

Optimering af signalstyring i realtid

Intelligent styring af signalregulerede kryds ved anvendelse af maskinlæring og objektdelektering

Hansen, Mikkel Færgemand; Eriksen, Andreas Berre; Taankvist, Jakob Haahr; Larsen, Kim Guldstrand; Lahrmann, Harry

Published in:

Danish Journal of Transportation Research - Dansk tidsskrift for transportforskning

Publication date:
2017

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Hansen, M. F., Eriksen, A. B., Taankvist, J. H., Larsen, K. G., & Lahrmann, H. (2017). Optimering af signalstyring i realtid: Intelligent styring af signalregulerede kryds ved anvendelse af maskinlæring og objektdelektering. *Danish Journal of Transportation Research - Dansk tidsskrift for transportforskning*, 2017. http://www.trafikdage.dk/td/papers/papers17/478_MikkelFaergemand_fagfaellebedoemt.pdf

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift
Udvalgte artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet
(Selected Proceedings from the Annual Transport
Conference at Aalborg University)

ISSN 1903-1092

www.trafikdage.dk/artikelarkiv

Modtaget: 02.10.2017

Godkendt: 02.01.2019

Optimering af signalstyring i realtid

**Intelligent styring af signalregulerede kryds ved anvendelse af maskinlæring og objektdekte-
ring**

Mikkel Færgemand, MIFM@cowi.com, COWI

Andreas Berre Eriksen, andreasb@cs.aau.dk, Institut for Datalogi, Aalborg Universitet

Jakob Haahr Taankvist, jht@cs.aau.dk, Institut for Datalogi, Aalborg Universitet

Kim Guldstrand Larsen, kgl@cs.aau.dk, Institut for Datalogi, Aalborg Universitet

Harry Lahrmann, hsl@civil.aau.dk, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet

Abstrakt

Artiklen præsenterer nye principper for styring af signalregulerede kryds. Ved anvendelse af maskinlæring og objektdekte-
ring som erstatning for punktdetektering og samordning er udviklet en kontroller til signal-
regulerede kryds, der ved mikrosimulering i VISSIM viser mellem 30% og 50%'s reduktion i middelforsinkel-
ser, kølængder og antal stop i 4 samordnede kryds på Hobrovej i Aalborg. Brændstofforbruget og samlet
rejsetid på den samordnede strækning er i simuleringstudiet reduceret med omkring 20%.

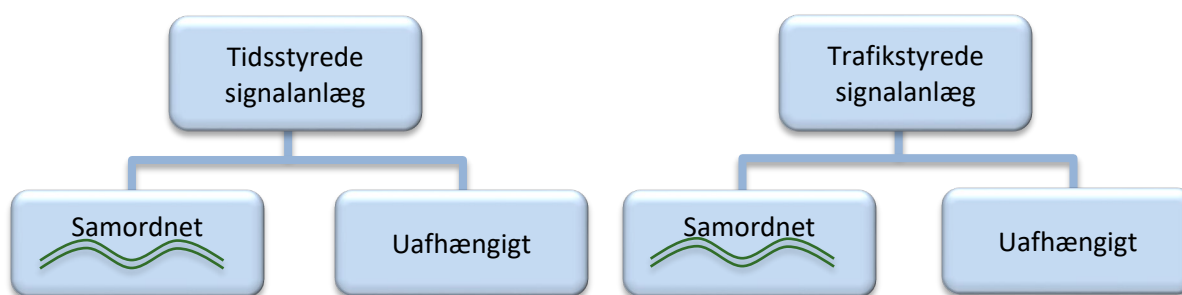
Introduktion

I de senere år har der været et øget fokus på den stigende trængsel på vejene. I den forbindelse anslår Vej-
direktoratet, at den samfundsøkonomiske omkostning ved trængsel beløber sig til omkring 14 mia. kr. årligt
alene i Danmarks omkring 2.800 signalregulerede kryds. [Konsekvenser for trafikanter og samfund – Bedre
trafiksignaler] De signalregulerede kryds er grundlaget for at opretholde en acceptabel trafikafvikling samt
høj trafikikkerhed og uden signalregulering vil der opstå trafikale sammenbrud til følge. Signalanlæggenes
funktion er således at opretholde en tilfredsstillende trafikafvikling ved skiftevis at prioritere konfliktende
trafikstrømme. [Lauritzen, 1994]

Signalanlæggenes tilstedeværelse medfører dog også en række gener både for trafikanterne og samfundet.
Dette er eksempelvis udgifter til drift og vedligehold, flere stop, øget forsinkelse og brændstofforbrug samt
øget luftforurening. I perioder, hvor trafikintensiteten er relativt lav, kan signalanlægget i særlig grad hindre
en effektiv trafikafvikling. Generne af signalanlæggenes tilstedeværelse afhænger dog i høj grad af styrefor-
men i det enkelte signalanlæg. [Lauritzen, 1994]

Signalanlæg og styreformer

Overordnet betragtes et signalanlæg som værende tids- eller trafikstyret, hvilket fremgår af Figur 1. I Dan-
mark vurderes flere hundrede signalanlæg at fungere uafhængigt tidsstyret mens over 1.000 signalanlæg er
samordnet hvad enten det er tids- eller trafikstyret. Særligt i disse kryds vurderes optimeringsmulighederne
at være til stede. [Konsekvenser for trafikanter og samfund – Bedre trafiksignaler]



Figur 1: De overordnede styreformer i signalanlæg, som er tids- eller trafikstyret. Derudover er det enkelte signalanlæg samordnet eller fungerer uafhængigt.

Foruden en traditionel samordning af signalanlæg findes der også en mere avanceret form for samordning kaldet adaptiv signalstyring. Adaptiv signalstyring defineres typisk som et styresystem, hvor flere samordnede signalanlæg automatisk og kontinuerligt tilpasses den aktuelle trafikale situation, hvilket ikke er tilfældet i en traditionel samordning. Med den adaptive signalstyring introduceres således en mere kompleks form for samordning, som har til formål at optimere trafikafviklingen og derved tilvejebringe en bedre fremkommelighed. [Gautier, 2001]. Adaptive signalstyringssystemer er blevet karakteriseret som 3.-generations systemer, hvor der dog stadig er plads til en række effektiviseringer gennem bedre udnyttelse af sensor-data fx fra radar eller videokameraer til bedre estimering af aktuel og fremtidig trafik. [Goel, S. Bush, SF & Gershenson C, 2017] forudser således selv-organiserende systemer, som en ny fjerde generations signalstyringssystem.

Den adaptive signalstyring er i dag etableret mange steder globalt. I hovedparten af tilfældene kan det påvises, at den adaptive signalstyring har haft en positiv effekt på fremkommeligheden, hvor rejsetiden er forbedret med op til 30 % sammenholdt med før-situationen. Effekten har dog i også nogle tilfælde vist sig at være varierende og uden en statistisk signifikant effekt. Dette kan eksempelvis skyldes, at kapaciteten blot omfordes på en strækning med kryds, så den gennemkørende trafik opnår en bedre fremkommelighed, mens trafikken på sidevejene vil opleve en forringet fremkommelighed. I andre tilfælde har rejsetiden vist sig at være faldende for den kollektive trafik, mens rejsetiden for den øvrige trafik har været stigende, hvorved der ikke er tale om en samlet optimering af trafikafviklingen. [Agerholm, 2011; Krøyer, 2008]

Den adaptive signalstyring kan etableres decentralt, hvor det enkelte anlæg styres lokalt og kommunikerer med omkringliggende kryds. Andre systemer er centraliseret, hvor ét centralt styreapparat har det fulde overblik af den trafikale situation og kan agere på baggrund af den samlede trafik på strækningen. Uafhængigt af om systemet er centraliseret eller decentraliseret, vil der typisk i større eller mindre grad være nogle bindinger. Eksempelvis minimum- og maksimumgrønt eller skjult synkronisering, så der opretholdes en fast offset-tid mellem de respektive kryds. Derudover udnytter nogle systemer også historiske data, hvilket kan være fordelagtigt i eksempelvis erhvervs- eller industriområder med vagtskifte og faste arbejdstider eller hvis detektorer svigter. Systemer, som i dag anvender realtidsdata, evner typisk ikke at afvikle trafikken optimalt, da systemerne kun gradvist tilpasser sig variationer i ankomstintensiteten, hvorved tilpasningen til ændringer i trafikken kommer for sent. Med de traditionelle adaptive signalsystemer er fulgt en udbredt opfattelse af, at behovet for trafikteknisk opfølgning er forsvindende som konsekvens af systemets automatiske tilpasning. Dette er dog en misforståelse, da systemet kan have behov for løbende kalibrering eller manuel justering af de fastsatte bindinger mellem de respektive kryds. Derfor er der i nogle tilfælde behov for øget trafikteknisk opfølgning efter det adaptive signalsystem er etableret. [Kronborg & Davidsen, 2004]

Der findes i dag en lang række forskellige adaptive signalstyringssystemer, som anvendes i forskellige dele af verden. De første systemer blev udviklet i slutningen af 1970'erne og er siden blevet videreudviklet, og

nye systemer er kommet til. Der gives i det følgende en kort beskrivelse af fire internationalt udbredte systemer [Kronborg & Davidsson, 2004]. Systemerne er:

- SCOOT
- SCATS
- SPOT
- MOTION

De to førstnævnte er de mest udbredte og udgør tilsammen omkring 80 % af de adaptive signalstyringssystemer på verdensplan. Fælles for de førnævnte systemer er, at de baserer sig på, at trafikken detekteres af spoler, og i nogle tilfælde indgår også historiske data i styringen. Afhængigt af hvilket system og hvilken parameter, der er tale om, tager effektueringen af ændringer i program, omløbs- eller offsettid typisk ét eller flere minutter og i nogle tilfælde helt op til 10 minutter. Derudover realiseres nogle ændringer sekventielt for at undgå store ændringer over kort tid. [Kronborg & Davidsson, 2004; Lauritzen, 1994].

