NTNU
Det skapende universitet

Utvikling av et FPGA-basert system for emulering av CMOS digitalkamera med programmerbart signal-støy-forhold

Rune Bergh Nilssen

Master i elektronikk
Oppgaven levert: Juni 2010
Hovedveileder: Bjørn B. Larsen, IET
Biveileder(e): Johannes Solhusvik, Aptina Norway AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elektronikk og telekommunikasjon

Oppgavetekst

Oppgaven består i å bygge et FPGA-basert system som
genererer bildedata (bilde med overlagret støy) som emulerer output fra en A/D-omformer i en CMOS bildesensorbrikke. Emulatoren genererer farge eller monokrom pikselverdier med programmerbar oppløsning (VGA, HDTV, true HDTV) og programmerbar hastighet (25, 30, 50 og 60 rammer/sekund). Emulatoren skal brukes til verisering av RTL-design i CMOS bildesensor-produkter.

Oppgaven gitt: 15. januar 2010
Hovedveileder: Bjørn B. Larsen, IET

Sammendrag

Denne oppgaven er stilt av Aptina Norway AS og tar for seg utviklingen av et FPGA-basert system for emulering av output fra en A/D-omformer i en CMOS-bildesensor. Dette systemet er ment å benyttes til verifisering av RTL-design til CMOS-bildesensorprodukter. Emulatoren bruker en tilnærming til normalfordelingen for å emulere foton-, rad- og kolonnestøy, og kan kjøre på frekvenser opp til 124.81 MHz. Dette gjør at emulatoren kan behandle 60 bilder i sekundet med full HD-oppløsning. Systemet lar brukeren bestemme oppløsning, støytyper og eventuelt standardavvikene til rad- og kolonnestøyen ved oppstart. Hastigheten bestemmes av frekvensen på klokken som påtrykkes. Simuleringene og testene som er utført viser at emulatoren gir et resultat som er visuelt likt reell foton-, rad- og kolonnestøy, men støyfordelingene er noe kunstige og kan forårsake uventede artifakter i bildene.

Innhold

Figurer

Tabeller

Forkortelser

A/D	Analog til Digital
APS	Active Pixel Sensor
CCD	Charged-Coupled Device
CDS	Correlated Double Sampling
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DIP	Dual In-line Package
DPS	Digital Pixel Sensor
DSC	Digital Still Camera
DSLR	Digital Single-Lens Reflex camera
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FPN	Fixed-Pattern Noise
FSM	Finite State Machine
LED	Light-Emitting Diode
LFSR	Linear Feedback Shift Register
LSB	Least Significant Bit
MAE	Mean Absolute Error
MSB	Most Significant Bit
MSE	Mean Squared Error
PGA	Programmable Gain Amplifier
PPS	Passive Pixel Sensor
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
RAM	Random-Access Memory

RMS	Root Mean Square
RNG	Random Number Generator
ROM	Read-Only Memory
RTL	Register Transfer Level
RTS	Random Telegraph Signal
SNR	Signal-to-Noise Ratio
URNG	Uniform Random Number Generator

Kapittel 1

Introduksjon

Tidligere ble CMOS-bildebrikker kun benyttet i lavkostnadsapplikasjoner, fordi den optiske ytelsen ikke var god nok til at sensorene kunne benyttes i applikasjoner som setter strengere krav til kvaliteten. Dagens CMOS-bildebrikker har kommet til et nivå hvor den optiske ytelsen er sammenlignbar med den til CCD-bildebrikker. Dette gjør CMOS til et attraktivt alternativ, særlig på grunn av lavere produksjonskostnader, lavere effektforbruk og enklerer integrasjon, sammenlignet med CCD-bildebrikker.

Aptina er en aktør som utvikler forskjellige typer CMOS-bildesensorer og bildeprosessorer, med ulike oppløsninger og hastigheter. De ønsket et system for å verifisere RTL-design til CMOS-bildesensorprodukter, hvor man kan endre hastigheten, oppløsningen og SNRen til sensoren. Med et slikt system vil man kunne teste RTL-design til forskjellige typer sensorer uten at man trenger å ha disse sensorene for hånden. Denne oppgaven går ut på å utvikle et FPGA-basert system som emulerer output fra en A/D-omformer i en CMOS-bildesensor, som kan benyttes til dette formålet. Systemet som skal utvikles må derfor ha programmerbar oppløsning, hastighet og SNR.

