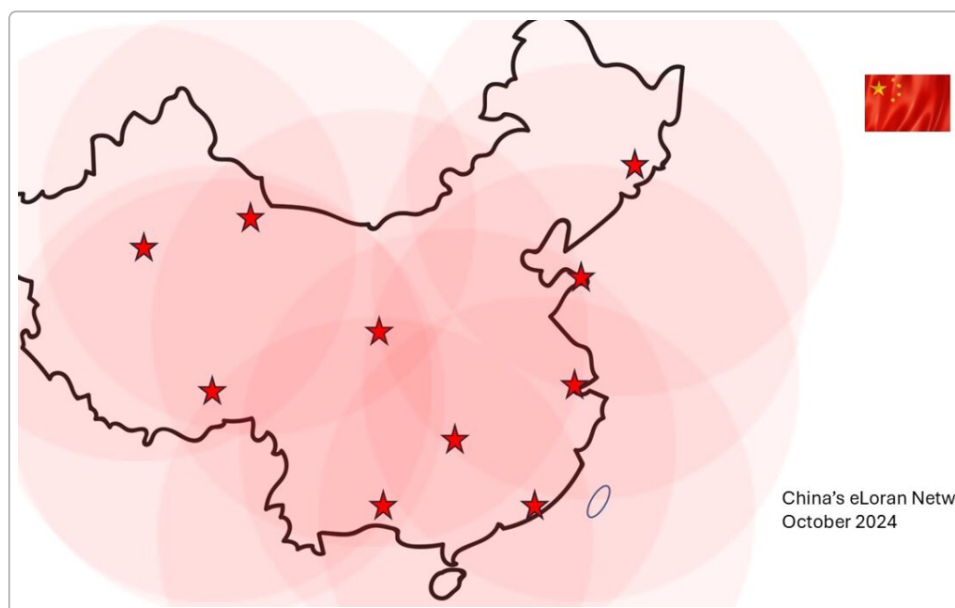


Illustration: Kinas tredobbelte PNT-arkitektur omfatter landsdækkende eLoran-langbølgesendere (røde stjerner) ud over satellitter og fiber. ELoRAN-signalernes store rækkevidde og uafhængighed af rumsegmentet giver Kina en **robust backup**, som andre nationer (bl.a. Sydkorea og Storbritannien) også undersøger ¹¹ ¹⁸.

Tidsfordeling via fiber-netværk (PTP og nationale tidsreferencer)

En fundamentalt anderledes tilgang er at **flytte tidsdistributionen fra trådløse signaler til kablede netværk**. Hvis man har en stærk tidsskala et centralt sted (f.eks. et atomur eller forbindelse til UTC i en

national metrologisk institut), kan man sende denne tid videre ud til alle kritiske punkter i elnettet via fiber eller andre kommunikationslinjer. Teknologier som **Precision Time Protocol** (PTP, IEEE 1588) muliggør synkronisering af netværksnoder med sub-mikrosekund nøjagtighed over Ethernet/fiber, især når specialiseret hardware og kalibrering bruges. I praksis kan Energinet opbygge et hierarki af **tids-mastere**: Et primært reference-ur (evt. flere for redundans) modtager UTC-tid fra f.eks. et atomensemble (eller stadig GPS/Galileo som kilde, men med mulige andre kilder som backup). Disse mastere distribuerer tid gennem det eksisterende kommunikationsnet (som ofte består af fiberkabler til transformerstationer osv.). Lokale **slave-enheder** ved hver station modtager tidspakkerne og justerer deres lokale ur. Således kan alle PMU'er og andet udstyr få tidsstempel fra fiber i stedet for direkte fra GPS.

Robusthed: En **jordbaseret fiberløsning** er potentielt meget robust over for radioforstyrrelser, da signalerne er i lukkede kabler. Det eliminerer truslerne fra GPS-jamming/spoofing fuldstændigt for de forbundne noder ¹⁹. Fiberbaseret timing kan også gøres meget sikkert mod cyberangreb ved at bruge lukkede net (f.eks. Energinets eget kommunikationsnet) og krypterede protokoller. Der er dog nogle sårbarheder: Fiberforbindelser kan afbrydes fysisk (graves over), og netværksudstyr kan fejle eller blive hacket, hvis ikke ordentligt sikret. Der skal derfor bygges redundans ind – fx ringforbindelser, flere mastere og kontinuerlig overvågning af tidssignalernes integritet (det er muligt at køre **to-vejs timing**, hvor slave og master krydstjekker hinanden for at afsløre fejl, som CAST-initiativet i USA gør det ²⁰ ²¹). Overordnet set anses fiber-tidsdistribution som en **meget pålidelig** metode, der i kombination med radio og satellit kan give *“triple redundancy”* ²².

