

AI-driven effektprognostisering som grund för produktionsplanering i fjärrvärmenät



Författare: Dennis Johansson Lloyd

Datum: 2026-01-27

Sammanfattning

Detta examensarbete behandlar utvecklingen och utvärderingen av ett webbaserat beslutsstödsystem för produktionsplanering inom fjärr- och kraftvärme. Syftet med projektet var att undersöka hur historiska driftdata, i kombination med externa väderprognoser, kan användas för att skapa en tillförlitlig lastprognos och därigenom förbättra planeringsprocessen. Projektet resulterade i en fungerande prototyp som använder dess data för att träna en maskininlärningsmodell, kapabel att förutse framtida värmebehov. Utöver den framtagna lastprognosen har även en resonerande AI-modell från Google integrerats, för att baserat på prognosens resultat och föreslå optimerade körplaner. Resultaten från arbetet demonstrerar den praktiska bärkraften hos AI-baserade metoder som ett värdefullt beslutsstöd för driftpersonal och ledning, särskilt vid korttidsplanering. Den utvecklade prototypen uppfyller därmed projektets övergripande syfte och mål.

Innehåll

Sammanfattning	2
1. Inledning.....	4
1.1 Bakgrund	4
1.2 Problemformulering.....	4
1.3 Syfte och Mål	5
1.4 Frågeställningar.....	5
1.5 Avgränsningar	5
2. Teoretisk Referensram.....	7
2.1 Energisystem för Kraft- och Fjärrvärme	7
2.2 Produktionsplanering och Driftoptimering.....	7
2.3 Ekonomiska och Regulatoriska Ramverk	8
2.4 Maskininlärning för Tidsserieprognoser	9
3. Metod och Genomförande.....	11
3.1 Projektmetodik och Planering.....	11
3.2 Datainsamling och Beredning.....	12
3.3 Systemarkitektur och teknologival	12
3.4 Hantering av Projektutmaningar	13
4. Resultat	14
4.1 Prototypens Funktioner.....	14
4.2 Observationer gällande Prognosprecision	14
4.3 Utmaningar vid Ackumulatorstyrning	14
5. Analys och Diskussion	16
5.1 Resultatens Tolkning och Betydelse	16
5.2 Systemets Värdeskapande Potential	16
5.3 Projektets Koppling till Utbildningen.....	17
5.4 Metodkritik och Kritiskt Perspektiv	17
6. Slutsats och Framtida Arbete.....	18
6.1 Slutsatser	18
6.2 Förslag till vidare utveckling.....	18

1. Inledning

Produktionsplanering inom fjärr- och kraftvärme sker i en operativ miljö präglad av högteknisk komplexitet och ständiga avvägningar. I kontrollrummet ställs driftpersonalen dagligen inför utmaningar att fatta snabba beslut för att säkerställa leveranssäkerheten, samtidigt som de måste optimera anläggningens drift och efterleva strikta miljökrav gällande utsläpp som kväveoxider (NO_x) och kolmonoxid (CO).

Verksamheten bedrivs dygnet runt, vilket innebär att ansvaret för driften roterar mellan olika skiftlag. En central utmaning i dygnsdrift är svårigheten att upprätthålla en gemensam och konsekvent strategi. När det objektiva beslutsunderlaget brister tenderar styrningen att baseras på enskilda operatörers erfarenhet och subjektiva bedömningar, snarare än på en enhetlig datadriven plan. Detta medför en risk för suboptimala beslut och skapar en inkonsekvent drift, då strategier sällan överförs sömlöst mellan skiftbyten utan i stället varierar beroende på vem som tjänstgör.

Konsekvenserna av denna variation blir särskilt tydliga vid snabba väderomslag eller oförutsedda händelser. Utan en tydlig plan som sträcker sig över skiften ökar risken för felaktiga beslut med långtgående följder. Det kan resultera i att dyr och miljöbelastande spetslast, såsom oljepannor som startas i onödan, eller att baslastpannor stoppas vid fel tidpunkt. Detta leder i sin tur till onödiga start- och stoppkostnader samt ökat slitage på utrustningen. I en bransch med pressade marginaler och strikta miljökrav finns därför ett stort behov av digitala verktyg som kan överbrygga gapet mellan olika skiftlag. Ett gemensamt, prediktivt beslutsstöd skapar inte bara en stabilare drift, utan öppnar även upp för nya intäktsmöjligheter på exempelvis balansmarknaden.