I forhold til hidtil anvendte metoder udvikler og evaluerer vi i denne artikel en fjerde generations metode til optimering af signalstyring, hvor optimal signalstyring for et givet trafikkræds til stadighed beregnes og genberegnes op til en given tidshorisont baseret på en estimering af den aktuelle trafik for krydset og ved brug af maskinlæring (reinforcement learning). Detektering af trafikken kan foretages af forskellige detekteringsteknologier (se næste afsnit), og vor metodes anvendelighed er uafhængig af hvilken form for detektering, der anvendes, men resultatet af den beregnede signalstyring afhænger selvfølgelig af kvaliteten af anvendte detektering. Vor optimeringsmetode gør det muligt at optimere med hensyn til én eller flere valgte optimeringskriterier fx minimering af ventetid, CO₂-udledning, kølængde og antal stop og underlagt et vilkårligt antal randbetingelser fx max røddid, minimum grøntid, prioritering af kollektiv trafik eller prioritering af cykeltrafik.

Detekteringsteknologier

Detektering kan foretages via mange forskellige detekteringsformer. Gennem de senere år er flere nye detekteringsteknologier vundet frem og indgår i større og større grad som detektorer i trafikken.

Siden starten af 1960'erne, hvor induktionsspølsens udbredelse som trafikdetektering fandt sted, har denne detekteringsteknologi været den mest anvendte til registrering af trafik på såvel strækninger som i kryds. Induktionsspølen fræses ned i selve vejen (Figur 2), og kan derfra indsamle data om trafikken, herunder antal, hastighed samt klassificering. [Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I]. Selvom induktionsspølen har en forholdsvis høj **præcision** og har været den mest anvendte detekteringsform, er der også ulemper forbundet hermed. At induktionsspølen er beliggende i vejen er uensigtsmæssigt, både i forhold til etablering og drift. Beliggenheden bevirker, at der jævnligt konstateres fejlbehæftede eller defekte induktionsspøler, hvilket kan skyldes sporkøring, udlægning af nyt slidlag eller gravearbejder. I Danmark vurderes det, at der er detektorfejl i 15 - 20 % af alle trafikstyrede signalanlæg i Danmark. [Konsekvenser for trafikanter og samfund – Bedre trafiksignaler].



Figur 2: Traditionel induktionsspøle, som er nedfræsset umiddelbart før stopstregen i et signalreguleret kryds.

Som alternativ til de traditionelle induktionsspoler har videodetektering været anvendt siden detekteringsteknologien blev opfundet i midten af 1970'erne. Videokameraet og tilhørende udstyr analyserer billede for billede og kan således, via ændringer i pixels, detektere trafikanter i hele kameraets synsfelt. Dertil er udstyret placeret over kørebanen i mast eller portal (Figur 3), hvor registrering af en tilfart kun kræver ét kamera. Der er dog flere grunde til, at videodetektering ikke er blevet udbredt i samme grad som induktionsspolerne. Billedanalysen vanskeliggøres ved kraftig regn eller sne og i forbindelse med tåge og lyn. Derudover kan solskin skabe skygger fra såvel køretøjer som bygninger og beplantning. Også blændende lygter fra køretøjer i mørke er et problem. I nogle tilfælde kombineres anvendelsen af videokameraer med termiske kameraer for at mindske gener fra dårlige lys- og vejrforhold. [Kastrinaki et al., 2003; Madsen et al., 2016; Xu et al., 2009]



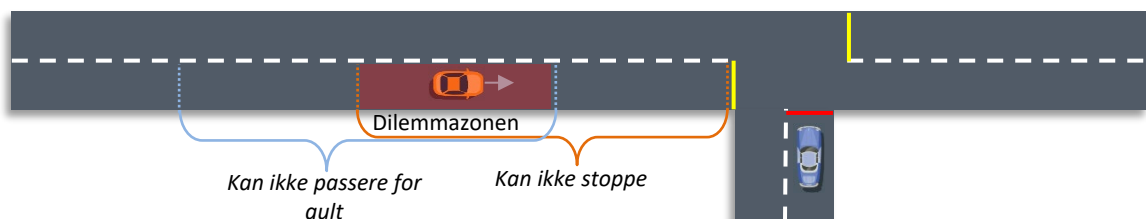
Figur 3: Videokamera (placeret i portal) som alternativ detekteringsform i stedet for induktionsspoler.

En anden detekteringsteknologi, som er blevet mere udbredt, er radardetektering [Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I]. Ved anvendelse af radarteknologien til detektering af trafikanter sker denne via refleksion af de udsendte radiobølger, hvorved en ændring i frekvens registreres. Derved detekteres samtlige trafikanter i radarens dækningsområde. I de første generationer har der dog været udfordringer med at detektere trafikanter, som ikke er i bevægelse. Denne udfordring er forsøgt afhjulpet i senere generationer, hvor den sidste position lagres via software, hvilket bevirker, at køretøjer som holder for rødt stadig detekteres. Teknologien har i lighed med videodetektering den fordel, at der ikke skal foretages gravearbejde, da radaren kan placeres på samme mast som signallanterne (Figur 4). Til forskel fra videodetektering er radaren langt mindre følsom overfor ugunstige lys- og vejrforhold. [Knudsen & Jacobsen, 2013]



Figur 4: Radar (placeret i eksisterende signalmast) til detektering af trafikanter i et signalreguleret kryds.

Med radarteknologien introduceres den såkaldte ETA-funktion, som kontinuert estimerer trafikanter ankomsttid til stopstregen på baggrund af hastighed og position. Denne funktion kan medvirke til at reducere antallet af trafikanter i den såkaldte dilemmazone, hvor en bilist ved skift til gult hverken kan nå at stoppe eller passere for gult, hvormed der sker ubevidst rødkørsel, se Figur 5.



Figur 5: Principskitse, som illustrerer dilemmazonen, hvor en bilist hverken kan nå at stoppe eller passere for grønt, hvilket resulterer i ubevidst rødkørsel. Disse situationer kan medføre bagendekollisioner ved hårde opbremsninger eller kollisioner med trafikken fra sidevejen ved rødkørsel.

Introduktionen af ETA-funktionen giver mulighed for mere præcise grøntidsforlængelser eller afslutning af grønt, så trafikafviklingen i krydset foregår mere trafiksikkert. Beregningen sker kontinuert på baggrund af trafikanternes hastighed. Foruden den trafiksikkerhedsmæssige effekt forventes denne funktion også at forbedre fremkommeligheden, da grøntidsforlængelsen præcist tilsvarende behovet. Det anslås dog, at der er et uudnyttet potentiale, da der ved anvendelse af radartechnologien i mange tilfælde emuleres virtuelle induktionsspoler, hvilket bevirker, at den øvrige trafikdata fra raderen ikke anvendes til styring af selve signalanlægget. [Jakobsen, 2015; Kildebogaard, 2015; Traffic Rader|Intersection Management]

Uanset hvilken af dagens styreform, der anvendes, bygger de på en række traditionelle signalstyringsprincipper. Typiske indgående elementer er forudbestemt faseskift (som i nogle tilfælde påkræver anmeldelse), faste offset-tider mellem samordnede kryds, faste maksimale omløbstider samt variable grøntider, der sikrer, at den enkelte grøntid svarer til den aktuelle trafikale efterspørgsel. I den forbindelse arbejdes der blandt andet med begreberne minimum- og maksimumgrønt samt forskellige former for grøntidsforlængelse. For minimumgrønt er der bindende bestemmelser i §226 i "Bekendtgørelse om anvendelse af vejafmærkning". Minimumtiden er 4 sekunder for pilsignaler og 6 sekunder for øvrige strømme, [BEK nr. 1194 af 21/09/2016]. For maksimumgrønt er der ikke bindende bestemmelser. I diverse håndbøger og vejledninger er det dog normal procedure at fastlægge en fast maksimal grøntid, således at en given signalfase afsluttes uafhængigt af den aktuelle trafiksituation. [Lauritzen, 1994; Håndbog – Signalregulerede vejkryds i åbent land, 2012 ; Håndbog – Vejsignaler, 2013]

I trafikstyrede signalanlæg er grøntidsfordeling og –forlængelser dynamiske og afhænger af den aktuelle trafik. Der er dog nogle statiske parametre, som bevirker, at et trafikstyret signalanlæg kun i nogen grad responderer på den aktuelle trafiksituation. Dette er eksempelvis minimum- og maksimumgrøntider. Netop disse parametre betragter Shiri & Maleki [2016] som primitive og hindrende for en optimal trafikafvikling. Derfor introducerer de en dynamisk maksimal grøntid, hvorved den maksimale grøntid kan variere mellem de respektive omløb og deres resultater viser, at trafikafviklingen forbedres.

