

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift

### Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet

(Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University)

ISSN 1603-9696

[www.trafikdage.dk/artikelarkiv](http://www.trafikdage.dk/artikelarkiv)



## Adaptiv signalstyring i realtid

### Intelligent signalstyring ved anvendelse af maskinlæring og objekt-detektering

Præsenterende forfattere:

Mikkel Færgemand, [MIFM@cowi.com](mailto:MIFM@cowi.com)  
COWI

Andreas Berre Eriksen, [andreasb@cs.aau.dk](mailto:andreasb@cs.aau.dk)  
Institut for Datalogi, Aalborg Universitet

Medforfattere:

Jakob Haahr Taankvist, [jht@cs.aau.dk](mailto:jht@cs.aau.dk)  
Institut for Datalogi, Aalborg Universitet

Kim Guldstrand Larsen, [kgl@cs.aau.dk](mailto:kgl@cs.aau.dk)  
Institut for Datalogi, Aalborg Universitet

Harry Lahrmann, [hsl@civil.aau.dk](mailto:hsl@civil.aau.dk)  
Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet

### Abstrakt

Denne artikel er baseret på kandidatspecialet, *Adaptiv signalstyring i realtid*, udarbejdet af Mikkel Færgemand, hvilket er foregået under projektsamarbejdet DiCyPS ved Aalborg Universitet, hvorfor der har været en lang række af bidragsydere.

Projektet omhandler udviklingen af en ny og intelligent signalstyring som alternativ til den traditionelle signalstyring. Ved anvendelse af nye principper inden for signalstyring samt objekt-detektering, som alternativ til traditionel punktdetektering, realiseres en intelligent og adaptiv signalstyring. Denne signalstyring forventes, at kunne forbedre den overordnede trafikafvikling i og omkring de signalregulerede kryds.

På baggrund af mikrosimuleringerne i VISSIM er det dokumenteret, at den intelligente signalstyring realiserer en mere effektiv trafikafvikling. Hvilket medfører en betydeligt reduktion af; middelforsinkelse, kølængde, brændstofforbrug, antal stop samt overordnede rejsetid ved anvendelse af den intelligente signalstyring.

### Baggrund

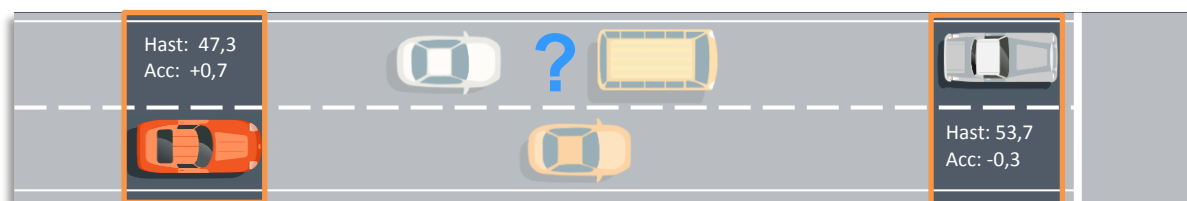
De senere år har der været et øget fokus på den stigende trængsel i byernes tætte og intense trafikmiljø. I den forbindelse anslår Vejdirektoratet, at den samfundsøkonomiske omkostning beløber sig til omkring 14 mia. kr. årligt alene i de signalregulerede kryds, som ofte er kapacitetssættende. [Vejdirektoratet, 2012]

I byområder kan trængslen ikke afhjælpes ved at udbygge den eksisterende infrastruktur, da arealbehovet ikke kan imødekommes. Som alternativ fokuseres der på optimering af den eksisterende infrastruktur ved hjælp af ITS. Under DiCyPS-projektet [DiCyPS, 2017] ved Aalborg Universitet pågår et større projektarbejde, med en klar forventning om, at der eksisterer et hidtil ukendt optimeringspotentiale i nutidens signalregulerede kryds.

Forventningen udspringer primært af to indgående elementer i arbejdet med signalanlæg som er;

- Utidssvarende detekteringsformer, som foretager punktdetekteringer.
- Traditionelle principper inden for signalstyring.

Først og fremmest anvendes det, der betragtes som utidssvarende detektorteknologier i signalregulerede kryds. Dette skyldes, at der mange steder anvendes punktdetekteringer via induktionsspoler eller veldefinerede detekteringsområder ved anvendelse af radarer. Simple punktdetekteringer giver således information i de respektive punkter. Informationer fra køretøjer imellem disse punktdetekteringer frem mod et signalreguleret kryds vil dog ikke kunne videregives til signalanlægget, hvilket er illustreret på figur 1. Dette kunne være essentiel information som eksempelvis hastighed, acceleration, deceleration eller hvorvidt det givne køretøj gør fuldt stop eller drejer fra, hvis sådanne muligheder eksisterer. Såfremt denne information bliver indsamlet, videregivet og anvendt i signalstyringen, er der en forventning om, at dette vil medvirke til en bedre trafikafvikling.



**Figur 1:** Traditionelle signalanlæg, som anvender punktdetekteringer i varierende afstand fra stopstreger, modtager ikke essentiel information fra køretøjer på den øvrige del af strækningen frem mod krydset.