1.1 Bakgrund

Produktionsplanering inom fjärr- och kraftvärme utgör en central och komplex del av den dagliga driften. De beslut som fattas rörande val av produktionsenheter och deras respektive lastnivåer baseras traditionellt på operatörernas samlade erfarenhet i kombination med analys av historiska mönster. Inom energisektorn finns ett växande behov av digitala verktyg som kan öka effektiviteten, flexibiliteten och motståndskraften i systemen. Trots den pågående digitaliseringstrenden saknar många befintliga system de prediktiva funktioner som krävs för att aktivt stödja driftpersonal och ledningen att planera produktionen proaktivt och optimerat.

1.2 Problemformulering

Den centrala utmaningen som detta projekt adresserar är den situation driftpersonal ofta ställs inför: att fatta snabba och kritiska beslut med begränsat beslutsstöd. Trots att moderna energianläggningar genererar och lagrar stora volymer historiska driftdata, förblir denna informationsresurs ofta underutnyttjad. Detta leder till att planeringen blir

personberoende och inkonsekvent, vilket i sin tur medför risker för suboptimal drift, ökade kostnader och svårigheter att bibehålla en enhetlig strategi över skiften.

Den centrala problemformuleringen kan därför sammanfattas i frågan: Hur kan historiska driftdata i kombination med moderna maskininlärningsmetoder och resonerande modeller omsättas till ett praktiskt och tillförlitligt beslutsstöd som optimerar produktionsplaneringen för både personal och ledning?

1.3 Syfte och Mål

Projektets syfte är att utveckla och utvärdera ett AI-baserat beslutsstödsystem för produktionsplanering inom fjärr- och kraftvärme. Genom att utnyttja historiska driftdata – specifikt levererad effekt och utomhustemperatur med tillhörande tidsstämplar – syftar projektet till att konstruera anläggningsspecifika modeller för ett tillförlitligt beslutsstöd. **Tidsstämplarna är här av central betydelse, då de möjliggör identifiering av cykliska mönster; effektuttaget varierar markant beroende på tid på dygnet samt huruvida det rör sig om vardag eller helgdag**

Det primära målet är att skapa en funktionell prototyp som kan tjäna som ett *proof-of-concept* för denna metodik och demonstrera hur befintliga datamängder kan transformeras till praktiskt användbara planeringsunderlag.

1.4 Frågeställningar

För att uppnå syftet och målet har projektet styrts av följande tre frågor:

1. Hur kan historiska driftdata i form av levererad effekt, utomhustemperatur och tidsstämplar användas för att träna en maskininlärningsmodell för prediktion av framtida värmebehov?
2. Med vilken precision kan den utvecklade modellen förutse framtida last jämfört med det faktiska utfallet?
3. Hur kan utdata från en prognosmodell, i kombination med en resonerande språkmodell, omsättas till ett praktiskt beslutsstöd för att underlätta samordning mellan driftpersonal och ledning?

1.5 Avgränsningar

För att säkerställa att ett robust resultat kunde levereras inom projektets tidsram definierades följande avgränsningar:

Omfattning (Innefattas i projektet)

- **Fokus på värmeproduktion:** Systemet hanterar prediktion och planering av värmebehov (effekt och energi).

- **Rådgivande funktion:** Verktuget fungerar uteslutande som ett beslutsstöd och saknar förmåga till direkt styrning av anläggningens fysiska komponenter.
- **Anläggnings specifika data:** Modellen tränas och utvärderas baserat på data från en enskild referensanläggning för att verifiera konceptets bärkraft.
- **Beräkningsmodell för bränsle:** Logistikdelen av systemet estimerar bränsleåtgången genom att kontinuerligt beräkna bränslets energiinnehåll i förhållande till pannans verkningsgrad.

Exkluderingar (Möjlig framtida utveckling) Följande områden har medvetet exkluderats för att prioritera projektets kärnfokus, men utgör intressanta områden för vidareutveckling:

- **Fullständig kraftvärmeoptimering:** Systemet tar inte hänsyn till samtidig elproduktion.
- **Marknadsoptimering:** Ekonomisk optimering mot externa marknader, såsom spotpriser på el, inkluderas ej.

Denna avgränsning var avgörande för att kunna bibehålla fokus på att utveckla en tillförlitlig grundmodell för lastprognos och beslutsstöd.