Kapittel 2

Teori

Dette kapittelet starter med å fortelle litt generelt om bildebrikker før det går mer inn på CMOS-bildebrikker. Deretter kommer det en seksjon som forteller om typisk støy i CMOS-bildebrikker før de viktige godhetstallene dynamisk område og SNR til bildebrikker presenteres. Kapittelet avsluttes med en kort forklaring av PSNR, MAE og MSE som forteller noe kvaliteten på et bilde i forhold til et referansebilde.

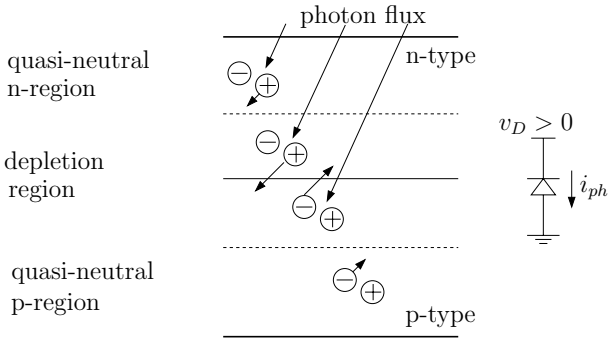
2.1 Bildebrikker

Alle digitalkameraer innholder det vi kaller en bildebrikke (solid state image sensor). En bildebrikke består av $n \times m$ piksler, fra 320×240 til 7000×9000 (benyttes til astronomiske observasjoner) [1]. Hver piksel inneholder en fotocelle og en utlesningskrets. Pikselstørrelsen varierer fra $15\mu m \times 15\mu m$ ned til $3\mu m \times 3\mu m$, hvor minimum pikselstørrelse er begrenset av det dynamiske området og optikkostnader [1]. Hvor stor andel av arealet til pikselet som opptas av fotocellen kalles fyllingsgraden, og varierer fra 0,2 til 0,9. En høy fyllingsgrad er alltid ønskelig.

Fotocellen konverterer innkommende strålingseffekt (fotoner/s) til en fotostrøm som er proporsjonal med strålingseffekten [2]. Det finnes flere typer fotoceller, men de vanligste er fotodioden og fototransistoren. En fotodiode er satt sammen av en p-type halvleder og en n-type halvleder, og det er grenseområdet mellom disse, pn-overgangen, som er den aktive delen av dioden [3]. Normalt vil en diode kun lede strøm når den påtrykkes en spenning slik at p-siden blir positiv og n-siden negativ. Da vil frie elektroner fra n-siden bevege seg inn på p-siden, mens hull fra p-siden vil bevege seg inn på n-siden. Men når en fotodiode belyses i området rundt pn-overgangen vil det genereres elektronhullpar, og vi får frie elektroner i p-siden og frie hull i n-siden. Dioden vil dermed lede strøm i sperreretningen.

Figur 2.1 viser hvordan det genereres en fotostrøm i en reversforspent fotodiode [4]. Fotostrømmen, i_{ph}, er summen av tre komponenter: i_{ph}^{sc} - strøm som genereres i metningsområdet (space charge region), i_{ph}^{p} - strøm som følge av generering av hull i det kvasi-nøytrale n-type området, og i_{ph}^{n} - strøm som følge av generering av elektroner i p-type området [1]. Den totale genererte fotostrømmen er dermed:

$$i_{ph} = i_{ph}^{sc} + i_{ph}^{p} + i_{ph}^{n} \tag{2.1}$$



Figur 2.1: Generering av fotostrøm i en reversforspent fotodiode

Fotocellens mørkestrøm i_{dc} er en lekasjestrøm. Den kalles mørkestrøm fordi den korresponderer med den fotostrømmen man har når fotocellen ikke er under belysning. Mørkestrøm kommer av defekter i silisiumet, og begrenser det dynamiske området til fotocellen, da den reduserer signalsvinget og introduserer haglstøy [1].