I Danmark arbejdes der også med nye metoder til optimering signalregulerede kryds. Således har Rambøll i samarbejde med Aarhus Kommune påbegyndt et projekt, hvor man ikke har faste omløbs- og grøntider og prædefinerede faseskift. I stedet introduceres vægte for krydsets respektive tilfarter baseret fx på antal køretøjer holdende ved stoplinje, ventetid ved stoplinjen, antal køretøjer i tilfarten ud til en defineret afstand fra stoplinjen, afstand mellem køretøjer (GAP), Køretøjstype (person-/varebil, lastbil) og estimeret ankomsttid til stoplinjen (ETA). Disse vægte bestemmer grøntiden, omløbstiden og fasevalg. De foreløbige simuleringsresultater viser, at den overordnede fremkommelighed forbedres, hvilket dækker over forbedret rejsetid, færre stop samt en samlet reduktion af kølængderne. [Sode-Carlsen, 2016]

Problemformulering

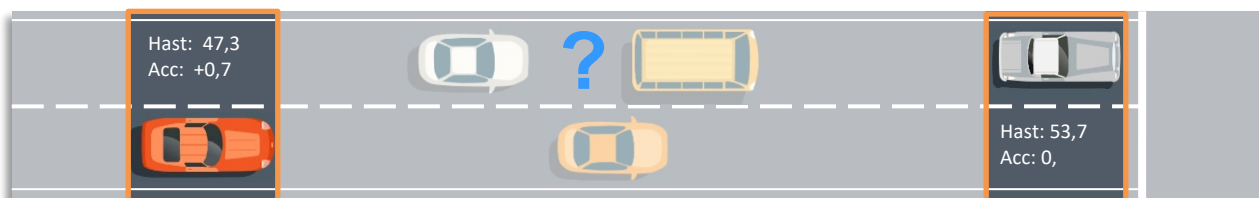
Foruden det kendte optimeringspotentiale, som er dokumenteret af Vejdirektoratet, er hypotesen, at der eksisterer et hidtil ukendt optimeringspotentiale. Vurderingen udspringer primært af to forhold:

- I dagens signalanlæg anvendes i alt overvejende grad punktdetektering.
- De anvendte styringsprincipper er baseret på statiske værdier valgt ved projektering af signalet

Den altovervejende detekteringsform er punktdetektering via induktionsspoler eller veldefinerede detekteringsområder ved anvendelse af radarer. Simple punktdetektering giver information i de respektive punkter, men ikke informationer fra køretøjet når det befinder sig imellem disse punktdetektering, som det er illustreret på Figur 6. Dette kunne være informationen hastighed, acceleration, deceleration eller hvorvidt det givne køretøj gør fuldt stop eller drejer fra, hvis sådanne muligheder eksisterer. Såfremt denne information blev indsamlet, videregivet og anvendt i signalstyringen, er der en forventning om, at dette vil medvirke til en bedre trafikafvikling.

Derudover kan afviklingen sandsynligvis også forbedres, hvis der accepteres en mere fleksibel styring af signalet, fx ved ikke at have forudbestemte faseskift, faste maksimale grøntider afledt af faste omløbstider samt faste offset-tider mellem samordnede signalregulerede kryds.

Målet med dette projekt er at vise, at anvendes radartechnologiens potentialer fuld ud sammen med nye optimeringsprincipper baseret på maskinlæring, vil der kunne hentes et hidtil ukendt optimeringspotentiale i de signalregulerede kryds.



Figur 6: Traditionelle signalanlæg, som anvender punktdetekteringer i varierende afstand fra stopstrengen, modtager ikke information fra køretøjer på den øvrige del af strækningen frem mod krydset.

Metode

Projektlokalitet

I projektet tages der udgangspunkt i en strækning på Hobrovej i Aalborg med seks signalregulerede kryds, se Figur 7. Strækningen er en betydelig indfaldsvej til Aalborg og har en ÅDT på 20.000-30.000 køretøjer [Mastra, 2017]. Derudover indgår 3 af signalanlæggene i en samordning med delvis trafikstyring. Selve optimeringen undersøges udelukkende i de midterste fire signalregulerede kryds, mens det nord- og sydligste kryds blot anvendes til at modellere trafikken korrekt.

Trafikmodellering

I projektet anvendes mikrosimuleringsprogrammet VISSIM [PTV VISSIM, 2017]. Dette program giver mulighed for at modellere og dermed sammenligne trafikafviklingen med den nuværende kontroller og den i projektet udviklede kontroller. I VISSIM måles i de to situationer på forsinkelse, kølængder, antal stop og brændstofforbrug.

Dataindsamling og -behandling

Som input til VISSIM er der anvendt krydstællinger fra samtlige 6 signalregulerede kryds i morgenmyldretiden fra kl. 7:00 til kl. 9:00. Krydstællingerne er foretaget i kvartersintervaller, og køretøjerne er opdelt i:

- Person- og varebiler
- Lastbiler/busser
- Lastbiler med påhæng/sættevogn
- Motorcykler

De bløde trafikanter i form af fodgængere og cyklister indgår ikke i projektet.



Figur 7: De 6 signalregulerede kryds på Hobrovej samt den indbyrdes afstand.

Ny kontroller til styring af signalanlæg

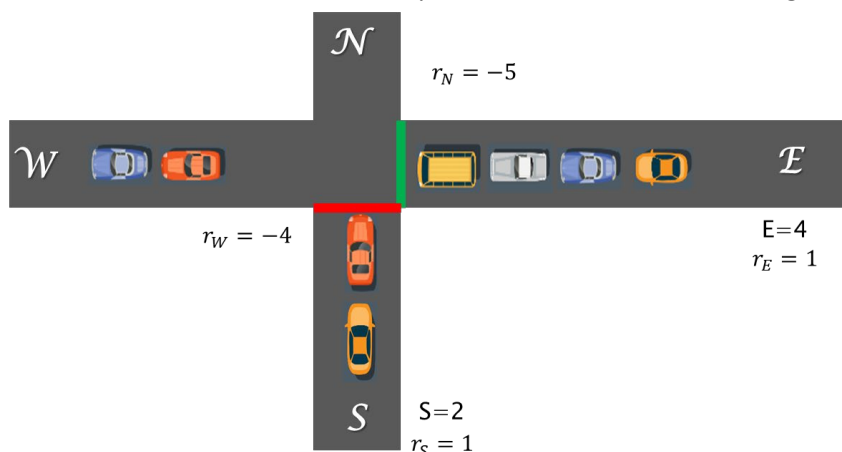
Vi har i projektet udviklet en kontroller, der optimerer signalsætningen baseret på maskinlæring, og hvor input er kontinuerte informationer om alle objekter inden for en vis afstand, der er på vej mod det signalregulerede kryds. Vi har anvendt softwaren Uppaal stratego [David A et al, 2015] som optimeringssoftware i kontrolleren og mikrosimuleringsprogrammet VISSIM til at demonstrere, hvordan kontrolleren virker. Uppaal Stratego benyttes til at beregne en optimal signalstyring i forhold til ét optimeringskriterie. I kontrollerens model minimeres den samlede forsinkelse i hvert af de fire kryds på Hobrovej.