2. Teoretisk Referensram

Detta kapitel syftar till att förankra projektets praktiska genomförande i de teoretiska kunskaper som förvärvats under energiingenjörsprogrammet. Genom att belysa de tekniska principerna för kraft- och fjärrvärmesystem, vedertagna metoder för driftoptimering samt de ekonomiska och regulatoriska faktorer som styr, skapas en grund för förståelsen av systemets komplexitet. Vidare introduceras de grundläggande principerna för maskininlärning som ligger till grund för arbetet.

2.1 Energisystem för Kraft- och Fjärrvärme

Kunskap från kurserna Energisystem och energiledningssystem samt Energiproduktion utgör den tekniska grunden för detta projekt. Ett typiskt fjärrvärmesystem består av flera nyckelkomponenter:

- **Produktionsenheter:** Dessa delas ofta in i *baslastenheter*, som är kostnadseffektiva och körs kontinuerligt (t.ex. avfalls- eller biobränslepannor), och *spetslastenheter*, som är dyrare i drift men snabba att starta för att täcka tillfälliga effekttoppar (t.ex. olje- eller elpannor).
- **Distributionsnät:** Ett nätverk av isolerade rör som transporterar hett vatten från produktionsanläggningen till konsumenterna och returnerar det avkylda vattnet.
- **Energilagring:** Ackumulatortankar spelar en kritisk roll genom att lagra termisk energi. De kan laddas när produktionen är billig eller efterfrågan låg, och laddas ur för att möta effekttoppar, vilket minskar behovet av att starta dyra spetslastpannor.
- **Kraftvärme:** Integrerar elproduktion i detta system, vilket gör att anläggningen kan producera både värme och el samtidigt, vilket avsevärt ökar den totala energieffektiviteten.

2.2 Produktionsplanering och Driftoptimering

Traditionell produktionsplanering bygger ofta på operatörers och chefers erfarenhet. I kontrast till detta går detta examensarbete ut på att använda moderna, datadrivna metoder, vilket är kärnan i kursen Energieffektivisering och driftoptimering, systematisk analys för att optimera driften. Ett centralt begrepp är Merit Order, en metod där produktionsenheter rangordnas baserat på deras produktionskostnad. Genom att alltid använda den billigaste tillgängliga enheten först minimeras den totala produktionskostnaden. En effektiv planeringsstrategi syftar även till att minimera antalet start- och stoppcykler, eftersom varje start och stopp medför ökat slitage. Att kunna förutse kommande behov gör det möjligt att undvika användning av dyra spetslastbränslen som olja, vilket har en direkt positiv inverkan på både ekonomi och miljö.

2.3 Ekonomiska och Regulatoriska Ramverk

Produktionsbeslut påverkas starkt av externa faktorer, ett ämne som behandlas i kursen Energimarknader och energipolitik. Några av de viktigaste ramverken inkluderar:

- **Miljöavgifter:** I Sverige finns en **NOx-avgift** för utsläpp av kväveoxider. Dessutom omfattas större anläggningar av EU:s utsläppshandelssystem (**EU ETS**), vilket sätter ett pris på koldioxidutsläpp (CO₂). En optimerad driftplan strävar efter att minimera dessa kostnader.
- **Elmarknaden:** En volatil elspotmarknad skapar möjligheter för anläggningar med kraftvärme. Vid höga elpriser kan det vara lönsamt att maximera elproduktionen, medan låga elpriser kan göra det fördelaktigt att istället använda el för värmeproduktion (via elpannor eller värmepumpar). Detta samspel kallas **sektorkoppling**.
- **Informationssäkerhet:** Det nya **NIS2-direktivet** från EU ställer skärpta krav på informationssäkerhet för samhällskritisk infrastruktur, vilket energisystem klassas som. Detta innebär att nya digitala verktyg måste utvecklas med hög säkerhet i åtanke, från leverantörskedjan för mjukvara till spårbarhet och autentisering.