2.1.1 Støy i bildebrikker

Bildesensorer er i grunnen elektroniske, analoge kretser. Og i likhet med alle slike kretser er støy et problem [5]. Støy i en bildesensor kan defineres som en hver signalvariasjon som forverrer bildekvaliteten [6].

En bildesensor for stillbilder reproduserer todimensjonal bildeinformasjon. Støy som forekommer i faste romlige posisjoner i et reprodusert bilde, kalles gjerne fixed-pattern noise (FPN), mens støy som varierer med tiden gjerne kalles tilfeldig eller tidsvarierende støy. Det er ikke mulig å skille FPN fra tidsvarierende støy utifra ett stillbilde, men en sekvens med stillbilder vil kunne vise at den tidsvarierende støyen varierer fra bilde til bilde. Denne rapporten vil fokusere på tidsvarierende støy da emulatoren som er designet ikke emulerer noen form for FPN.

2.1.2 Tidsvarierende støy

Tidsvarierende støy er en tilfeldig variasjon i signalet som svinger over tid. Når signalet av interesse svinger rundt sin gjennomsnittverdi, som man antar er konstant, er variansen definert som

$$\text{Varians} = \langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle = \langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2 \tag{2.2}$$

hvor $\langle\rangle$ uttrykker det statistiske gjennomsnittet, som er et gjennomsnitt av en kvantitet over en tidsperiode, t, fra et sett av stikkprøver [6].

Variansen til et signal samsvarer med den totale støyeffekten til signalet. Når det eksisterer flere ukorrelerte støykilder, er den totale støyeffekten gitt av [6]

$$\langle n_{total}^2 \rangle = \langle \sum_{i=1}^{N} n_i^2 \rangle \tag{2.3}$$

Fra sentralgrenseteoremet vet man at sannsynlighetsfordelingen til en sum av uavhengige, tilfeldige variabler går mot en normalfordeling, Gausskurven, når antall

tilfeldige variabler går mot uendelig [7]. Normalfordelingen er gitt av

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{2.4}$$

hvor m er middelverdien eller gjennomsnittet og σ er standardavviket eller effektivverdien (RMS-verdien) til variabelen x. I dette tilfellet kan standardavviket, σ, brukes som et mål på tidsvarierende støy [6].

Det finnes tre typer fundamentale tidsvarierende støymekanismer i optiske og elektroniske systemer: termisk støy, haglstøy (shot noise) og $1/f$-støy (flicker noise).

2.1.2.1 Termisk støy

Termisk støy, også kjent som Johnson-Nyquist-støy [8], [9], skyldes vibrasjoner av ladningsbærere (som regel elektroner) i en elektronisk komponent. Dette fenomenet opptrer selv uten en påtrykt spenning. Effektspektraltettheten til termisk støy er gitt av

$$S_V(f) = 4kTR \ \ [\mathrm{V}^2/\mathrm{Hz}] \tag{2.5}$$

hvor k er Boltzmans konstant, T er absolutt temperatur og R er resistansen.

2.1.2.2 Haglstøy

Haglstøy genereres når det går en strøm gjennom et elektronrør eller en halvleder, og skyldes at antall ladningsbærere fluktuerer etter visse regler, statistisk, fra øyeblikk til øyeblikk [10]. I bildebrikker assosieres haglstøy med innkommende fotoner og mørkestrøm [6]. Statistiske studier av haglstøyen har vist at sannsynligheten for at N partikler, som fotoner eller elektroner, emitteres i et gitt tidsintervall, er gitt av Poissonfordelingen som kan representeres som

$$P_N = \frac{(\bar{N})^N \cdot e^{-\bar{N}}}{N!} \tag{2.6}$$

hvor N og $\bar{N}$ er henholdsvis antall partikler og gjennomsnittet [6]. Poissonfordelingen har den interessante egenskapen at variansen er lik gjennomsnittsverdien, eller

$$n_{shot}^2 = \langle (N - \bar{N})^2 \rangle = \bar{N} \tag{2.7}$$

Effektspektraltettheten til termisk støy og haglstøy er konstant over alle frekvenser. Denne type støy kalles "hvit støy", en analogi til hvitt lys som har en flat effektfordeling i det visuelle spektrum [6].