Omkostninger: Fordelen i Danmark er, at **meget af infrastrukturen allerede er til stede**. Energinet og danske elnetselskaber har ofte fiberforbindelser til de fleste større stationer for SCADA/data-kommunikation. Disse kan opgraderes til også at levere PTP-tidssignaler med relativt begrænsede ekstra omkostninger – primært indkøb af PTP-grandmaster-ure, opgraderes af netværksswitches til at understøtte hardware-timestamping, og installation af PTP-klientmoduler ved de enheder, der skal synkroniseres. En del moderne IED'er og relæer understøtter allerede IEEE 1588 PTP profiles (fx Power Profile). **Hovedudgiften** er at etablere de centrale referencetidspunkter. Dette indebærer investering i et sæt **atomure** (fx rubidium- eller cæsiumure) og eventuelt modtagere for GNSS som én kilde. Danmarks nationale metrologiinstitut (DFM) har peget på behovet for en **national tidsreference** netop som alternativ til GPS-signaler ²³, hvilket kunne understøtte elnettet såvel som telekom, finans m.m. Et sådant “timeserver”-anlæg med flere atomure, forsyningssikring og regelmæssig kalibrering mod UTC vil koste noget (måske et tocifret millionbeløb), men det er *engangsinvesteringer* i sikkerhed. Driften af et fibernet-baseret system er relativt billig, da det kan dele net med eksisterende data (CAST-projektet i USA benytter f.eks. mørk fiber, kommerciel fiber og OPGW i eksisterende el-transmissionslinjer til formålet ²¹). Samlet set er fiberløsningen **omkostningseffektiv** ift. den præcision og sikkerhed, den leverer – især fordi den kan udnytte allerede eksisterende infrastruktur.

Praktik: Implementeringsmæssigt kræver dette en **grundig planlægning og standardisering**. Alle involverede enheder skal have de nødvendige PTP-klienter eller gateways. Energinet skal måske opgradere nogle kommunikationsforbindelser og sikre båndbredde til timing. Et nationalt reference-UTC-signal kunne komme fra DFM eller via internationale forbindelser (fx NIST eller uBlox tjeneste). **Tidsfordeling via fiber er allerede demonstreret** i projekter: I USA etableres Center for Alternate Synchronization and Timing (CAST), der bygger et net af atomure og fiberudbredt tid specifikt til elnettet ²⁴. Denne model viser, at det er praktisk muligt at opnå “failsafe” tid til alle stationer over land ²⁴. I praksis kunne Energinet starte i det små ved at sætte enkelte pilotprojekter op – fx synkronisere et par stationer via fiber og sammenligne mod GPS – og siden skalere op. Tidsfordeling over fiber kan rulles ud gradvist og parallellkøres med GPS, hvilket mindsker risikoen under implementering. Et realistisk tidsperspektiv afhænger af omfanget, men **flere år** må påregnes for fuld landsdækning og test (formentlig 5-10 år for at nå 100% udrulning, givet finansiering og godkendelser – her er

brugerenes antagelse om 10 år ikke urealistisk). Fordelen er dog, at man løbende høster gevinster undervejs og kan prioritere de mest kritiske knudepunkter først.

Andre tilgange (LEO-satellitter, lokale atomure og nye metoder)

Udover ovenstående primære kategorier er der nogle supplerende eller fremspirende løsninger, som fortjener opmærksomhed:

- **LEO-satellitbaseret tidstjeneste:** En nyere udvikling er brugen af *lavbane-satellitter* (LEO) til timing. Firmaer som Satelles (nu en del af Iridium) udsender et signal kaldet **STL (Satellite Time & Location)** via Iridium-konstellationen i lav jordbane. Disse signaler er typisk 1000 gange stærkere ved jorden end GPS ²⁵, og de bevæger sig over himlen, hvilket gør jamming sværere (man skal jamme en bredere del af himlen). STL kan levere timing med ± 100 ns nøjagtighed og er krypteret for at modstå spoofing ²⁶ ²⁷. En **LEO-baseret service** fungerer som et supplement: man installerer en speciel modtager, og mod betaling får man et robust tidsfeed, der er uafhængigt af GPS. Robusthedsmæssigt er det lidt en hybrid – stadig radiosignaler (så ikke så skudsikkert som fiber), men betydeligt sværere at forstyrre end GNSS, netop fordi signalstyrken og banen adskiller sig. Omkostningen er primært abonnementsudgifter og modtagerkøb. Praktisk kan LEO-tid være en **hurtig løsning**: Man kunne forestille sig, at Energinet udstyrer centrale stationer med disse modtagere som backup. LEO-systemer er relativt nye, men de er tilgængelige i dag globalt.
- **Lokale hold-over ure (atomure):** En simpel foranstaltning for at øge robustheden er at udstyre nøglekomponenter med **lokale atomure** eller højkvalitetsoscillatorer, der kan holde tiden i nogen tid selv uden ekstern input. For eksempel kunne hver PMU eller hvert lokalt kontrolcenter have et rubidium-ur, der normalvis disciplineres af GPS, men som ved GPS-tab kan "holdover" i minutter eller timer med mikrosekund-nøjagtighed. Det løser ikke alt på ubestemt tid, men kan **købe værdifuld tid** under en GPS-forstyrrelse, indtil man enten genvinder signalet eller falder over på en anden kilde. Omkostningen pr. enhed for et rubidium-ur er i dag nogle få tusinde dollars. I stor skala kan det være dyrt at udstyre *alle* enheder, men man kan målrette de vigtigste. Praktisk er det let integrerbart (mange GPS-synkronisatorer har allerede en indbygget disciplinerbar oscillator). Dette tiltag bør kombineres med faktisk redundante kilder, da det kun er midlertidigt nødberedskab.
- **Pulsar-baseret timing (eksperimentel):** I forskningens frontlinje er der forslag om at bruge signaler fra pulsarer (roterende neutronstjerner) som en **naturlig "fyrtårns"-tidskilde**. Pulsarer har ekstremt stabile rotationsperioder – visse millisekund-pulsarer er så stabile, at de over millioner af år rivaliserer atomure ²⁸. Idéen er at opfange pulsarernes regelmæssige pulssignaler med radioteleskoper og bruge dem som en astronomisk reference. Korrekt behandlet kan dette give mikrosekund-nøjagtig tid ²⁹ ³⁰. Fordelen er, at pulsarer er *100% uafhængige af menneskeskabte systemer* – de kan ikke slukkes af nogen nation. Robusthed mod spoofing/jamming er fremragende (ingen kan "falske" en pulsar let). Ulempen er det praktiske: Det kræver ret store antenner eller specialudstyr, og signalerne er svage og støjfyldte ³¹ ³². Løsningen lige nu er ikke operationel for elsystemet; den er **dyr og ufleksibel** (man placerer ikke lige en radioteleskop-antenne ved hver transformerstation ³³ ³⁴). Men der forskes i at lave centrale pulsar-tidsstationer, som så kan distribuere tid videre via fiber ³⁵ ³⁶. Det er nok en løsning på meget langt sigt (10+ år), men værd at nævne som "ultimate backup" perspektiv.

Samlet set er der altså en række alternative metoder – hver med deres styrker og svagheder. I praksis vil den bedste robusthed opnås ved at **kombinere flere** af dem, så de komplementerer hinanden.

Læring fra Kina: Et multi-lags system

Brugeren nævner specifikt Kina som eksempel, og det er værd at dykke ned i. Kina har investeret massivt i at blive uafhængig af amerikansk GPS for deres kritiske infrastruktur. Resultatet er et *tredelede PNT-system*:

- **Egne satellitter (BeiDou)** – Kina har fuld global dækning med BeiDou GNSS (kompatibel med GPS), hvilket sikrer, at de ikke er afhængige af andres satellitter ⁸.
- **Jordbaseret eLoran-netværk** – Som nævnt har Kina bygget nye langbølge-timingstationer (f.eks. i Dunhuang, Korla, Nagqu) som sammen med eksisterende Loran-C stationer nu giver landsdækkende dækning af et robust timesignal ¹⁶ ³⁷. Signalnøjagtigheden er imponerende – kineserne rapporterer at have opnået **20 ns præcision** ved sendereniveau (mod ~50 ns international standard) via differens-teknikker ¹⁷ ³⁸.
- **Omfattende fiberoptisk timing-grid** – Kina har etableret et 20.000 km langt fiber-baseret timingnet med næsten 300 timing-knudepunkter, der distribuerer tid på tværs af landet ¹⁸. Dette fiber-net integrerer endda signaler fra satellit og eLoran, således at systemerne krydsvaliderer hinanden hele tiden.