Derudover er det indtrykket, at der i forbindelse med arbejdet vedrørende signalregulering indgår nogle klare, traditionelle principper inden for signalstyring. Eksempler på sådanne principper kunne være forudbestemt faseskift, faste maksimale grøntider afledt af faste omløbstider samt faste offset-tider mellem samordnede signalregulerede kryds. Disse traditionelle principper er grundlæggende hensigtsmæssige, da de medvirker til at eliminere urimelige ventetider fra underordnede veje i kryds. Derudover danner de grundlag for en ensretning af de signalregulerede kryds, som gør dem forudsigelige, hvilket er til gavn for trafikanterne. Der vurderes dog at være en risiko for, at de traditionelle principper inden for styring af signalanlæg i dag har en negativ effekt og i stedet fungerer som en barriere i forhold til at reducere unødige forsinkelse for rødt og tilvejebringe en bedre fremkommelighed.

For at illustrere, i hvilke situationer dele af den unødige forsinkelse vurderes at opstå, er der taget udgangspunkt i nogle konkrete erfaringsbaserede eksempler, hvor trafikanterne på en strækning med samordnede, signalregulerede kryds venter unødigt for rødt, hvilket er illustreret på figur 2. Dette kan blandt



**Figur 2:** Principskitse, som illustrerer situationer på en strækning med flere samordnede signalanlæg, hvor traditionelle principper, herunder teoretisk beregnede offset-tider samt en fast maksimal grøntid afledt af en fast omløbstid, medvirker til en unødige ventetid for rødt på såvel primær- som sekundærvej.

andet skyldes, at offset-tiden mellem to kryds, med flere hundrede meters mellemrum, er beregnet på baggrund af en ideal gennemsnitshastighed, hvilket er en betydelig forsimpning, da hastigheden over døgnet typisk er meget varierende. I nogle tilfælde er den reelle hastighed højere end den anvendte idealhastighed, hvilket øger risikoen for, at trafikanter på sekundærvejen kommer til at vente unødigt for rødt, da trafikken på primærvejen er afviklet hurtigere end forventet. Er den reelle hastighed derimod lavere end den anvendte ideal hastighed, er der en risiko for, at en kolonne på primærvejen ikke afvikles i løbet af grøntiden og derved splittes. At en kolonne af køretøjer splittes, vurderes også i nogle tilfælde at være forårsaget af en fast maksimal grøntid, som er afledt af en fast omløbstid. Derved vurderes det, at offset-tider beregnet på baggrund af en ideal gennemsnitshastighed samt faste omløbs- og grøntider er medvirkende til en overordnet forringelse af fremkommeligheden.

Som konsekvens af utidssvarende detekteringsformer samt traditionelle principper inden for styring af signalanlæg vurderes der at være flere tilfælde, hvor trafikanter oplever unødigt forsinkelser for rødt i nutidens signalregulerede kryds. Såfremt der gøres op med de traditionelle principper inden for signalstyring og nye, effektive detekteringsteknologier kan anvendes, er det hypotesen, at der eksisterer et hidtil ukendt optimeringspotentiale i de signalregulerede kryds.

Det tilstræbes således at dokumentere det forventede optimeringspotentiale ved at gøre op med traditionelle styringsprincipper og i stedet anvende en intelligent og mere fleksibel signalstyring, som tilvejebringes ved anvendelse af en matematisk optimeringsmodel. Dertil forventes moderne detekteringsteknologier anvendt som erstatning for de traditionelle punktdetekteringer.

## Metode

De metoder, som er anvendt i projektet, betragtes som det overordnede projektgrundlag. De anvendte metoder har således stor betydning for projektets kvalitet og har direkte indflydelse på resultater og konklusioner, som tilvejebringes på baggrund af projektarbejdet. Derfor beskrives metoder samt arbejdsgange og -processer, som er anvendt.

## Projektlokalitet

I bestræbelserne på at dokumentere optimeringspotentialet tages der udgangspunkt i en strækning på Hobrovej i Aalborg med seks signalregulerede kryds, se figur 3. Strækningen er en betydelig indfaldsvej til Aalborg og derfor meget trafikeret med en ÅDT på 20.000-30.000 køretøjer [Mastra, 2017]. Derudover indgår flere af signalanlæggene i en samordning, hvorfor strækningen betragtes som ideel, i forhold til at undersøge, hvorvidt der eksisterer et ukendt optimeringspotentiale. Selve optimeringen undersøges udelukkende i de fire signalregulerede kryds inde på selve strækningen, mens det nord- og sydligste kryds blot indgår for at realisere en retvisende ankomstfordeling på strækningen.

## Trafikmodellering

I indværende projekt ønskes det undersøgt, hvorvidt der er et ukendt optimeringspotentiale, som kan realiseres ved en intelligent signalstyring. Effekten skal således dokumenteres, hvor også størrelsesordenen er interessant at få belyst. Det vurderes ideelt at vurdere effekten på baggrund af en før- og efteranalyse via et fuldskalaforsøg, hvor virkninger og konsekvenser af den intelligente signalstyring vil vise sig direkte efter en eventuel indkøringsperiode. Da dette forudsætter radardetektering i samtlige kryds, vil dette være ressourcekrævende. Derudover er et fuldskalaforsøg også forbundet med en vis risiko, da effekten af den nye signalstyring kan være ikke eksisterende eller i værste fald negativ. Disse elementer bevirker, at det ikke er muligt at udføre et fuldskalaforsøg i bestræbelserne på at dokumentere effekten af en intelligent signalstyring. Som alternativ til et ressourcekrævende og risikobetonet fuldskalaforsøg anvendes trafikmodellering. Ved at opbygge en trafikmodel, som tilnærmelsesvis gengiver den eksisterende trafiksituation, er det muligt at vurdere effekten af den intelligente signalstyring ved at udføre en før- og efteranalyse. Dette forudsætter dog, at trafikmodellen betragtes som repræsentativ og opfylder krav til validitet.