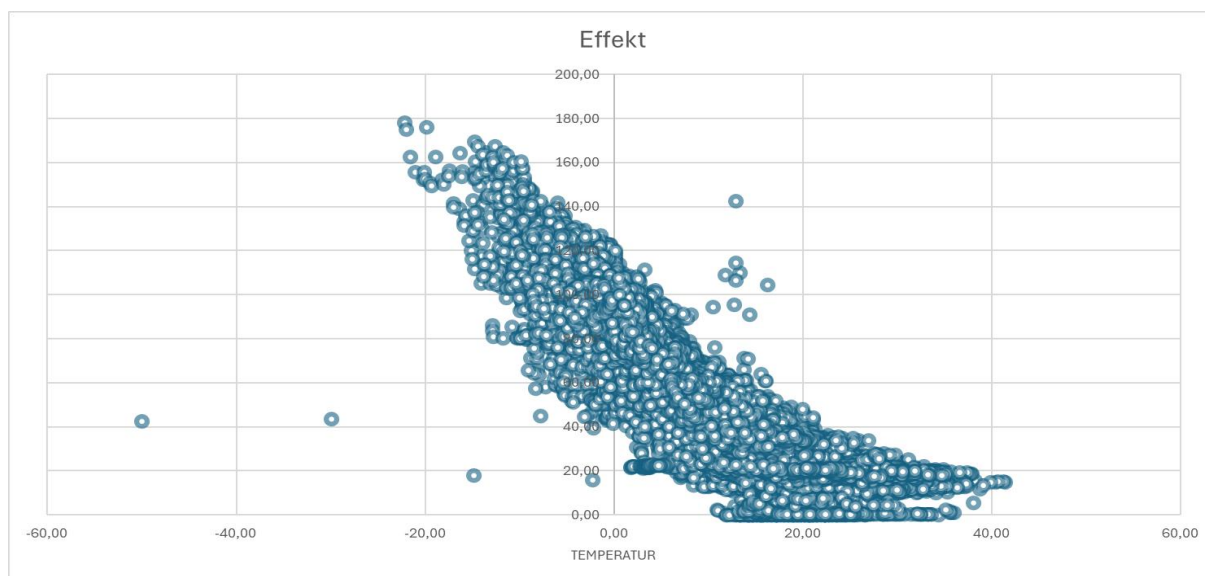
2.4 Maskininlärning för Tidsserieprognoser

Detta projekt använder maskininlärning (AI) för tidsserieanalys, en metod för att göra förutsägelser baserade på historiska data. Processen kan beskrivas i två steg:

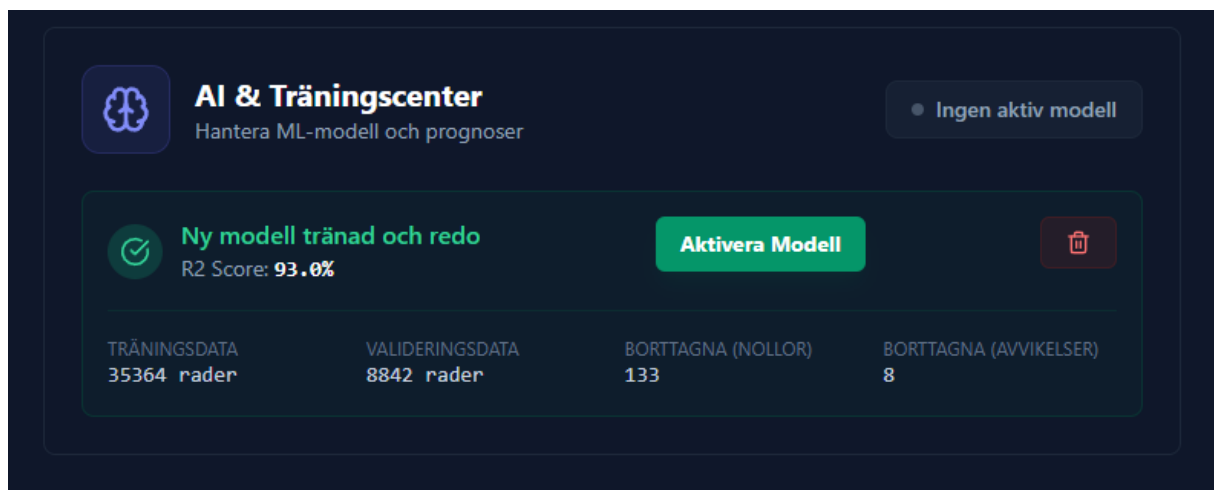
Träning: Innan själva inlärningsfasen påbörjas genomgår rådata en omfattande bearbetning. Som visas i Figur 1 innehåller historiska driftdata ofta brus och felaktiga mätvärden. I det ursprungliga datasetet om totalt 44 353 rader har AI-systemet identifierat och exkluderat 133 nollvärden samt 8 extrema avvikelser. Denna "tvättning" är avgörande för att säkerställa att modellen inte lär sig felaktiga mönster orsakade av givarfel eller driftstopp.