2.1.2.3 1/f-støy

Effektspektraltettheten til $1/f$-støy er proporsjonal med $1/f^\gamma$, hvor γ er ca èn [6]. Utgangsforsterkerne i bildebrikker har problemer med $1/f$-støy ved lave frekvenser, men støyen er for det meste undertrykket av "correlated double sampling"(CDS), så lenge CDS-operasjonen utføres slik at intervallet mellom to sampler er kort nok til at $1/f$-støyen kan sees på som en offset [6].

2.1.3 CMOS vs. CCD

CMOS-bildebrikker dukket opp så tidlig som i 1967, men etter oppfinnelsen av CCD i 1970 [5] dominerte denne teknologien markedet for bildegjengivende detektorer [11]. Årsaken til at CCD ble den herskende teknologien var et overlegent dynamisk område, lavere FPN, mindre pikselstørrelse og større lyssensitivitet [12].

På begynnelsen av 1990-tallet ble CMOS-bildebrikker igjen et alternativ til CCD på grunn av fordeler som lavt effektforbruk, lave kostnader, "on-chip"-funksjonalitet og stor frihet i valg av utlesningsarkitektur [11]. Første generasjons CMOS-bildebrikker benyttet passive pikselsensorer (se kapittel 2.2.1), men ved å sette inn en forsterker per kolonne eller per rad oppnår man en mye bedre SNR for fotodioden. Derfor begynte man å benytte sensorer som implementerer et buffer som oppfører seg som en enkel "source follower" per piksel. Denne typen sensor er blitt kjent som en aktiv pikselsensor, og representerer andre generasjon av CMOS-bildebrikker [11].

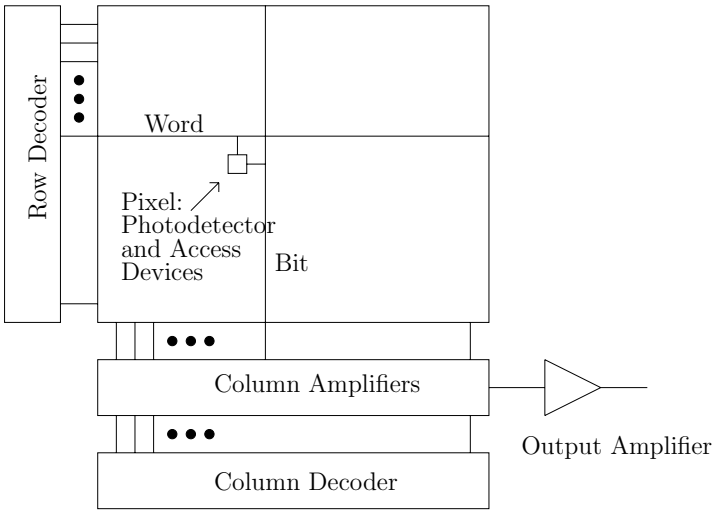
Mobiltelefoner, videokameraer og DSLR-kameraer har alle begynt å benytte CMOS-bildebrikker. Spesielt mobiltelefoner har blitt en viktig applikasjon. CMOS-bildebrikker med høy megapikseloppløsning har blitt utviklet slik at hvem som helst kan nyte å ta stillbilder med mobiltelefonen [13]. Til tross for at CMOS-bildebrikkene har erstattet CCD-bildebrikker i mange applikasjoner, er det fortsatt etterspørsel etter CCD-bildebrikker i høyoppløselige DSCs med høy bildekvalitet. Dette er fordi sensitiviteten til de små pikslene i CCDene er høyere enn de i CMOS-bildebrikkene. Men selv på dette området kan CMOS-bildebrikker snart erstatte CCDer, når CMOS-bildebrikkene nå er i ferd med å overgå menneskesynet, ved å realisere både høy oppløsning og høyhastighets ytelse [13].