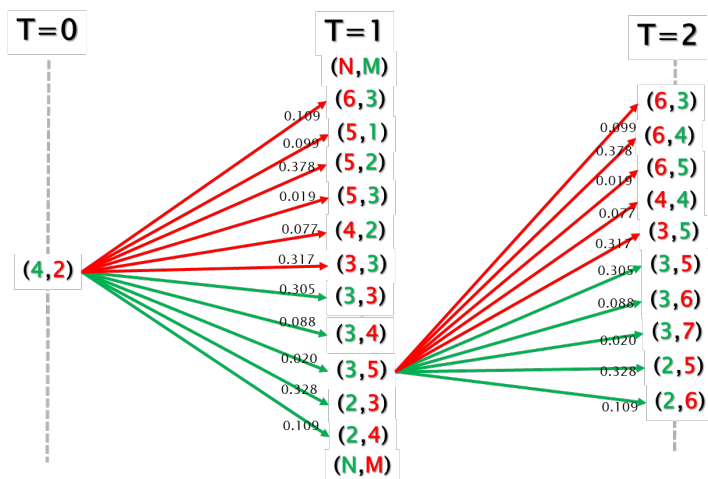
VISSIM benyttes til at evaluere effekten af den nye kontroller. Data svarende til radardata trækkes ud af VISSIM til et stykke Python-software vha. VISSIM's COM-interfacet. Denne software opdeler så data således, at Uppaal Stratego kun får data fra ét kryds ad gangen, Uppaal Stratego kører derefter fire gange (én gang for hvert kryds) med de data, som hører til det pågældende kryds. For hvert kryds sendes ETA (Estimated Time of Arrival) til krydset for alle køretøjer, som er max 200 meter fra krydset. Også den nuværende signalsætning sendes til krydset. Uppaal Stratego anvender så disse data til at generere en nær optimal signalstyring for det pågældende kryds. Den nær optimale signalstyring sendes tilbage til VISSIM via Python softwaren, hvor VISSIM slutteligt effektuerer signalstyringen.

Signalstyringen foregår lokalt i hvert kryds, der er altså ingen kommunikation eller samordning mellem krydsene. Uppaal Stratego kan benytte flere parametre i optimeringen, eksempelvis kølængde, antal stop, forsinkelse, køretøjstype og brændstofforbrug, og disse kan vægtes i forhold til hinanden så kødannelsen eksempelvis vægtes højere end forsinkelsen, men den udviklede kontroller optimerer alene på at minimere den samlede forsinkelse. Det tilstræbes altså at bestemme den optimale signalsætning med henblik på at minimere den samlede forsinkelse i det enkelte signalregulerede kryds.

Stratego kontrolleren

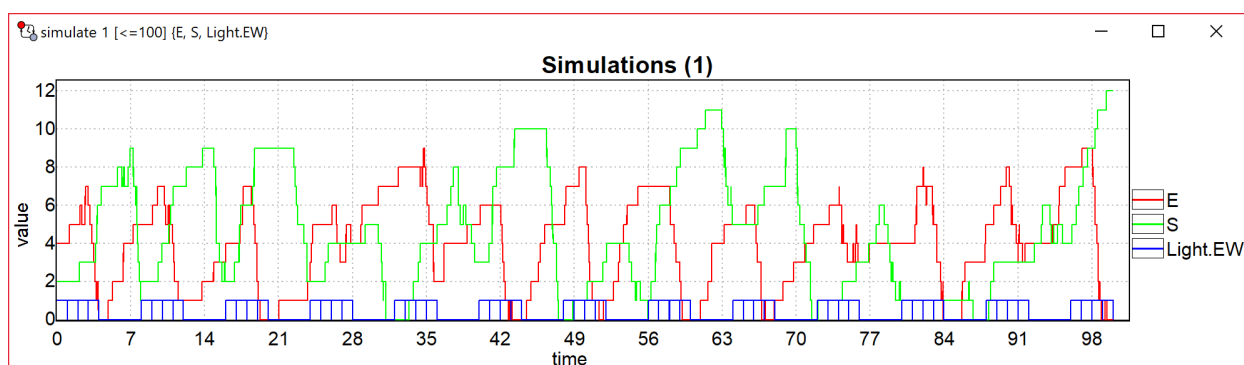
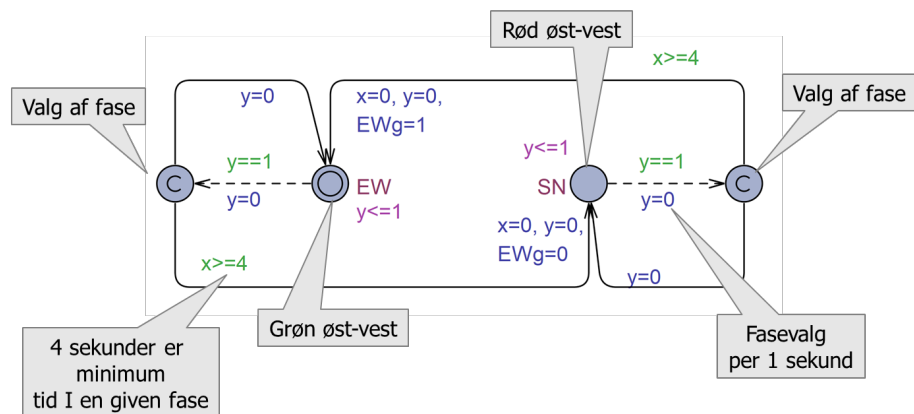
Den optimale signalsætning bestemmes løbende af det generiske optimeringsværktøj UPPAAL Stratego: hvert sekund opstilles en ny abstrakt model, der ud fra emuleret radardata beskriver den øjeblikkelige trafiksituation i krydset – såsom information om antal aktuelt holdende biler, information om forventet ankomst af biler i den næste tidsperiode til de forskellige vejbaner i krydset. Stort set alle forhold om øjeblikssituationen og den aktuelle dynamik kan modelleres i værktøjet. Som et eksempel på modellering og optimering ved brug af UPPAAL Stratego betragter vi et simple vejekryds med to ensrettede veje: en vej ensrettet fra øst mod vest og en krydsvej ensrettet fra syd mod nord. I den øjeblikkelige situation er der 4 biler i kø fra øst og 2 biler i kø fra syd. Ud fra observation af trafikken i en tidsperiode estimeres det, at der i gennemsnit kommer 1 bil til hver kø per sekund. Dette modelleres ved brug af to uafhængige, eksponentielt fordelte stokastiske variable, begge med raten 1 ($r_E = r_S = 1$). Som det kan ses er der i den øjeblikkelige situation grønt i retningen øst-vest og køen afvikles med raten $r_W = -4$. Når fasen skifter til grønt i syd-nord retningen antager vi at syd-køen afvikles med raten $r_N = -5$.



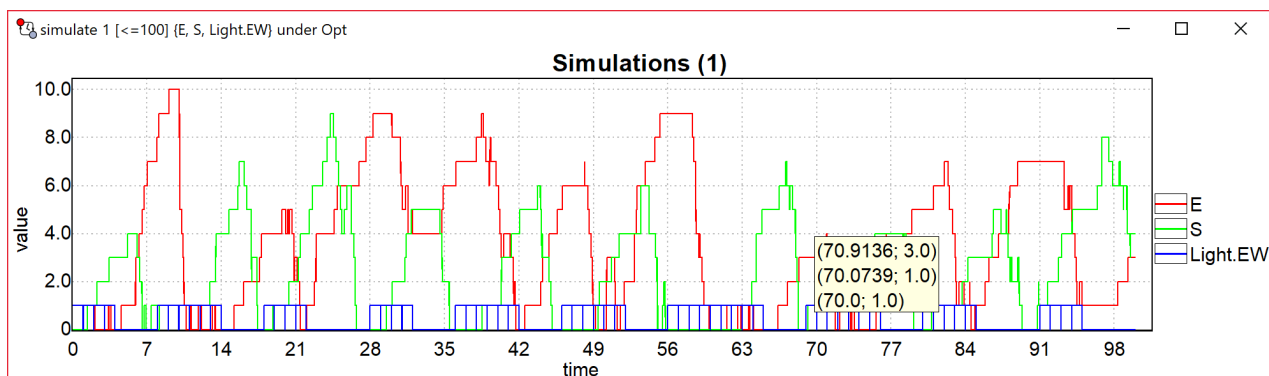


Hvis vi antager, at der kan skiftes fase hvert sekund, er den underliggende matematiske model en Markov beslutningsproces (Markov Decision Process, MDP [Puterman, 2005]), som illustreret i figuren til venstre. Givet en aktuel konfiguration til tidspunkt $T = i$, vil der – for grønt henholdsvis rødt i retningen øst-vest – være en sandsynlighedsfordeling over lyskrydets konfiguration til tidspunkt $T = i + 1$. En kontrol strategi er simpelthen en politik for valg af fasen baseret på den givne konfiguration. Opgaven består nu i at bestemme den kontrol strategi, der optimerer et givet optimeringskriterier