Datan delas därefter upp för att möjliggöra en objektiv utvärdering. Av den bearbetade datan har 8 842 rader (ca 20 %) separerats som ett validerings set, medan resterande del har använts för att träna modellen. Genom denna träning lär sig AI-modellen de komplexa, ofta icke-linjära sambanden mellan tidpunkt, utomhustemperatur och producerad värmeeffekt.

Validering och resultat: För att säkerställa modellens tillförlitlighet har den testats mot valideringsdata – data som modellen tidigare plockade ut ifrån datasetet. Resultatet, som illustreras i Figur 2, uppvisar en mycket hög precision med ett R^2 -värde på 93 %. Detta innebär att modellen med stor säkerhet kan förutse variationerna i värmebehovet, vilket gör den till ett kraftfullt verktyg för en optimerad produktionsplanering.



Figur 1 - Stökig dat



Figur 2 - Städad & validerad data

Prognos och operativ användning: När modellen är färdigtränad och validerad övergår den till den operativa fasen. Här integreras systemet med externa datakällor för att generera framåtblickande beslutsstöd. Genom ett programmeringsgränssnitt (API) hämtas aktuella väderprognoser från SMHI, vilket ger modellen realtidsdata om förväntad utomhustemperatur för de kommande dygnet.

Genom att kombinera dessa färskväderdata med information om tidpunkt (timme för timme, samt kalenderdata för vardag/helg), genererar modellen en prediktiv effektprognos. Denna lastprognos ger driftledningen en detaljerad uppskattning av det framtida värmebehovet. Med en förutsägelse som har en statistisk tillförlitlighet på 93 % kan produktionen optimeras med god framförhållning, vilket minimerar behovet av dyra spetsanläggningar och minskar risken för både över- och underproduktion.



Figur 3- Effektprognos

3. Metod och Genomförande

Från en initial projektplan till en fungerande molnbaserad prototyp, krävde projektets genomförande en metodisk och anpassningsbar ansats. Denna sektion detaljerar den praktiska resan genom att beskriva den valda projektmetodiken, datakällorna och deras beredning, den tekniska systemarkitekturen samt en transparent redogörelse för de utmaningar som uppstod och de strategier som användes för att övervinna dem.

3.1 Projektmetodik och Planering

Projektet genomfördes som en **praktisk fallstudie**, där målet var att utveckla och testa ett verktyg mot verkliga data för att validera dess funktion och nytta. Arbetet strukturerades enligt en initial projektplan som visualiserades i ett Gantt-schema. Planen sträckte sig från vecka 52, 2025, till vecka 6, 2026, och var indelad i följande huvudfaser:

- **Förstudie:** Inkluderade val av metod, litteraturstudier och initiala tester av API-kopplingar.
- **Utveckling (Fas 1 & 2):** Uppdelad i backend-utveckling med datamodellering och därefter frontend-utveckling med visualisering av data.
- **Validering:** Jämförelse av modellens prognoser mot verkliga utfallsdata för att utvärdera prestanda.
- **Rapportskrivning:** En löpande process med intensifierat fokus mot projektets slut.

Tidsplan (Gantt-schema)

Projektet löper 2025 vecka 52 – 2026 Vecka 6

Vecka	52	1	2	3	4	5	6
Förstudie & Litteratur (Metodval, API-tester)							
Utveckling Fas 1 (Backend, Datamodellering)							
Utveckling Fas 2 (Frontend, Visualisering)							
Validering & Test (Jämföra modell mot verkliga data)							
Rapportskrivning (Löpande, men fokus slutet)							
Opposition & Presentation							

3.2 Datainsamling och Beredning

Systemets funktion är beroende av två typer av data:

1. **Historiska data:** Driftdata (timvärden mellan 2019-01-01- 00:00 – 2025-06-17 10:00 totalt 44 354 mätpunkter) från en referenskraftvärmeanläggning säkrades tidigt i projektet. Detta data set innehöll tidstämplar, producerad effekt (MW) och relaterade temperaturer, vilket utgjorde grunden för att träna AI-modellen.
2. **Framåtblickande data:** För att generera prognoser hämtas väderprognoser via ett API från **SMHI** (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut).

För att hantera risken med bristfällig datakvalitet valdes en metodik där systemet konstruerades för att genomföra en **automatiserad datatvätt** (*data cleansing*). I stället för manuell hantering programmerades modellen att självständigt identifiera och exkludera felaktiga värden, såsom nollvärden eller extrema avvikelser som inte är fysiskt rimliga för anläggningen.