Ifølge en analyse har Kina dermed en **“PNT triade”** – uafhængige signalveje fra hhv. satellitter, jordiske sendere og fiber, uden fælles svaghedspunkter ¹¹. Et angreb eller udfald på ét element (f.eks. jamming af satellitter) vil ikke lamme de andre ³⁹. Resultatet er en *hærdet* infrastruktur, der kan modstå selv intens påvirkning ¹². For eksempel i en konflikt ville Kina kunne forstyrre GPS i deres region (det har de demonstreret evne til bl.a. via spoofing-hændelser i Shanghai havn ⁴⁰), mens deres egne styrker og net stadig fungerer via eLoran og fiber ⁴¹. Kina udtaler, at de efter 60 års udvikling nu har *“verdens mest teknisk komplette nationale tidssystem”* ⁴². Dette case study viser, at det **er realistisk** at opnå GPS-uafhængighed, men det kræver et langsigtet, flerstrengt sats. Danmark har naturligvis en anden skala end Kina, men princippet om flere lag af redundans er gyldig også for os. Kina-eksemplet peger især på værdien af at *kombinere* løsninger for maksimal robusthed.

Sammenligning af løsninger: Robusthed, omkostning og realisme

For at opsummere de vigtigste alternativer vurderes de her side om side:

- **Multi-GNSS (Galileo/GLONASS/BeiDou):** *Robusthed:* Moderat – beskytter mod enkeltpunktsfejl i GPS-systemet, men ikke mod bred radioforstyrrelse. *Omkostning:* Lav pr. enhed (flere GNSS er typisk indbygget i nye modtagere). *Praktisk:* Nemt at implementere i nyindkøb; eksisterende enheder kan opgraderes hvis de har muligheden. **Tidsramme:** 1-5 år (afhænger af udskiftningstakten af udstyr).
- **Galileo PRS (krypteret):** *Robusthed:* Højere end civil GPS mod spoofing, men jamming sårbarhed ligner; dog garanteret adgang selv under kriser. *Omkostning:* Moderat/høj – kræver autorisation og specielle modtagere. *Praktisk:* Kun for statsautoriseret brug; kunne blive en del af kritisk infra i EU. **Tidsramme:** 5+ år (PRS er operationelt nu, men integration i elnetsammenhæng pågår endnu).
- **eLoran langbølge tidssendere:** *Robusthed:* Meget høj mod jamming/spoofing (kræver stor indsats at forstyrre) ¹¹. Ingen afhængighed af udenlandsk infrastruktur. *Omkostning:* Høj initialt (nye sendere for måske et trecifret millionbeløb i kr., hvis nationalt net). Drift omkostet moderat (anslået <50 mio kr/år for flere stationer). *Praktisk:* Velafprøvet teknologi, men politisk/

organisatorisk tung at iværksætte alene. **Tidsramme:** 5-10 år fra beslutning til fuld drift (inkl. international koordinering).