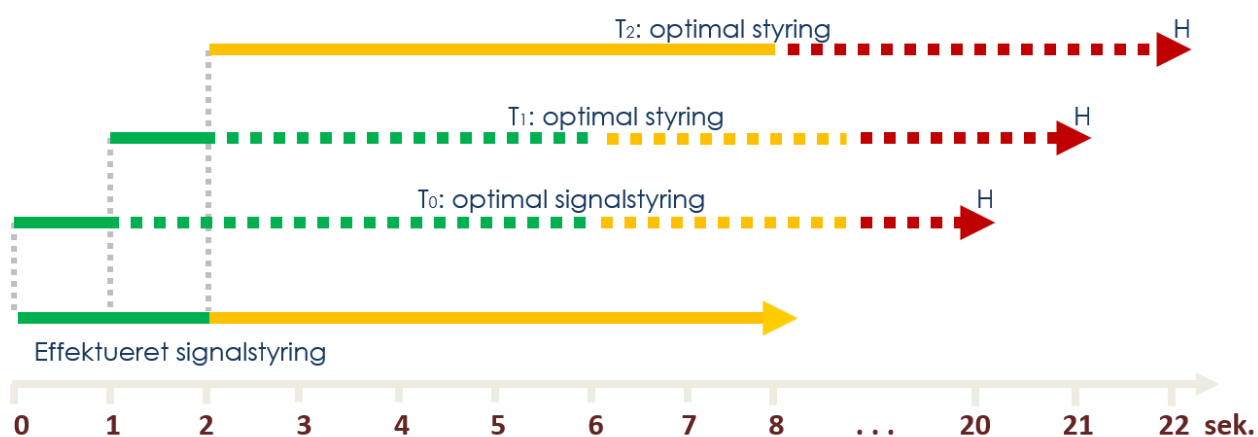
(f.eks. den akkumulerede kø længde). I princippet kan en sådan optimal strategi for en MDP løses eksakt gennem formulering som et lineært programmeringsproblem. Givet problemets størrelse (og hastige vækst i den ønskede tidshorisont) anvender vi dog Reinforcement Learning eller Q-Learning [Russel & Norvig, 2010], der foretager iterative simulering af MDP-modellen med henblik på at "lære" den optimale kontrol strategi. For at garantere minimale grøn-tider modelleres fase-valget i UPPAAL Stratego ved brug af en tilstandsmaskine udvidet med tidsmæssige krav (en såkaldt tidsautomat [Alur & Dill, 1994]) udtrykt gennem begrænsninger på lokale ure. I tilstandsmaskinen ovenfor er x et lokalt ur, der nulstilles ved hvert fase-skift. De to test $x \geq 4$ sikrer, at der kun kan skiftes fase efter (i dette tilfælde) minimum 4 sekunder. Erstattes denne test med kravet $x = 4$, beskrives en tidsstyret kontrol, hvor fasen skiftes præcist hvert 4de sekund.



I figuren til herover ses en simulering i UPPAAL Stratego af en tidsstyret kontrol over 100 sekunder. I figuren ses de to kølængder som funktioner af tiden, og den blå kurve angiver (som 0 eller 1) fasen. Som det ses skiftes fasen præcist hver 4de sekund. En estimering af den akkumulerede totale kølængde over 100 sekunder er 1411 ± 42.38 . Til sammenligning vises i figuren på næste side en simulering af en "trænet" optimal kontrol strategi. Som det ses, er faseskiftet ikke tidsstyret, men snarere styret af de tidspunkter, hvor en given kø er tømt. En estimering af den akkumulerede totale kø længde over 100 sekunder er 829 ± 14.57 altså en reduktion på hele 41%.



I det foregående er den optimale signalstrategi beregnet ("lært") af UPPAAL Stratego baseret på (en model af) et øjebliksbillede og har kun den aktuelle information om køretøjer op til 200 meter fra krydset. Den trafikale situation kan naturligvis ændre sig betydeligt inden for en given tidshorisont (f.eks. 20 eller 100 sekunder). Dette kan skyldes, at flere køretøjer end forventet i forhold til de antagne ankomstfordelinger er kommet til krydset, eller at køretøjer er drejet fra før det signalregulerede kryds eller har foretaget et fuldt stop. Dette kan bevirke, at den effektuerede signalstrategi i sidste ende viser sig at være ikke-optimal. Derfor introduceres en rullende horisont i forbindelse med signalstyringen. Den rullende horisont giver mulighed for løbende at tilpasse modellen og hermed signalsætningen til den aktuelle trafikale situation, se Figur 8. Derved ændres beslutningen om signalkift hvert sekund. Dette betyder, at signalsætningen i langt de fleste tilfælde vil være den optimale med henblik på at minimere den samlede forsinkelse.



Figur 8: I tiden nul bestemmes en optimal signalsætning i de næste 20 sekunder. Af denne effektueres eksempelvis det første sekund, som i dette tilfælde er en grøntidsforlængelse. Efter det første sekund beregnes en ny signalsætning, hvor det første sekund ligeledes effektueres i form af yderligere et sekunds grøntid. Den optimale signalsætning efter 2 sekunder viser, modsat de to foregående signalsætninger, at det nu vil være optimalt at foretage et faseskift, hvormed seks sekunders mellemtid effektueres. Den rullende horisont giver derved mulighed for at tilpasse signalsætningen i forhold til den trafikale situation.

Resultater

Effekten af den nye kontroller dokumenteres ved at sammenholde simuleringsresultaterne fra den eksisterende signalstyring med simuleringsresultaterne fra den nye kontroller. I evalueringen måles middelforsinkelse, kølængde, brændstofforbrug samt antal stop foretaget i de enkelte kryds. Derudover er den samlede rejsetid på Hobrovej også målt. Detaljeret data for de enkelte trafikstrømme præsenteres for krydsene Søndre Skovvej/Hobrovej og Ny Kærvej/Hobrovej, derudover præsenteres grøntidsfordelingen for krydset Hobrovej/Provstvejorden og endelig præsenteres de samlede resultater.

Sammenligningen af middelforsinkelsen i krydset Hobrovej/Søndre Skovvej ses i tabel 1. Resultaterne viser, at middelforsinkelsen gennemsnitligt reduceres med 29,6 %. Middelforsinkelsen på Hobrovej er reduceret med omkring 50 % med undtagelse af den venstresvingende trafik, som kører ad Søndre Skovvej. Den overordnede reduktion i middelforsinkelsen sker dog på bekostningen af de få bilister fra Søndre Skovvej, som oplever at middelforsinkelsen øges med 5,3 og 6,4 sekunder.

Middelforsinkelse (Hobrovej / Søndre Skovvej)						
Trafikstrøm		Eksisterende kontroller	Ny kontroller	Antal	Effekt	
Fra	Til	[sek./kt.]	[sek./kt.]	[kt.]	Absolut [sek./kt.]	Relativ [%]
Hobrovej N	Hobrovej S	4,1	1,8	1756	-2,3	-56,8
Hobrovej S	Hobrovej N	3,6	1,9	1827	-1,7	-48,4
Hobrovej S	Søndre Skovvej	18,1	12,8	184	-5,2	-29,0
Søndre Skovvej	Hobrovej N	24,9	31,3	193	6,4	25,6
Søndre Skovvej	Hobrovej S	22,9	28,2	74	5,3	23,3
Hobrovej N	Søndre Skovvej	4,7	2,4	446	-2,2	-47,7
Vægtet gennemsnit		5,7	4,0	4481	-1,7	-29,6

Tabel 1: Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den eksisterende kontroller og ny kontroller samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

Af tabel 2 ses effekten på kødannelsen. Kødannelsen på Hobrovej reduceres omkring 50 %, mens kødannelsen på Søndre Skovvej er marginalt længere. Samlet set realiserer den nye kontroller kødannelsen med 50 %.

Køtlængde, 95 %-fraktil (Hobrovej / Søndre Skovvej)						
Trafikstrøm		Eksisterende kontroller	Ny kontroller	Antal	Effekt	
Fra	Til	[m]	[m]	[kt.]	Absolut [m]	Relativ [%]
Hobrovej N	Hobrovej S	29,9	13,1	1756	-16,8	-56,3
Hobrovej S	Hobrovej N	31,0	15,8	1827	-15,2	-49,0
Hobrovej S	Søndre Skovvej	10,1	5,3	184	-4,9	-48,1
Søndre Skovvej	Hobrovej N	22,5	25,0	193	2,5	11,2
Søndre Skovvej	Hobrovej S	10,8	11,8	74	1,0	9,3
Hobrovej N	Søndre Skovvej	14,1	6,0	446	-8,1	-57,7
Vægtet gennemsnit		27,3	13,6	4481	-13,7	-50,0

Tabel 2: Køtlængden i de respektive tilfartsspor med eksisterende kontroller og ny kontroller samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej.

I lighed med det forrige signalregulerede T-kryds forbedres trafikafviklingen overordnet set også i det firbenede kryds, Hobrovej/Ny Kærvej. Simuleringsresultaterne viser, at middelforsinkelsen reduceres fra 20,1 til 9,3 sekunder (tabel 3). Altså en gennemsnitlig reduktion af middelforsinkelsen på knap 11 sekunder for hver af de knap 5.500 bilister, som krydset betjener i løbet af de to timer, simuleringen pågår. Dette svarer til en reduktion af middelforsinkelsen på 53,7 %. Sættes der fokus på effekten i forhold til de enkelte trafikstrømme ses, at samtlige 12 trafikstrømme i krydset får en lavere middelforsinkelse. Størst er effekten for trafikken fra Vestre Allé og Ny Kærvej, hvor middelforsinkelsen er reduceret med mere end et halvt minut.