För att säkerställa att processen fungerade korrekt och att inget relevant data föll bort, genererar systemet loggar över de åtgärder som vidtagits i tvätten. Genom denna information kunde vi verifiera att borttagningen (i detta fall 133 nollvärden och 8 avvikelser) var korrekt utförd. Detta tillvägagångssätt säkerställer att modellen tränas på ett tillförlitligt underlag samtidigt som processen blir repeterbar och transparent.

3.3 Systemarkitektur och teknologival

Då examensarbetets tyngdpunkt ligger på energisystem och optimering av produktion, snarare än ren mjukvaruutveckling, har arkitekturen utformats för att vara funktionell och robust med fokus på tillförlitlig databehandling. Prototypen bygger på följande komponenter:

Backend & Dataanalys: Utvecklades i Python, vilket är branschstandard för maskininlärning. Här sker den centrala logiken för datatvätt, modellträning och beräkning av effektprognoiser.

Frontend: För att visualisera resultatet och skapa ett användarvänligt verktyg för driftledningen och operatörer användes biblioteket React för webbgränssnittet.

AI-assisterad utveckling: För att effektivisera programmeringen och hantera den tekniska komplexiteten användes avancerade verktyg som Google Jules/Antigravity och Gemini. Dessa verktyg möjliggjorde ett snabbare arbetsflöde, vilket lät projektet fokusera mer på energiteknisk analys och modellens noggrannhet än på att skriva kod.

3.4 Hantering av Projektutmaningar

Under projektets gång uppstod utmaningar som krävde en tydlig omdefiniering av målbilden. Ursprungligen var målet att utveckla ett komplett, marknadsklart system för slutkund, men tekniska och regulatoriska hinder ledde till att fokus skiftades mot en teknisk validering av konceptet.

- **Hårdvarubegränsningar och molnlösning:** Det visade sig tidigt att den lokala hårdvaran var otillräcklig för att träna de komplexa modellerna, vilket ledde till överhettning och orimliga beräkningstider. För att säkerställa projektets framdrift gjordes en strategisk pivotering till att använda den molnbaserade plattformen Google AI (Gemini). Detta löste prestandaproblemen men skapade en konflikt med målet om ett NIS2-kompatibelt system.
- **Prioritering mellan NIS2-efterlevnad och teknisk bevisföring:** De skärpta kraven i EU:s NIS2-direktiv för kritisk infrastruktur ställer hårda krav på loggning, spårbarhet och att data inte lämnar EU. Kombinationen av hårdvarubegränsningar och behovet av molnbaserad kraft gjorde det omöjligt att fullt ut följa direktivet inom ramen för prototypen. Ett strategiskt beslut fattades därför att frånga målet om ett leveransklart system och NIS2-efterlevnad. I stället prioriterades den tekniska valideringen för att bevisa att teorin bakom AI-modellen fungerar och levererar ett högt R^2 -värde.
- **Intressentdialog och omfattning:** Möten med Philip (produktionschef) och Roger (bränslechef) på Skövde Energi validerade konceptets relevans. Trots önskemål om fler funktioner, såsom djupare ekonomisk optimering, hölls fokus vid kärnan: att bygga en robust och fungerande prognosmodell. Genom att begränsa omfattningen och acceptera molnbaserad bearbetning kunde projektet leverera en bevisat fungerande modell i stället för en ofärdig men säkerhetsklassad produkt.

4. Resultat

Detta kapitel presenterar de konkreta utfallen av utvecklingsarbetet. Tyngdpunkten ligger på systemets realiserade funktionalitet samt de tekniska observationer som gjorts gällande datakvalitet och styrlogik under valideringsfasen.

4.1 Prototypens Funktioner

Projektet har resulterat i en fungerande prototyp av ett webbaserat beslutsstödsystem. Systemets arkitektur är uppbyggd kring tre kärnfunktioner:

Automatiserad datahantering: En modul som importerar historiska driftdata och utför en automatiserad datatvätt. Processen identifierar och filtrerar bort mätfel, extremvärden och nollvärden som annars skulle korrumpiera modellen.

Väderintegrering och Effektprognos: Genom ett API-anrop till SMHI hämtas lokala väderprognoser. Dessa körs genom AI-modellen för att generera en prediktiv effektprognos med en tidshorisont på 168 timmar.

Operatörsgränssnitt: Ett visuellt gränssnitt där det beräknade värmebehovet presenteras tillsammans med ett konkret förslag på produktionsplan för det kommande dygnet.