- **Fiber/PTP nationalt tidenet:** *Robusthed:* Meget høj (isoleret fra radioangreb; kan designes med redundans) ¹⁹. *Omkostning:* Moderat initialt (udnytte eksisterende fiber; udstyrskøb til tidservere og netværk). Lave løbende omkostninger. *Praktisk:* Kræver teknisk integration i elnet-IT/telekom, men gennemførligt med kendte standarder ⁴³. **Tidsramme:** 3-8 år for gradvis implementering (pilotprojekter kan give resultater tidlige).
- **LEO-baseret (Iridium/Satelles):** *Robusthed:* God mod jamming (stærke dynamiske signaler), høj mod spoofing (krypteret). Dog afhængig af privat leverandør og satellitter. *Omkostning:* Abonnementsbaseret – udgift pr. modtager per år; rimelig ved få kritiske noder, dyrt hvis alt skal dækkes. *Praktisk:* Plug-and-play modtagere findes, kan tages i brug hurtigt som backup. **Tidsramme:** 0-2 år (til hurtig supplerende sikring af fx kontrolcentre).
- **Lokale atomure/oscillatorer:** *Robusthed:* Øger resiliens ved udfald (giver måske timer/dage af drift uden ekstern sync afhængigt af nøjagtighed). Men ikke en *selvstændig* løsning – skal have initiel sync-kilde. *Omkostning:* Middel pr. sted, potentielt høj for bred udrulning. *Praktisk:* Enkel at tilføje, især på nøglestationer. **Tidsramme:** <1 år for at installere udstyr på prioriterede steder.
- **Andre (pulsar m.fl.):** *Robusthed:* Teoretisk ekstremt høj (kosmisk kilde), *Omkostning:* meget høj (specialudstyr), *Praktisk:* ikke modent. **Tidsramme:** >10 år, for forskningsinteresseret.

Som det fremgår, er **ingen enkelt løsning perfekt**. Derfor anbefales det at satse på en *flerlaget strategi*. For Energinet og Danmark kunne en vej frem se således ud:

1. Kortsigtede forbedringer (1-3 år): Opgrader til multi-GNSS modtagelse overalt, implementér basis GPS-sikkerhed (f.eks. spoofing-detektionssoftware, alarmer ved signal-tab), og indsæt hold-over oscillatore hvor det er kritisk. Overvej at teste en LEO-basert tidsmodtager på et vigtigt knudepunkt som proof-of-concept.

2. Mellemsigt (3-7 år): Samarbejd med nationale metrologi-/forskningsmiljøer om at etablere en **national UTC-tidsreference** (f.eks. DFM leverer officiel tid til energisektoren). Udrul et **fiber/PTP-baseret synkroniseringsnet** gradvist i transmissionsnettet – start med de vigtigste stationer og kontrolcentre. Dette kan ske parallelt med, at GNSS stadig bruges, så risikoen er lav under implementering. Samtidig kan Danmark via EU/NATO arbejde for en **jordbaseret PNT-backup** – eventuelt deltage i genoplivning af eLoran i Europa eller lignende initiativer for at få en robust radio-tidskilde.

3. Langsigtet (5-15 år): Fuldfør fiber-tidenettet til at dække alle relevante anlæg (og måske udvalgte dele af distributionsnettet hvis relevant for f.eks. adaptive ø-drift systemer). Indfør eLoran eller tilsvarende LF-signal som *national backup* (hvis EU beslutter et sådant system, vil Danmark have stor gavn af at tilslutte sig). Sørg for løbende at teste katastrofescenarier: f.eks. en “Day Without GPS” drill, for at se hvordan kombinationen af fiber + eLoran + holdover klarer sig ⁴⁴. Juster investeringer efter den teknologiske udvikling – måske vil nye kvante-baserede timingløsninger eller billigere atomurteknologier være tilgængelige inden for dette tidsrum, hvilket kan yderligere styrke robustheden.

Konklusion

For at svare direkte: **Danmark og Energinet kan absolut gøre sig uafhængige af GPS-tid ved at kombinere flere alternative timingløsninger**, hvor hver bringer ekstra robusthed. Kina har vist værdien i et tre-strengt system (satellit, jordisk radio og fiber) ¹⁸ ¹¹, og lignende principper kan anvendes her. Løsninger som et nationalt fiber/PTP-tidenet støttet af lokale atomure vil give en intern kapacitet, som er immun overfor trusler udefra ¹⁹ ²⁴. Supplerer man dette med en langsigtet satsning på jordbaserede radiosignaler (eLoran) og udnytter man samtidig flere GNSS (herunder Galileo) i overgangsperioden, opnår man en **meget høj grad af robusthed**. Økonomisk og praktisk vil nogle tiltag (f.eks. fiber-udbredt tid) være relativt nemme at begynde på og giver værdi løbende, mens større infrastrukturelle projekter (eLoran) kræver politisk beslutning og internationalt samarbejde. Tidsmæssigt er det fornuftigt at antage ~10 år for fuld implementering af en ny landsdækkende løsning, men det vigtigste er at komme i gang i god tid, da elnettets stabilitet bliver stadig mere afhængig af præcis tid. Med den rette plan kan Energinet på sigt have et **helt GPS-uafhængigt synkroniseringssystem**, hvilket vil øge forsyningssikkerheden og den nationale sikkerhed markant. Som NIST konkluderede: når tid bliver mission-kritisk, er redundante tidsfordelingsmetoder essentielle ⁴⁵ ⁴³ – det er den filosofi, Danmark bør følge for elnettet.