Middelforsinkelse		(Hobrovej / Ny Kærvej)				
Trafikstrøm		Eksisterende kontroller	Ny kontroller	Antal	Effekt	
Fra	Til	[sek./kt.]	[sek./kt.]	[kt.]	Absolut [sek./kt.]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	13,5	8,3	1819	-5,2	-38,5
Ny Kærvej	Vestre Allé	29,9	10,4	340	-19,5	-65,1
Ny Kærvej	Hobrovej S	35,0	15,1	174	-20,0	-57,0
Vestre Allé	Ny Kærvej	45,6	10,7	411	-34,9	-76,6
Vestre Allé	Hobrovej S	48,1	9,9	139	-38,2	-79,5
Vestre Allé	Hobrovej N	50,1	19,6	147	-30,6	-61,0
Ny Kærvej	Hobrovej N	29,3	9,6	333	-19,7	-67,3
Hobrovej S	Ny Kærvej	13,4	6,2	290	-7,2	-53,9
Hobrovej S	Vestre Allé	20,5	13,9	159	-6,6	-32,2
Hobrovej N	Ny Kærvej	25,8	17,1	252	-8,8	-33,9
Hobrovej N	Vestre Allé	9,4	5,3	95	-4,1	-43,9
Hobrovej N	Hobrovej S	9,4	6,9	1337	-2,5	-26,3
Vægtet gennemsnit		20,1	9,3	5495	-10,8	-53,7

Tabel 3: Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis eksisterende kontroller og ny kontroller samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

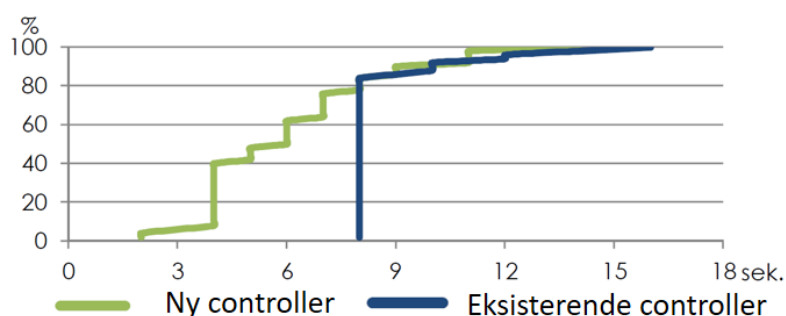
Tabel 4 viser 95%-fraktilen for tilfarternes kølængde med de to kontrollere. Det bemærkes, at for de mest belastede retninger går kølængden fra omkring 200 m til mellem 7 og 20 m. I gennemsnit reduceres kølængderne med 64,1 %, svarende til 45 m. Det bemærkes også, at kølængderne i samtlige tilfartsspor reduceres.

Kølængde, 95 %-fraktil		(Hobrovej / Ny Kærvej)				
Trafikstrøm		Eksisterende kontroller	Ny kontroller	Antal	Effekt	
Fra	Til	[m]	[m]	[kt.]	Absolut [m]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	86,6	39,1	1819	-47,5	-54,8
Ny Kærvej	Vestre Allé	41,2	16,5	340	-24,6	-59,8
Ny Kærvej	Hobrovej S	18,0	11,8	174	-6,2	-34,4
Vestre Allé	Ny Kærvej	200,0	20,4	411	-179,6	-89,8
Vestre Allé	Hobrovej S	193,0	6,7	139	-186,4	-96,5
Vestre Allé	Hobrovej N	182,5	11,1	147	-171,5	-93,9
Ny Kærvej	Hobrovej N	36,9	16,0	333	-20,8	-56,5
Hobrovej S	Ny Kærvej	21,1	12,5	290	-8,6	-40,5
Hobrovej S	Vestre Allé	10,6	6,5	159	-4,1	-38,5
Hobrovej N	Ny Kærvej	17,8	12,4	252	-5,4	-30,4
Hobrovej N	Vestre Allé	6,3	6,0	95	-0,3	-4,1
Hobrovej N	Hobrovej S	34,9	25,1	1337	-9,8	-28,0
Vægtet gennemsnit		69,6	24,9	5495	-44,6	-64,1

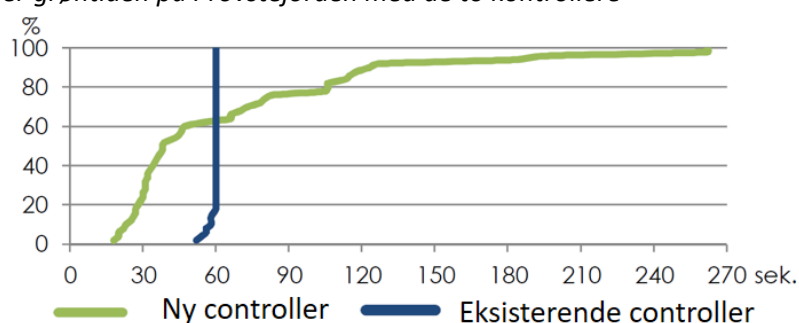
Tabel 4: Kølængden (95% fraktil) i de respektive tilfartsspor med henholdsvis eksisterende kontroller og ny kontroller samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

I det signalregulerede kryds mellem Hobrovej og Provstejorden reduceres middelforsinkelsen også betydeligt. Middelforsinkelsen reduceres i gennemsnit fra 4,3 til 2,2 sekunder, hvilket er en reduktion på 49,4 %, samtidig med at trafikanterne i samtlige tilfarter opnår en forbedret middelforsinkelse. Derved sker der ikke blot en omfordeling af grøntiden. Dette kommer blandt andet til udtryk for trafikanter fra Provstejorden, som ved den eksisterende kontroller får grønt én gang fast pr. omløb. Da den nye kontroller i stedet anvender køretøjernes ETA, er det muligt at give grønt, når der opstår et tilpas stort gab i trafikken på Hob-

rovej, hvorved generne for trafikken på Hobrovej minimeres. Derudover gives der kun grønt fra Provstejorden, når der befinder sig køretøjer i tilfartssporet på Provstejorden. Figur 9 og Figur 10 viser sumkurver over grøntidsfordelingerne for hhv. Provstejorden og Hobrovej. Kurverne viser tydeligt forskellen i de to kontrolleres fleksibilitet, som blandt andet er betinget af, at den eksisterende kontroller har en max. grøntid for Hobrovej på 60 sekunder og en min. grøntid på Provstejorden på 8 sekunder.

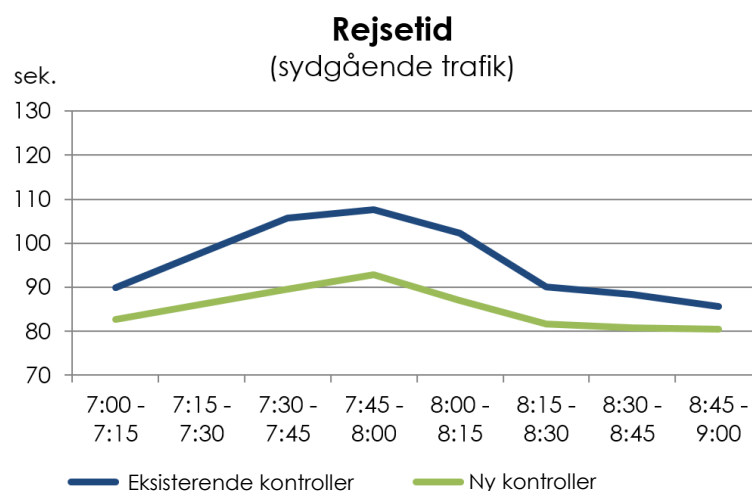


Figur 9 Sumkurve over grøntiden på Provstejorden med de to kontroller

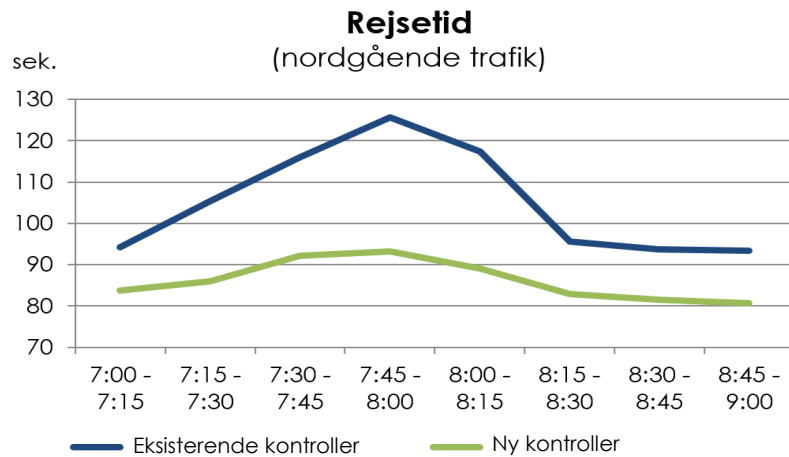


Figur 10 Sumkurve over grøntiden på Hobrovej med de to kontroller

Foruden effekten af den nye kontroller i det enkelte signalanlæg måles effekten på rejsetiden på hele strækningen. Figur 11 viser rejsetiden for den sydgående trafik, som i gennemsnit reduceres mellem 5 til 16 sekunder. Omregnet til rejsehastighed hæves denne fra 37,7 km/t til 42,7 km/t, hvilket svarer til knap 13 %. For den nordgående trafik er effekten mere markant (Figur 12). Her reduceres rejsetiden med op til et halvt minut i tidsrummet 7:30 til 8:00. Dette svarer til at rejsehastigheden øges fra 34,3 km/t til 42,3 km/t, hvilket er en stigning på mere end 23 %. Dette viser, at den nye kontroller, selv om den alene optimerer krydsene enkeltvis, giver markant mindre rejsetider end den gamle den kontroller, der også samordner 3 af krydsene.