Da evalueringen af den intelligente signalstyring skal vurderes ud fra parametre som antal stop, forsinkelse og brændstofforbrug anvendes en mikroskopiske trafikmodel, da det herigennem er muligt at tilvejebringe resultater med en meget høj detaljeringsgrad. I projektet anvendes mikrosimuleringsprogrammet VISSIM. [PTV VISSIM, 2017]

## Dataindsamling og –behandling

Der er behov for data, som detaljeret beskriver den reelle trafik på strækningen. Foruden et indblik i den trafikale situation, skal data også bruges i forbindelse med modelopbygningen i mikrosimuleringsprogrammet VISSIM. I den forbindelse er der, i samarbejde med Aalborg Kommune, indhentet videoobservationer af de 6 signalregulerede kryds i tidsrummet fra kl. 7:00 til kl. 9:00 på hverdage med undtagelse af fredag.

På baggrund af videoobservationer er det muligt at foretage krydstællinger i de enkelte kryds. I samtlige 6 signalregulerede kryds foretages der således krydstællinger i morgenmyldretiden fra kl. 7:00 til kl. 9:00. Selve krydstællingerne foretages i kvartersintervaller, mens der foretages en køretøjsklassifikation, hvor der separat registreres;

- Person- og varebiler
- Lastbiler/busser



**Figur 3:** De 6 signalregulerede kryds på Hobrovej samt den indbyrdes afstand.

- Lastbiler med påhæng/sættevogn
- Motorcykler

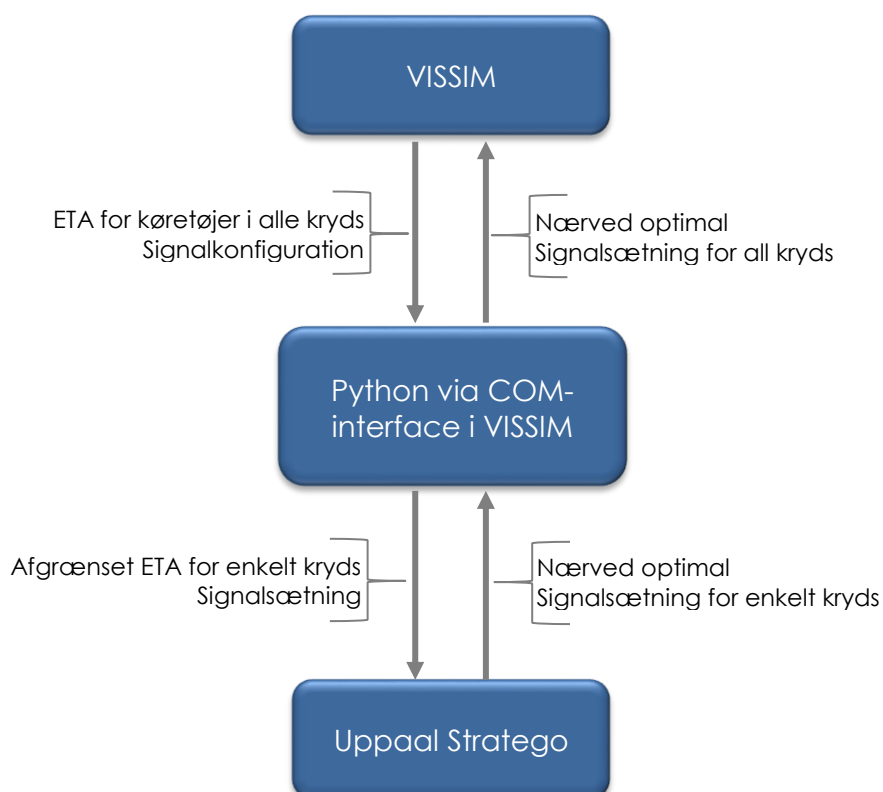
De bløde trafikanter i form af fodgængere og cyklister indgår således ikke i projektet.

### Intelligent signalstyring

Den intelligente signalstyring benytter programmet Uppaal Stratego [Stratego, 2015] til at beregne en optimal signalstyring i forhold til et optimeringskriterie. I dette projekt benyttes den overordnede forsinkelse i den enkelte kryds som optimeringskriterie. Uppaal Stratego er et program udviklet på Institut for Datalogi på Aalborg Universitet. Programmet er en overbygning af Uppaal [Uppaal, 1997] som i over 20 år er blevet udviklet i et samarbejde mellem Aalborg Universitet og Uppsala Universitet. Uppaal Stratego har allerede været brugt i flere casestudies, eksempelvis til styring af gulvvarme og satellitter. Programmet beregner en nær optimal strategi ved anvendelse af reinforcement learning.

Uppaal Stratego fungerer ved at der modelleres den overordnede problem vha. såkaldte tidsautomater. Givet en sådan model beregner Uppaal Stratego en nær optimal strategi vha. reinforcement learning således at strategien opfylder et bestemt optimeringskriterie.