4.2 Observationer gällande Prognosprecision

Vid valideringen av AI-modellen konstaterades en hög förmåga att förutsäga effektbehovet, förutsatt att indata är korrekt. En kritisk upptäckt under testerna var dock betydelsen av temperaturgivarnas fysiska placering.

Dataanalysen visar att anläggningens lokala utomhustermometer uppvisar systematiska avvikelser jämfört med SMHI:s referensmätningar för samma geografiska område. En genomsnittlig skillnad på cirka 2°C noterades, vilket sannolikt beror på lokal uppvärmning vid mätpunkten eller suboptimal placering. Eftersom effektbehovet i fjärrvärmenätet är starkt korrelerat till utomhustemperaturen, medför denna avvikelse att modellen periodvis baserar sina prognoser på missvisande historiska data.

4.3 Utmaningar vid Ackumulatorstyrning

Medan effektprognosen för nätet uppnådde önskad precision, visade sig optimeringen av ackumulatortanken vara mer komplex. Vid testerna identifierades två huvudsakliga utmaningar för styrlogiken:

Teknisk balansering: Att synkronisera laddning och urladdning för att minimera antalet starter och stopp av pannor kräver en mer dynamisk anpassning till realtidsförändringar än vad den nuvarande modellen medger.

Värderingslogik: En osäkerhet identifierades kring hur den lagrade energin ska värderas ekonomiskt. Under utvecklingen framkom målkonflikter mellan att värdera energin

utifrån den undanträngda marginalkostnaden (vilken panna som ersätts) kontra att se energin som en ren säkerhetsreserv för att undvika dyra produktionsstopp.

Dessa observationer visar att fullständig automatisering av ackumulatorn kräver en mer sofistikerad ekonomisk algoritm än vad som rymdes inom projektets initiala omfattning.

5. Analys och Diskussion

Detta kapitel tolkar projektets resultat och sätter dem i ett större sammanhang. Här analyseras AI-teknikens genomförbarhet inom fjärrvärmesektorn, systemets potentiella mervärden samt hur arbetet förankras i ingenjörsutbildningens kärnområden. Avslutningsvis reflekteras över valda metoder och personliga erfarenheter under projektets gång.

5.1 Resultatens Tolkning och Betydelse

Projektet visar att AI-baserad lastprognostisering är tekniskt tillgänglig.

Den tekniska analysen av temperaturavvikelser belyser en kritisk framgångsfaktor: datakvalitet. Att en lokal givarplacering kan diffa 2 grader mot SMHI-data är inte bara en teknisk detalj, utan en affärsrisk. Det visar att införandet av AI kräver en förstudie av den fysiska mätinfrastrukturen. Utan en rigorös process för datarensning och kalibrering riskerar "intelligent" styrning att fatta beslut på felaktiga grunder.

Ur ett operativt perspektiv bör verktyget ses som en förstärkning av, inte en ersättning för, mänsklig kompetens. Genom att systemet hanterar den datatunga analysen kan operatören fokusera på strategiska beslut, vilket skapar en symbios mellan datadriven precision och mänsklig erfarenhet.

5.2 Systemets Värdeskapande Potential

Genom att skifta driften från reaktiv till proaktiv skapas värden som sträcker sig utanför den rena värmeproduktionen:

Ekonomisk Optimering och Arbitrage: Systemets förmåga till sektorkoppling möjliggör realtidsarbitrage mot elmarknaden. Genom att optimera driften mot elspotpriser kan anläggningen växla mellan kraftvärmeproduktion och elpannor, vilket minimerar spetslastkostnader och utsläppsavgifter (NO_x, EU ETS).

Operativ Kontinuitet: Systemet bidrar till att "tyst kunskap" formaliseras. Detta demokratiserar driften och säkerställer en hög och jämn optimeringsgrad oavsett personalsammansättning eller erfarenhetsnivå.

Logistik och Underhåll: "Just-in-Time"-leveranser av bränsle och optimerade bränslemixar (t.ex. RT-flis vs. skogsflis) minskar bundet kapital. Dessutom möjliggör prognosen att underhåll kan schemaläggas till perioder med låg belastning, vilket förlänger komponenternas livslängd.

5.3 Projektets Koppling till Utbildningen

Arbetet utgör en syntes av Energiingenjörsprogrammet kurser:

Energisystem och Ledning: Praktisk tillämpning av energianalys för att identifiera förbättringsområden i komplexa nät.