Kilder: Vi har baseret denne undersøgelse på aktuelle rapporter og projekter vedrørende alternativ tids-synkronisering i energisektoren, herunder NIST og DOE workshops om GPS-uafhængige løsninger ⁴³ ¹⁹, analyser fra Resilient Navigation and Timing Foundation ¹⁸, tekniske artikler samt erfaringer fra udlandet (fx Kinas implementering af eLoran og fiber timing ¹⁶ ¹¹). Disse kilder dokumenterer både behovet for GPS-uafhængighed og realiserbare veje til at opnå det med eksisterende eller nærtforestående teknologi. Skiftet vil kræve investering og et strategisk langt sejt træk – men det er både teknisk muligt og samfundsøkonomisk fornuftigt for at sikre et robust elnet for fremtiden.

¹ ² ²⁸ ³⁰ ³¹ ³² ³³ ³⁴ ³⁵ ³⁶ Time Synchronization Techniques in the Modern Smart Grid: A Comprehensive Survey

<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/5/1163>

³ ⁴ ⁵ ⁶ ²⁰ ²¹ ²² ²⁴ To protect the electric power grid, timing is everything

<https://www.renewableenergyworld.com/power-grid/to-protect-the-electric-power-grid-timing-is-everything/>

⁷ ⁸ ¹¹ ¹² ³⁹ ⁴⁰ ⁴¹ GPS Gave America An Edge — Until China Built A Triad Of Satellites, Towers And Fibre

<https://swarajyamag.com/tech/gps-gave-america-an-edge-until-the-chinas-navigation-network-surpassed-it>

⁹ [PDF] Providing a Resilient Timing and UTC Service Using eLoran in the ...

<https://rntfnd.org/wp-content/uploads/2018/04/2016-ION-PTTI-Offermans-Providing-a-Resilient-Timing-and-UTC-Service-Using-eLoran-in-the-US-1.pdf>

¹⁰ Analysis of the Development Status of eLoran Time Service System ...

<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/23/12703>

¹³ President's 2009 Budget Proposal Directs DHS to Implement eLORAN

<https://insidegnss.com/presidents-2009-budget-proposal-directs-dhs-to-implement-eloran/>

¹⁴ 10 answers about eLoran - GPS World

<https://www.gpsworld.com/10-answers-about-eloran/>

¹⁵ Remember Loran? You may see a new, improved version on the ...

<https://www.carolinasportsman.com/fishing/remember-loran-you-may-see-a-new-improved-version-on-the-horizon/>

- 16 17 37 China completes national eLoran network - GPS World
<https://www.gpsworld.com/china-completes-national-loran-network/>
- 18 38 42 China completes national eLoran network - The Paper - RNTF
<https://rntfnd.org/2024/10/03/china-completes-national-loran-network-the-paper/>
- 19 Alternative Precision Timing Services for the Nation's Power Grid | Department of Energy
<https://www.energy.gov/oe/articles/alternative-precision-timing-services-nations-power-grid>
- 23 Metrologi til Digitalisering og Datasikkerhed - Bedreinnovation.dk
<https://bedreinnovation.dk/forslag-til-indsatsomrader/metrologi-til-digitalisering-og-datasikkerhed/>
- 25 U.S. Nears eLoran Decision with Broad International Implications
<https://nautelnav.com/u-s-nears-loran-decision-with-broad-international-implications-gnss-vulnerability-drives-proposal/>
- 26 [PDF] SATELLITE TIME AND LOCATION (STL)
https://joint-research-centre.ec.europa.eu/document/download/3da03562-7e59-4b5f-b6e1-941fe7043f4c_en?filename=Satelles.pdf
- 27 STL is a Source of Time - Iridium PNT
<https://satelles.com/technology/stl-source-of-time/>
- 29 A microsecond-level alternative clock source for power grid ...
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224125004294>
- 43 44 45 NIST explores timing alternatives for smart grids - GPS World
<https://www.gpsworld.com/nist-explores-timing-alternatives-for-smart-grids/>