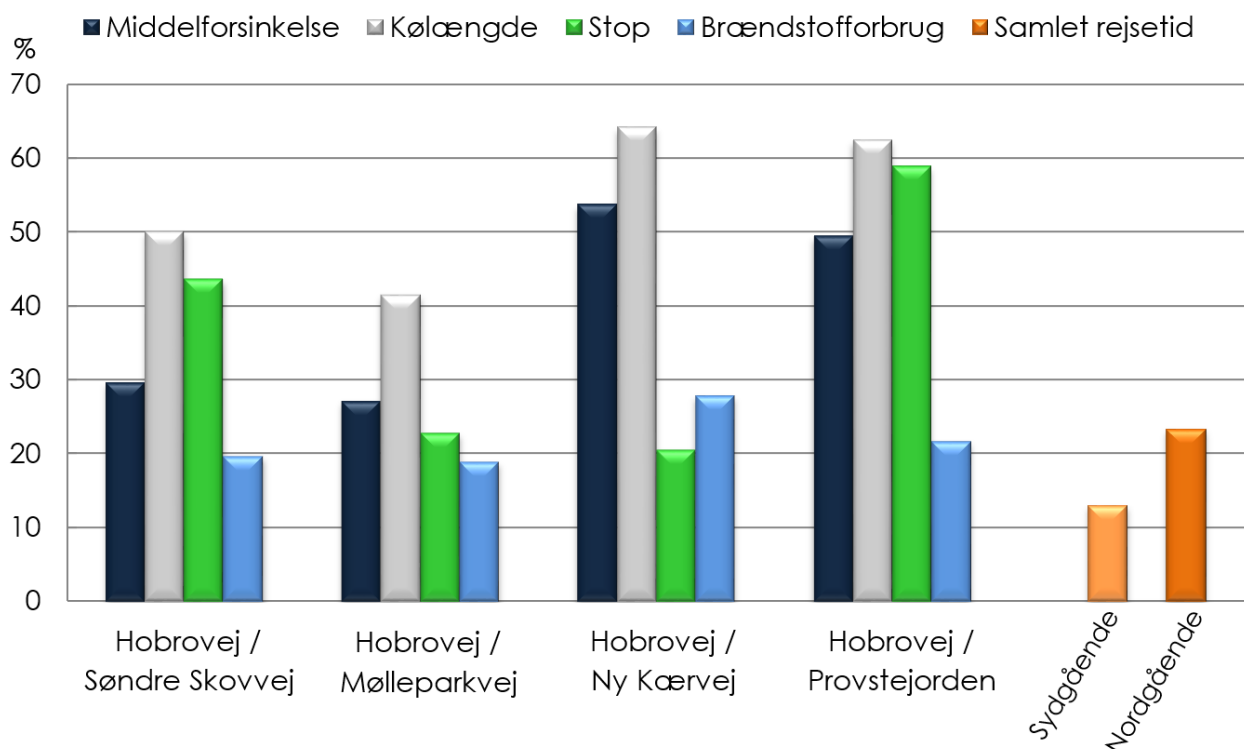


Figur 11: Den overordnede rejsetid i sydgående retning med henholdsvis eksisterende kontroller og ny kontroller i morgenmyldretiden.



Figur 12: Den overordnede rejsetid i nordgående retning med henholdsvis eksisterende kontroller og ny kontroller i morgenmyldretiden.

Effekterne af den nye kontroller er opsummeret i Figur 13, som giver et overblik over effekterne i de fire signalregulerede kryds, samt effekten i forhold til den samlede rejsetid for henholdsvis den nord- og sydgående trafik på Hobrovej. Af figuren fremgår det, at den nye kontroller har en betydelig effekt for samtlige af de indgående parametre. Således forbedres middelforsinkelsen fra 27 % til 54 %. Kølængderne reduceres i intervallet 42-64 %. Antallet af stop reduceres med mellem 20 % og 59 % mens brændstofforbruget reduceres med 19 % til 28 %. Dertil reduceres den samlede rejsetid med 23 % og 13 % i henholdsvis nord- og sydgående retning.



Figur 13: Den nye kontrollers reducerede effekter på parametrene middelforsinkelse, kølængde, stop, brændstofforbrug samt den samlede rejsetid i nord- og sydgående retning på Hobrovej.

De samfundsøkonomiske effekter af den nye kontroller i de fire kryds er opgjort til en årlig besparelse på 9,6 mio. kr. (tabel 5). Til beregningen er anvendt de transportøkonomiske enhedspriser og en opskrivning

af de gennemførte tællinger til ÅDT [Transportøkonomiske enhedspriser til brug for samfundsøkonomiske enhedspriser, Trafiktællinger – Planlægning, udførelse og efterbehandling].

Samfundsøkonomisk beregning		
Forudsætninger		
Andel af talt trafik (i tidsrummet 7:00-9:00) i forhold til ÅDT	19	%
Vægtet enhedspris (97 % personbiler, 3 % lastbiler)	142,5	kr./time
Vægtet brændstofpris (benzin & diesel)	10,68	kr.
Reduceret tidsomkostning		
Tidsbesparelse pr. døgn (i de 4 signalregulerede kryds)	126,1	timer
Årlig tidsbesparelse (126,1 timer over 365 dage)	46.034,1	timer
Årlig tidsgevinst	6.558.017	kr.
Reduceret brændstofomkostning		
Brændstofbesparelse pr. døgn (i de 4 signalregulerede kryds)	795,4	liter
Årlig brændstofbesparelse (795,4 liter over 365 dage)	290.326,9	liter
Årlig brændstofgevinst	3.100.692	kr.
Årlig samfundsøkonomisk gevinst	9.658.709	kr.

Tabel 5: Samfundsøkonomisk beregning af effekterne afledt af den intelligente signalstyring.

Diskussion og konklusion

Litteratursøgningen viste, at selv om der findes mange systemer til adaptiv signalstyring, er de grundlæggende algoritmer relativt primitive. De kan typisk på baggrund af diskrete informationer vælge mellem på forhånd definerede opsætninger – fx forlængelser, fasevalg eller samordninger. [Gautier, 2001] [Agerholm, 2011; Krøyer, 2008] [Kronborg & Davidsson, 2004]. Litteratursøgningen viste også, at der er bud på selvorganiserende systemer baseret på optimering på baggrund af realtidsdata og maskinlæring [Goel, S., Bush, S.F. & Gershenson C. 2017], og det er netop hvad dette projekt har arbejdet med.

Igennem mikrosimulering med programmet VISSIM har vi vist, at den i projektet udviklede kontroller baseret på optimeringsprogrammet Uppaal Strateego afvikler trafikken markant mere effektivt end den eksisterende kontroller på parametrene middelforsinkelse, kødannelse, antal stop, brændstofforbrug samt den overordnede rejsetid på den tidligere samordnede strækning. Foruden optimeringspotentialets eksistens er størrelsesorden af dette også belyst. Overordnet set forbedres samtlige parametre i de 4 signalregulerede kryds. Derudover forbedres rejsetiden på den tidligere samordnede strækning også mærkbart. Helt konkret viser simuleringens resultater, at middelforsinkelsen reduceres med 27-54 %. Kølængderne reduceres med 42 % til 64 %. Antallet af stop reduceres i intervallet 20-59 % mens brændstofforbruget reduceres med 19 % til 28 %. Dertil reduceres den samlede rejsetid på den tidligere samordnede strækning med 23 % og 13 % i de to retninger.