Ved at benytte Uppaal Stratego til opnås en innovativ og adaptiv signalstyring sammenholdt med nutidens signalstyring. Som tidligere beskrevet foretages mikrosimuleringer via VISSIM til at evaluere effekten af den intelligente signalstyring. Den intelligente signalstyring forudsætter anvendelse af objekt-detektering, hvilket kan realiseres ved anvendelse af radardetektering. Det er imidlertid kun muligt at implementere



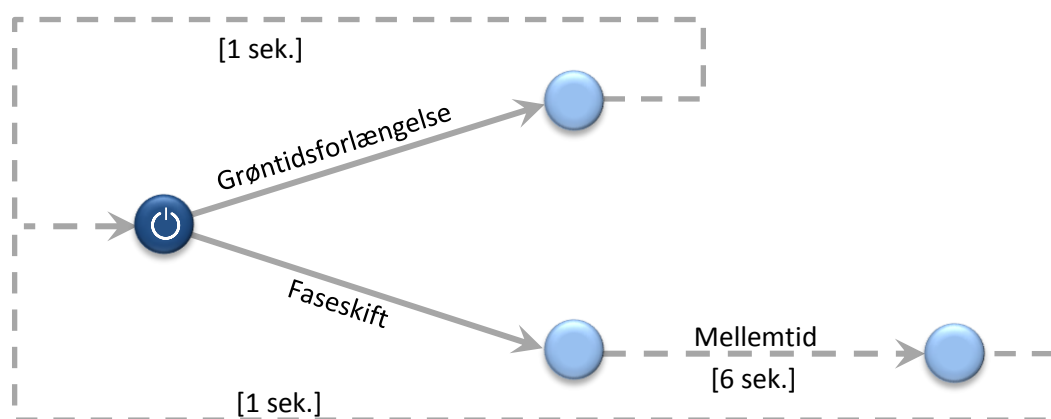
**Figur 4:** Illustration af processen, hvor køretøjsdata fra VISSIM via Python sendes til Uppaal Stratego. Derefter beregnes en nærvæd optimal signalstyring, som sendes retur til VISSIM via Python, hvor signalstyringen slutteligt effektueres. Denne proces foretages planmæssigt én gang pr. sekund.

veldefinerede detekteringsområder, der fungerer som punktdetektering i VISSIM. For at realisere objekt-detektering i VISSIM emuleres radardetektering ved kontinuerligt at trække rådata direkte ud af modellen for samtlige trafikanter via VISSIMs COM-interface.

Disse rådata videresendes, ved hjælp af programmerings sproget Python, til Uppaal Stratego. Fremgangsmåden er illustreret på figur 4. Først trækkes data ud af VISSIM til Python vha. COM-interfacet, Python opdeler så data således, at Uppaal Stratego kun får data fra ét kryds ad gangen, Python kører så Uppaal Stratego fire gange (én gang for hvert kryds) med det data som hører til det pågældende kryds. For hvert kryds sendes ETA til krydset for alle køretøjer, som er op til 200 meter fra krydset samt den nuværende signalsætning. Uppaal Stratego anvender så disse data til at generere en nærværd optimal signalstyring for det pågældende kryds. Efterfølgende sendes den nærværd optimale signalstyring tilbage til VISSIM via Python, hvor VISSIM slutteligt effektuerer denne. Ved anvendelse af radardetektering og nye signalstyringsprincipper kan den intelligente signalstyring realiseres. Signalstyringen sker i hvert af de fire signalregulerede kryds og derved decentralt, der er altså ingen kommunikation eller samordning mellem krydsene. Som nævnt ovenfor benytter Uppaal Stratego et optimeringskriterie til at beregne strategien dette ses som et alternativ til de traditionelle signalstyringsprincipper, som bestemmer den mest hensigtsmæssige signalsætningen i det pågældende signalanlæg. Kvalitetsmålet kan være en kombination af flere parametre, eksempelvis kødannelse og forsinkelse, hvortil der kan tilføjes regler således at kødannelsen eksempelvis vægtes højere end forsinkelsen. Da parametre som kødannelse, antal stop, forsinkelse og brændstofforbrug i større eller mindre grad betragtes som korrelerede, optimeres signalstyringen med henblik på at minimere den samlede forsinkelse i det enkelte kryds. I den forbindelse skelnes der ikke mellem forskellige køretøjstyper, hvorfor al trafik vægtes ligeligt. Dette begrænser desuden kompleksiteten og letter gennemskueligheden af de bagvedliggende processer. Det tilstræbes således at bestemme den optimale signalsætning med henblik på at minimere den samlede forsinkelse i det enkelte signalregulerede kryds.

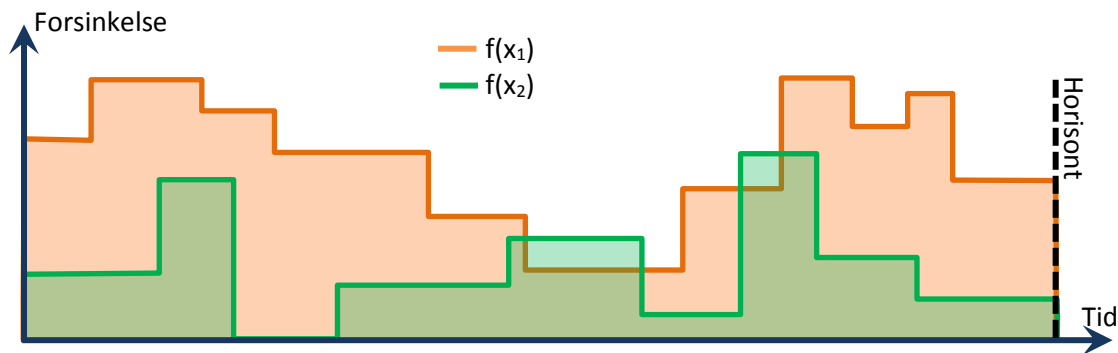
### Stratego kontrolleren

Den optimale signalsætning undersøges i Uppaal Stratego, hvor signalsætninger simuleres og testes inden for en given horisont, som er bestemt til 20 sekunder. Disse simuleringer foretages på en abstrakt model, som beskriver bilernes samt krydssets dynamik. Et eksempel på sådanne en abstrakt model vises i figur 5.