Energiproduktion: Användning av energiberäkningar för att utvärdera och höja prestandan hos verkliga anläggningar.

Driftoptimering: En fallstudie i hur matematiska modeller och AI används för att sänka specifika energibehov.

Marknad och Politik: Direkt koppling till elhandel, miljöavgifter och lagstiftningskrav (t.ex. NIS2) som styr dagens energimarknad.

5.4 Metodkritik och Kritiskt Perspektiv

En kritisk reflektion visar att min branscherfarenhet var både en styrka och en svaghet. Den tekniska djupdykningen i pannors verkningsgradskurvor och anläggningars komplexitet bidrog till hög precision, men riskerade stundtals att hämma utvecklingstempot.

Den initiala tidsplanen underskattade komplexiteten i att integrera verkliga, variabler i en AI-modell. En lärdom för framtida projekt är att tidigare i processen avgränsa de tekniska detaljerna för att säkra framdriften i systemets övergripande logik.

6. Slutsats och Framtida Arbete

Detta avslutande kapitel summerar projektets prestationer genom att besvara de inledande frågeställningarna. Vidare presenteras en konkret färdplan för hur prototypen kan vidareutvecklas till en kommersiellt gångbar produkt.

6.1 Slutsatser

Utifrån projektets genomförande, resultat och analys dras följande slutsatser som svar på arbetets frågeställningar:

1. **Hur kan historiska driftdata användas för att skapa en lastprognos?** Genom att korrelera historiska data för effektuttag, utomhustemperatur och tid (säsongsvariationer) kan maskininlärningsmodeller identifiera de termiska trögheterna i ett specifikt fjärrvärmenät. Projektet visar att när denna tränade modell matas med realtidsdata från väderprognoser, genereras en prediktiv lastprognos som möjliggör en proaktiv produktionsplanering.
2. **Hur väl överensstämmer modellens prognos med verkligt utfall?** Modellen uppvisar en hög precision och god överensstämmelse med verkliga utfall. Den centrala lärdomen är dock att modellens tillförlitlighet är direkt korrelerad till indatans kvalitet. Systematiska mätfel i lokala givare påverkar exaktheten negativt, vilket understryker behovet av datarensning och kalibrering som en integrerad del av systemlogiken.
3. **Hur kan ett sådant system användas som stöd för driftpersonal?** Systemet fungerar som ett objektiva beslutsstöd som omvandlar komplexa datamängder till visuella produktionsförslag. Genom att demokratisera tillgången till kvalificerade prognoser minskas personberoendet, vilket ger driftpersonalen trygghet att fatta optimerade beslut även under ansträngda driftsituationer.

Sammanfattningsvis bekräftar examensarbetet att AI-teknik inte bara är en teoretisk möjlighet utan ett praktiskt verktyg som kan skapa omedelbart värde för produktionsplaneringen inom fjärrvärmesektorn.

6.2 Förslag till vidare utveckling

För att transformera prototypen till en robust, kommersiell produkt föreslås följande färdplan:

- **Teknisk förfining och kalibrering:** Utveckla den föreslagna kalibreringsmodulen som retroaktivt korrigerar för lokala temperaturavvikelser genom jämförelse med historiska referensdata.

- **Fullständig kraftvärmeoptimering:** Utöka modellen till att simultant planera för både el- och värmeproduktion. Detta inkluderar integration av realtidsdata från elmarknaden (spotpriser) för att maximera anläggningens totala lönsamhet.
- **Logistik och bränslehantering:** Implementera moduler för "Just-in-Time"-leveranser och bränslemix-optimering baserat på lagerstatus och bränslepriser.
- **Marknadsexpansion (Stödtjänster):** Utforska integration mot Svenska kraftnäts marknader för frekvensreglering (t.ex. FCR), vilket skulle möjliggöra för anläggningen att agera som en aktiv resurs i det nationella elnätet.
- **Validering och skalbarhet:** Genomföra tester mot mer diversifierade energisystem för att säkerställa att modellens algoritmer är generaliserbara och redo för en bredare marknadslansering.
- **Säkerhet och regelefterlevnad (NIS2):** Utforska övergången från molnbaserade modeller till lokalt körda AI-modeller (On-premise). Genom att flytta beräkningslogiken från externa tjänster som Gemini till en lokal infrastruktur kan anläggningen säkerställa full kontroll över sina driftdata. Detta är ett kritiskt steg för att möta kraven i NIS2-direktivet gällande informationssäkerhet och skydd av nationellt viktig infrastruktur.