Når resultaterne af et simuleringsskud skal bedømmes, er det vigtigt at bedømme kvaliteten af selve simuleringen. En række studenterprojekter på Aalborg Universitet har igennem årene sammenlignet resultater fra simuleringer i VISSIM med observationer af virkelig trafik. Studierne har omhandlet både simulering af trafik, der er reguleret af signaler og trafik, der er reguleret af vigepligt. Sammenfattende viser studierne, at VISSIM kun dårligt simulerer trafik, der er vigepligtsreguleret, hvorimod resultaterne, hvor trafikken reguleres af signaler, er markant bedre. [Hansen, M. F. 2016] [Hashemi, M. 2014] [Jeppesen, B. 2010] [Pihlkjær, A.G. 2009]. Simuleringen i dette projekt omhandler signalregulerede kryds og er dermed den reguleringsstype, som VISSIM bedst simulerer. Dernæst anvendes VISSIM i projektet til at sammenligne to simuleringer af den samme regulering og med de samme trafikmængder. Disse forhold taler for at simuleringens resultater på trods af VISSIM's svagheder giver et acceptabelt billede af forskellen på de to kontroller.

Fodgængere og cyklister indgår ikke i simuleringen. Det er ikke muligt at forudsige, hvad effekten vil være af at have disse trafikantgrupper inkluderet i modellen på lige fod med bilisterne. Resultaterne vil i høj grad afhænge af, hvor forskellige disse strømme er fra bilstrømmene og vil kunne give både større og mindre forskel mellem de to kontrollere.

Der har ikke været indlagt den i bekendtgørelsen for signalregulerede kryds fastlagte minimumsgrøntid for signalregulerede kryds på 6 sekunders minimumsgrøntid i randbetingelserne for signalernes virkemåde [BEK nr. 1194 af 21/09/2016]. Studeres Figur 9 ses konsekvenserne af dette, idet 50% af de tildelte grøntiderne på Provstejorden er under 6 sekunder, fordi der kun har været én eller to biler, der har efterspurgt grønt. En minimumsgrøntid på 6 sekunder ville have givet mere forsinkelse på Provstejorden og mindre på Hobrovej fordi det i færre situationer ville være fordelagtig at skifte til grønt til Provstejorden, men det er ikke muligt at forudse, hvad summen af de to modsatrettede tendenser ville have været. Figur 10 viser tydeligt, hvordan den nye kontroller i høj grad tilpasser sig trafikken i modsætning til den eksisterende kontroller, der stort set konstant anvender max grøntiden på 60 sekunder. Fx er godt 40% af grøntiderne større end den eksisterende kontrollers max. omløbstid.

Sammenfattende kan det konkluderes, at der synes at være et stort optimeringspotentialt i signalregulerede kryds ved anvendelse af optimeringsprogrammet Uppaal Stratego til optimering af afviklingen i enkelt kryds i stedet for de hidtil anvendte principper baseret på diskrete observationer og samordnede anlæg.

Det videre arbejde

Næste trin er at vise, at de overbevisende simuleringsresultater i dette projekt kan gentages i virkelig trafik. Herunder hvor meget af effekten, der forsvinder, hvis der opsættes randbetingelser for fx min. og max. grøntider og faseforløb.

Resultaterne i dette projekt er opnået igennem en kombination af bedre inputdata til trafikstyringen (kontinuerte radardata) og kontinuerlig optimering baseret på maskinlæring, men maskinlæringsprincipperne vil også kunne anvende på andre inputdata fx punktdata fra spoler og rejsetidsmålinger indhentet fra eksterne systemer til rejsetidsmåling, ligesom der også ligger optimeringspotentialer i at se på afviklingen i større eller mindre netværk ved anvendelse af maskinlæring.

Referencer

Agerholm, N. 2013, "Adaptiv signalstyring i Aalborg – effekt på trafikafviklingen", *Trafik & Veje*, april 2013, side 63-65.

Rajeev Alur, David L. Dill: A Theory of Timed Automata. *Theor. Comput. Sci.* 126(2): 183-235 (1994)

Bekendtgørelse om anvendelse af vejafmærkning (BEK nr. 1194 af 21/09/2016) 2016, Transport- og Bygningsministeriet, København.

David A, Jensen PG, Larsen KG, Mikučionis M and Taankvist JH 2015, *Uppaal Stratego*. 21st International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS).

DiCyPS, 2017. www.dicyps.dk.

Gautier, E 2001, Adaptive signalsystemer. *Dansk Vejtidskrift (idag Trafik & Veje)*, maj 2001, side 36-37.

Goel, S. Bush, SF & Gershenson C 2017, Self-Organization in Traffic Lights: Evolution of Signal Control with Advances in Sensors and Communications, *Computing Research Repository (CoRR)*, vol abs/1708.07188, Tilgået 11. December 2017, <http://arxiv.org/abs/1708.07188>.

Günther et al. 2016, *Platooning at Traffic Lights - A microscopic simulation study*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Göteborg, Sverige, 19.-22. juni, 2016.

Hansen, M. F. 2016, *Virkelighed og modeller*, 3. semester, Veje og Trafik, Aalborg Universitet.

Hashemi, M. 2014, *Vurdering af metoder til kapacitetsberegning af signalreguleret kryds*, kandidatprojekt, Veje og Trafik, Aalborg Universitet.

Håndbog – Vejsignaler, 2013, Vejdirektoratet, København.

Håndbog – Signalregulerede vejkryds i åbent land, 2012 Vejdirektoratet, København.

Jakobsen, L. 2015, Intelligent detektering i trafiksignaler. *Webinar, ITSDanmark*, <http://itsdanmark.dk/files/2015020515.02intelligentdetekteringitrafiksignaler.wmv>, Tilgået 2. april 2017.

Jeppesen, B. 2010 *Forældede signalanlæg koster millioner: danske trafikanter kan spare 900 mio. kr. i brændstofforbrug og reduceret ventetid*, kandidatprojekt, Veje og Trafik, Aalborg Universitet.

Kastrinaki, V., Zervakis, M., Kalaitzakis, K. 2003, A survey of video processing techniques for traffic applications i *Image and Vision Computing* 21, side 359-381.

Kildebogaard, J. 2015, Trafiksignaler - hvordan udnytter vi udviklingspotentialet? *Trafik & Veje*, september 2015, side 28-30.

Knudsen, K., Jakobsen, L. 2013, Ny og revolutionerende detektering af køretøjer og cyklister, *Trafik & Veje*, september 2013, side 31-33.

Konsekvenser for trafikanter og samfund – Bedre trafiksignaler, 2012, Vejdirektoratet, København.

Kronborg, P. & Davidsson, F. 2004, *Adaptiv styrning av Stockholms trafiksignaler*, *Kunskapssammanställning och förslag*, Movea Trafikkonsult AB.

Krøyer, B. 2008 "Miljøstyret trafik uden afgifter", *Dansk Vejtidskrift (i dag Trafik & Veje)* juni/juli, 2008, side 46-47.

Lauritzen 1994, "Signalregulerede kryds" i *Vejtrafik – Trafikteknik & Trafikplanlægning*, Lahrmann, H. & Leur, S., Polyteknisk Forlag. Side 147-180.

Madsen, T. K. O. et al. 2016, RUBA – Videoanalyseprogram til trafikanalyser, *Trafik & Veje*, marts 2016, side 14-17.

Mastra 2017, www.kmastra.dk, Tilgået den 5. december 2017

Pihlkjær, A.G. 2009, *Trafiksimulering med VISSIM: en analyse af programmets grundlæggende adfærdsparemetre samt bestemmelse og test af adfærdsparemetre under danske forhold*, kandidatprojekt, Veje og Trafik, Aalborg Universitet.

PTV VISSIM 2017, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>, Tilgået den 5. december 2017.

Martin L Puterman: Markov Decision Processes, Wiley Series in Probability Theory and Statistics. 2005.

Stuart J. Russell; Peter Norvig: Artificial Intelligence: A Modern Approach (Third ed.). Prentice Hall. p. 649, 2010

Shirvani, J.S. & Maleki, R.M. 2015 *Maximum Green Time Settings for Traffic Actuated Signal Control at Isolated Intersections Using Fuzzy Logic*, 4th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS).

Sode-Carlsen, R 2016, Simulering af ETA-radar og signalanlæg uden omløbstid, Vejforum 6.-8. december 2016, Nyborg.

Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I, 2006, Federal Highway Administration (FHWA), Georgetown.

Traffic Rader/Intersection Management, 2016, Smartmicro, <http://www.smartmicro.de/trafficradar/intersection-management/>, Tilgået 4. April 2017.

Trafiktællinger – Planlægning, udførelse og efterbehandling, 2006, Vejdirektoratet, København Trafikområdet.

Transportøkonomiske enhedspriser til brug for samfundsøkonomiske enhedspriser 2017, Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, København <http://www.modelcenter.transport.dtu.dk/Noegletal/Transportoe-konomiske-Enhedspriser>. Tilgået 5. december 2017.

Transportøkonomiske enhedspriser til brug for samfundsøkonomiske enhedspriser, 2017, Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, København.

UPPAAL, 1997. K.G Larsen, P. Petersson and W. Yi. UPPAAL in a Nutshell. In International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 1997.

Xu, Z., Zhao, X., Li, N. 2009, *Novel Vehicle Detection System Based on Line Scan Camera*. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 16.-18. August 2009. Beijing, Kina.