**Figur 5:** Illustration af processen i Uppaal Stratego, hvor kombinationsmulighederne, i et givent sekund i simuleringen, undersøges inden for horisonten på 20 sekunder. De forskellige kombinationsmuligheder repræsenterer hver især en unik signalsætning inden for horisonten, hvor data fra den emulerede radardetektering bevirker, at modellen kan effektuerer den signalsætning, som realiserer den mindst mulige forsinkelse i det signalregulerede kryds.

Ved hjælp af den emulerede radardetektering muliggøres en beregning af forsinkelsen, som kan akkumuleres inden for horisonten, hvorved den samlede forsinkelse, afledt af den givne signalsætning kan bestemmes. Processen er illustreret på figur 6, som viser resultatet af to model simuleringer under forskellige signalsætninger. Af figuren står det klart at funktionen,  $f(x_2)$ , som er vist med grønnt, giver den mindste forsinkelse samlet set og derfor effektueres.

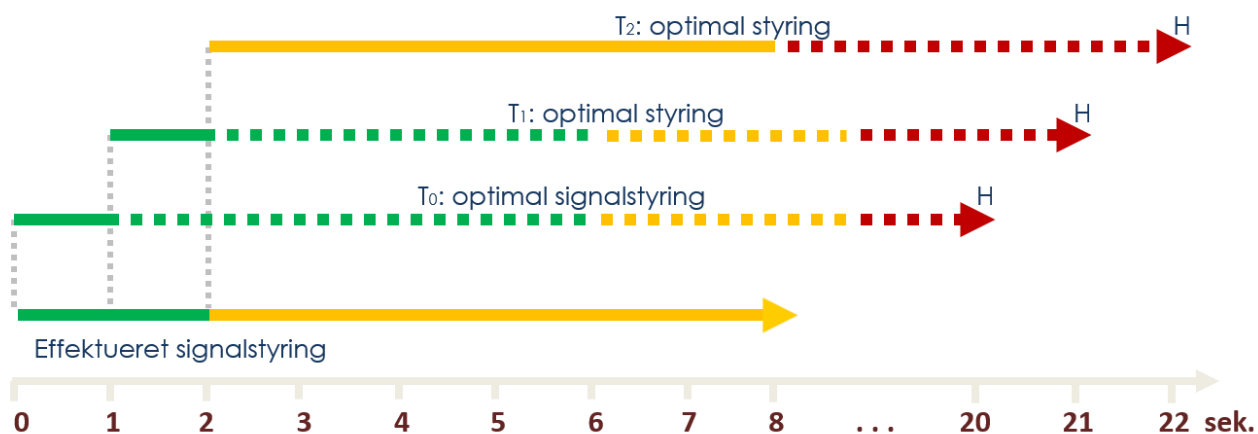


**Figur 6:** Eksempel, som illustrerer processen i Uppaal stratego, hvor to signalsætninger undersøges i forhold til den samlede forsinkelse. Af figuren fremgår det af funktionen, som udgøres af den blå linje, giver den mindste samlede forsinkelse og derfor effektueres.

Hypotesen er, at denne metode realiserer en mere effektiv trafikafvikling sammenholdt med traditionelle metoder. Da den optimale signalsætning i Uppaal Stratego er baseret på et øjebliksbillede i det første sekund og kun har information om køretøjer op til 200 meter fra krydset vil den trafikale situation ændres betydeligt indenfor horisonten på 20 sekunder. Dette kan skyldes, at flere køretøjer er kommet inden for radarens registreringsafstand. Derudover kan det skyldes, at køretøjer er drejet fra før det signalregulerede kryds eller har foretaget et fuldt stop, hvis disse muligheder eksisterer. Dette kan bevirke, at den effektuerede signalsætning i sidste ende viser sig at være ikke-optimal.

For at imødekomme denne udfordring introduceres en rullende horisont i forbindelse med signalstyringen. Den rullende horisont giver således mulighed for løbende at tilpasse signalsætningen til den aktuelle trafikale situation, hvilket er illustreret på figur 7. Derved kan signalsætningen ændres hvert sekund. Dette bevirker, at signalsætningen i langt de fleste tilfælde vil være den optimale med henblik på at minimere den samlede forsinkelse.

Da signalstyringen er baseret på registreringerne fra radarerne i krydset er det essentielt at disse er funktionelle. Derudover forudsætter en optimal signalstyring af trafikken i det enkelte kryds kan afvikles.



**Figur 7:** 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.

Ved anvendelse af objekt-detektering, nye signalstyringsprincipper samt Uppaal Stratego som optimeringsmodel, realiseres en adaptiv signalstyring i realtid. Den nye signalstyring forventes at kunne forbedre trafikafviklingen mærkbart i de indgående signalregulerede kryds, hvilket undersøges og efterfølgende sammenholdes med før-situationen i VISSIM.

## Resultater

I indeværende afsnit sammenholdes simuleringresultaterne fra VISSIM. Ved at sammenholde simuleringresultaterne på baggrund af den eksisterende signalstyring med simuleringresultaterne med den intelligente signalstyring kan effekten af sidstnævnte dokumenteres. I evalueringen indgår parametrene middelforsinkelse, kølængde, brændstofforbrug samt antal stop foretaget i de enkelte kryds. Derudover er den overordnede rejsetid på Hobrovej også sammenholdt. Detaljeret data for de enkelte trafikstrømme fremgår for krydsene Søndre Skovvej / Hobrovej og Ny Kærvej / Hobrovej, mens de overordnede resultater slutteligt præsenteres for samtlige kryds.

Af tabel 1 fremgår sammenligningen af middelforsinkelsen i krydset Hobrovej / Søndre Skovvej. Overordnet set viser resultaterne, at middelforsinkelsen gennemsnitligt reduceres med hele 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 omkring 270 bilister fra Søndre Skovvej, som oplever at middelforsinkelsen øges med 5,3 og 6,4 sekunder.



Middelforsinkelse		(Hobrovej / Søndre Skovvej)				
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	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
<b>Vægtet gennemsnit</b>		<b>5,7</b>	<b>4,0</b>	<b>4481</b>	<b>-1,7</b>	<b>-29,6</b>

**Tabel 1:** Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring 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 intelligente signalstyring en markant reduktion af kødannelsen på hele 50 %.

Køtlængde, 95 %-fraktil		(Hobrovej / Søndre Skovvej)				
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	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
<b>Vægtet gennemsnit</b>		<b>27,3</b>	<b>13,6</b>	<b>4481</b>	<b>-13,7</b>	<b>-50,0</b>

**Tabel 2:** Køtlængden i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring 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 dokumenterer, at middelforsinkelsen reduceres fra 20,1 til 9,3 sekunder, hvilket frem går af 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 hele 53,7 %, ved anvendelse af den intelligente signalstyring. Sættes der fokus på effekten i forhold til de enkelte trafikstrømme, står det klart, at samtlige 12 trafikstrømme i krydset oplever en lavere middelforsinkelse. Størst er effekten for trafikken fra Vestre Allé og Ny Kærvej, hvor middelforsinkelsen er reduceret med op til mere et halvt minut.

Middelforsinkelse		(Hobrovej / Ny Kærvej)				
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	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
<b>Vægtet gennemsnit</b>		<b>20,1</b>	<b>9,3</b>	<b>5495</b>	<b>-10,8</b>	<b>-53,7</b>

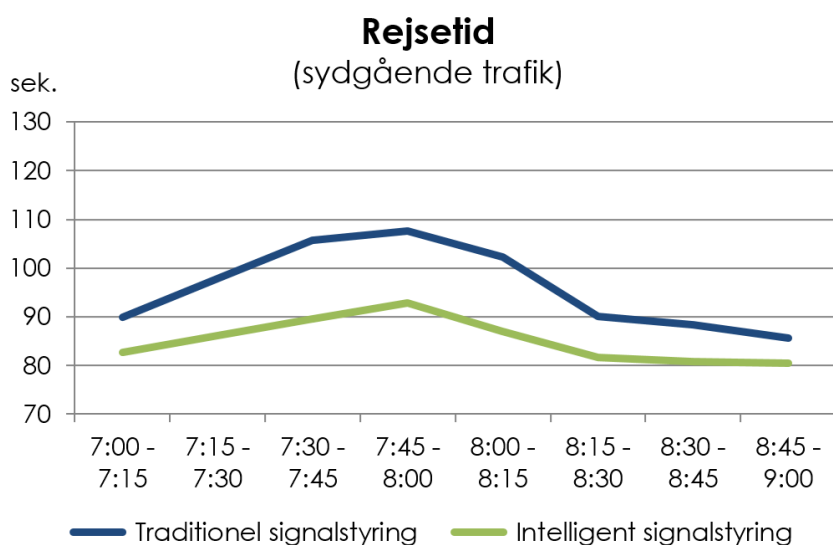
**Tablet 3:** Middelforsinkelsen i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Køddannelserne i krydsets respektive tilfarter reduceres ligeledes, som fremgår af tabel 4. Af tabellen ses det, at kølængderne for enkelte trafikstrømme er omkring 200 meter med den traditionelle signalstyring. Kølængderne reduceres dog betydeligt ved anvendelse af den intelligente signalstyring, hvor kølængderne i gennemsnit reduceres med 64,1 %, hvilket svarer til over 44 meter. Hvad der også er bemærkelsesværdigt er, at kølængderne i samtlige tilfartsspor reduceres. Dette skyldes blandt andet de førømtalte uhensigtsmæssigheder med grøntidsfordelingen samt indkobling af svingfaser, hvilket afhjælpes med den intelligente signalstyring.

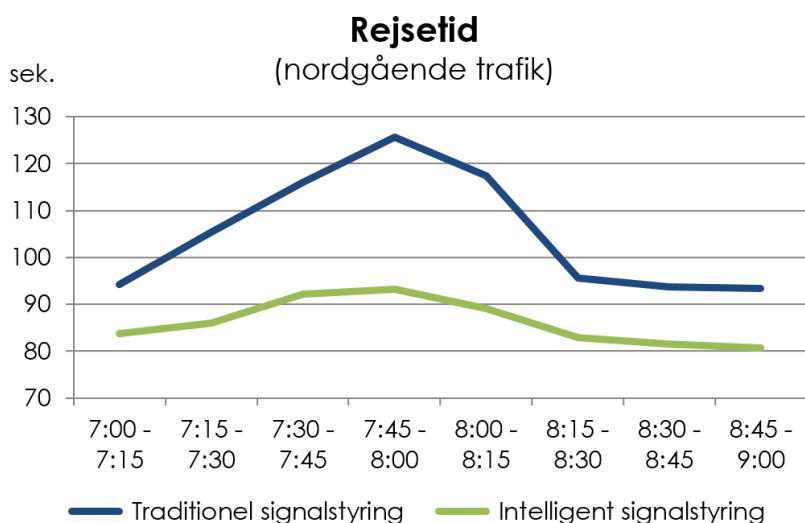
Køllængde, 95 %-fraktil		(Hobrovej / Ny Kærvej)				
Trafikstrøm		Traditionel signalstyring	Intelligent signalstyring	Antal	Effekt	
Fra	Til	[m]	[m]	[kt.]	Absolut [m]	Relativ [%]
Hobrovej S	Hobrovej N	86,6	39,1	1819	-47,5	-54,8
Ny Kærvej	Vestre Allé	41,2	16,5	340	-24,6	-59,8
Ny Kærvej	Hobrovej S	18,0	11,8	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
<b>Vægtet gennemsnit</b>		<b>69,6</b>	<b>24,9</b>	<b>5495</b>	<b>-44,6</b>	<b>-64,1</b>

**Tablet 4:** Køllængden i de respektive tilfartsspor med henholdsvis den traditionelle og intelligente signalstyring samt den absolutte og relative effekt i krydset Hobrovej / Ny Kærvej.

Foruden effekten af den intelligente signalstyring i det enkelte signalanlæg ønskes effekten også kendt på en strækning med flere signalanlæg. I sådanne tilfælde forventes den intelligente signalstyring at kunne realisere en adaptiv signalstyring i realtid, som et alternativ til en traditionelsamordning. Derfor er der foretaget rejsetidsmålinger, hvor disse er sammenholdt på figur 8 for den sydgående trafik. Rejsetiden reduceres således med 5 til 16 sekunder for trafikanter, som gennemkører de fire signalregulerede kryds. Omregnet til rejsehastighed bevirker den adaptive signalstyring, at denne hæves fra 37,7 km/t til 42,7 km/t, hvilket svarer til knap 13 %. For den nordgående trafik er effekten mere markant, hvilket fremgår af figur 9. 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 %. Derved kan det dokumenteres, at den intelligente signalstyring ved anvendelse i flere tætliggende kryds tilvejebringer en adaptiv signalstyring i realtid, som realiserer en markant bedre trafikafvikling sammenholdt med en traditionel samordning.

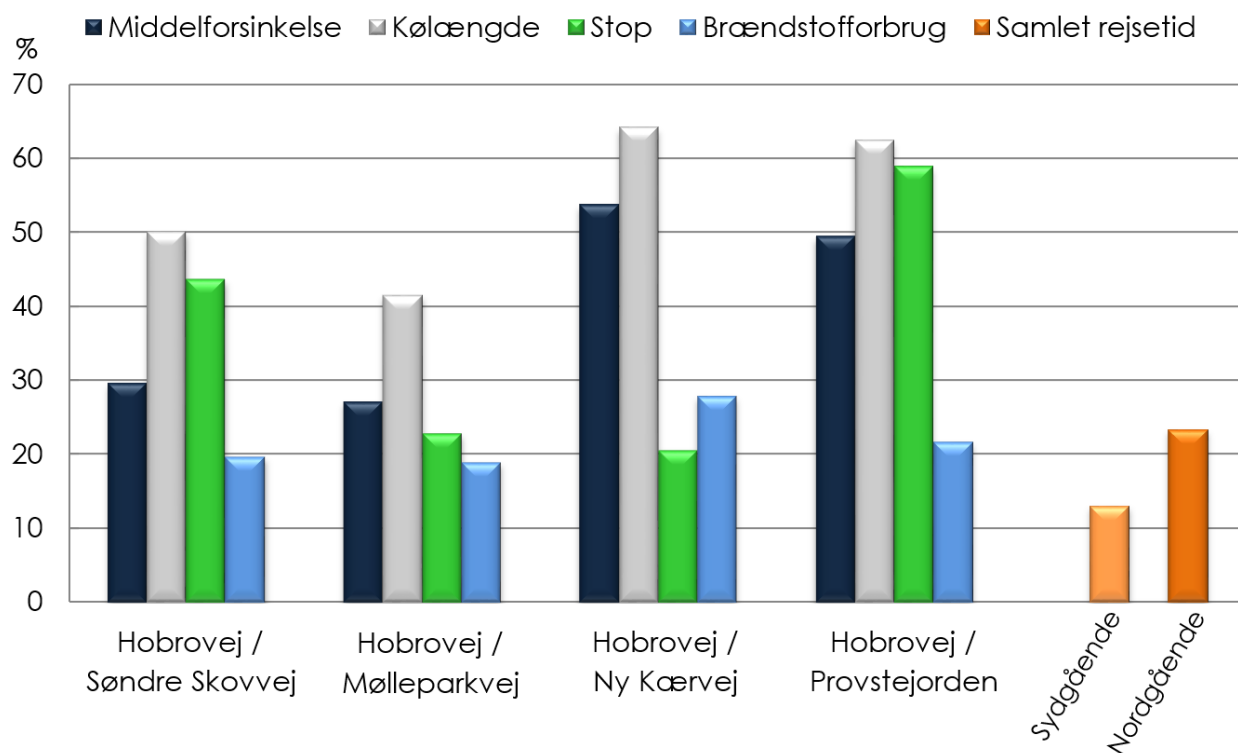


**Figur 8:** Den overordnede rejsetid i sydgående retning med henholdsvis den traditionelle signalstyring og den intelligente signalstyring i morgenmyldretiden.



**Figur 9:** Den overordnede rejsetid i nordgående retning med henholdsvis den traditionelle signalstyring og den intelligente signalstyring i morgenmyldretiden.

De konkrete effekter ved den intelligente signalstyring er samlet i figur 10, 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 intelligente signalstyring 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 10:** De reducerede effekter ved anvendelse af den intelligente signalstyring i forhold til parametrene middelforsinkelse, kølængde, stop, brændstofforbrug samt den samlede rejsetid i nord- og sydgående retning på Hobrovej.

For at gøre effekterne af den intelligente signalstyring mere konkrete foretages en samfundsøkonomisk beregning med udgangspunkt i vejledende materiale fra Transport-, Bygnings-, og Boligministeriet [2017]. I selve beregningen medtages tids- og brændstofgevinsten. Den samfundsøkonomiske beregning er naturligvis forbundet med stor usikkerhed og bør betragtes som et forsigtigt estimat. Selvom der kun foreligger resultater af effekterne af den intelligente signalstyring i morgenmyldretiden forventes effekten at være tilsvarende i eftermiddagsmyldretiden. I øvrige tidsrum forudsættes effekterne som minimum at være tilsvarende, da unødigt ventetid for rødt i trafiksvage perioder kan elimineres. Derfor forudsættes effekten at være ens over hele døgnet året rundt. Med udgangspunkt i Vejdirektoratets vejledning *Trafiktælling – Planlægning, udførelse og efterbehandling* [Vejdirektoratet, 2006], udgør trafikken i tidsrummet 7:00-9:00 19 % af årsdøgntrafikken, hvorfor trafikken kan opskrives. Den samfundsøkonomisk beregning inklusiv forudsætninger fremgår således af tabel 5, mens den estimerede gevinster fremgår af figur 11.

Samfundsøkonomisk beregning	
<b>Forudsætninger</b>	
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.
<b>Reduceret tidsomkostning</b>	
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.
<b>Reduceret brændstofomkostning</b>	
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.
<b>Årlig samfundsøkonomisk gevinst</b>	<b>9.658.709 kr.</b>

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

Den intelligente signalstyring i de 4 kryds forventes således at kunne reducere de samfundsmæssige omkostninger med over 9,6 mio. kr. årligt. Etableringen af den intelligente signalstyring skønnes forsigtigt at beløbe sig til et femcifret beløb pr. signalreguleret kryds. Set i forhold til de forventede gevinster vurderes rentabiliteten at være høj sammenholdt med øvrige optimeringer af infrastrukturen.



**Figur 11:** De estimerede årlige gevinster afledt af den intelligente signalstyring.

## Konklusion

Resultatbehandlingen dokumenterer, at den intelligente signalstyring har en effekt i forhold til parametrene middelforsinkelse, kødannelse, antal stop, brændstofforbrug samt den overordnede rejsetid på Hobrovej. Foruden optimeringspotentialets eksistens er størrelsesorden af dette også belyst. Overordnet set forbedres samtlige parametre i de 4 signalregulerede kryds. Derudover forbedres rejsetiden også mærkbart på strækningen, da den gennemsnitlige rejsehastighed er øget betydeligt. Helt konkret viser simuleringresultaterne, 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 med 23 % og 13 % i henholdsvis nord- og sydgående retning.

## Fremtidsperspektiver

Projektets forventes at udvikle sig i to retninger i fremtiden. En forskningsmæssigt retning samt en forventet kommerialisering.

Set fra et forskningsmæssigt perspektiv forventes projektet at udvikle sig i følgende retninger:

1. Analyse af effekt ved central signalstyring (modsat den eksisterende decentrale signalstyring).
2. Analyse af effekt med forskellige prioriteringer.

Det forventes at kommunikation mellem de enkelte intelligente signalanlæg vil øge effekten yderligere. Denne forventning skyldes, at kommunikationen i mellem de enkelte signalanlæg vil øge datamængden, hvilket giver kontrolløren mulighed for at vælge en global optimal signalstyring af trafik afviklingen for samtlige kryds i stedet for lokal optimering i det enkelte kryds.

I nogle tilfælde ønskes en hård prioritering, eksempelvis at den kollektive transport. Et eksempel herpå kunne være +Bussen i Aalborg, hvor planen er at denne altid skal have grønt lys gennem byen. Det er derfor interessant at undersøge, hvordan denne type af krav påvirker traditionelle principper samt hvordan det påvirker effekten af den intelligente signalstyring.

I projektets næste fase skal den intelligente signalstyring afprøves i et reelt kryds i et bynært område. Efter aftale med Aarhus Kommune skal den intelligente signalstyring testes i krydset Grenåvej / Egå Havvej i Aarhus, hvilket forventes at ske i løbet af efteråret 2017, hvortil der efterfølgende vil være en evaluering. Dette vil give mulighed for at dokumentere den konkrete effekt af den intelligente signalstyring.

## Litteraturliste

DiCyPS, 2017. [www.dicyps.dk](http://www.dicyps.dk)

Mastra, 2017. [www.kmastra.dk](http://www.kmastra.dk)

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

Stratego, 2015. Alexandre David, Peter Gjørl Jensen, Kim Guldstrand Larsen, Marius Mikučionis and Jakob Haahr Taankvist. **Uppaal Stratego**. 21<sup>st</sup> International Conference on *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems* (TACAS), 2015.

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

<http://www.modelcenter.transport.dtu.dk/Noegletal/Transportoekonomiske-Enhedspriser>

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

Vejdirektoratet, 2006. Trafiktællinger – Planlægning, udførelse og efterbehandling. Vejdirektoratet, Vej og trafikområdet. ISBN 87-7923-877-7.

Vejdirektoratet, 2012. Konsekvenser for trafikanter og samfund – Bedre trafiksignaler. Vejdirektoratet. ISBN: 9788770606721