CCD	CMOS
Lavere støy	Lavt effektforbruk
Mindre pikselstørrelse	Singel strømforsyning
Mindre mørkestrøm	Høy integreringsmulighet
100% fyllingsgrad	Lavere kostnader
Høy sensitivitet	Singel masterklokke

Tabell 2.1: Hovedfordelene med CCD- og CMOS-bildebrikker

2.2 CMOS-bildebrikker

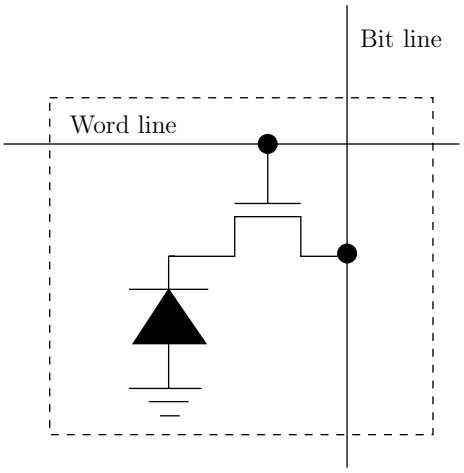
CMOS-bildebrikker framstilles ved å bruke standard CMOS-prosesser med små eller ingen modifikasjoner. Pikslene adresseres gjennom en horisontal ord-linje og ladningen eller spenningen leses ut fra hvert piksel gjennom en vertikal bit-linje. Utlesningen foregår ved å overføre en rad av gangen til kolonnelagringskondensatorene, for deretter å lese ut raden ved hjelp av en kolonnedekoder og en multiplekser. Figur 2.2 viser en CMOS-bildebrikkearkitektur. Det finnes tre pikselarkitekturer: Passiv piksel (PPS), aktiv piksel (APS) og digitalt piksel (DPS).



Figur 2.2: Blokkdiagram av en CMOS-bildesensor

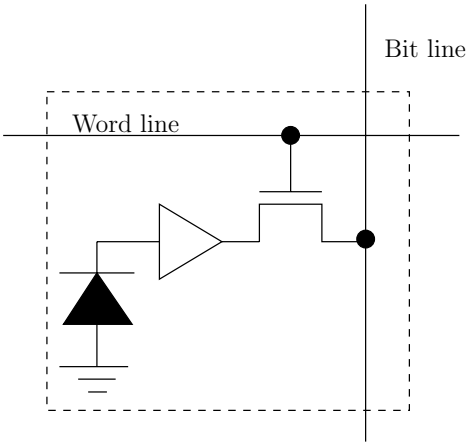
2.2.1 Passiv og aktiv pikselsensor

En passiv pikselsensor har bare en transistor per piksel som vist i figur 2.3. PPS har en liten pikselstørrelse og en høy fyllingsgrad, men ulempene er lav utlesningshastighet og lav SNR. Utlesningshastigheten til PPS er begrenset av tiden det tar å overføre en rad til utgangen av ladningsforsterkerne [1].



Figur 2.3: Passiv pikselsensor

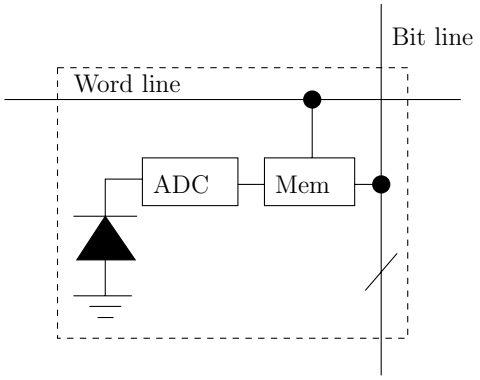
En aktiv pikselsensor har normalt tre eller fire transistorer per piksel, hvor en av transistorene fungerer som buffer og forsterker. Figur 2.4 viser hvordan utgangen til fotodioden bufres ved hjelp av en "pixel level follower"-forsterker. Sammenlignet med PPS har APS større pikselstørrelse og lavere fyllingsgrad, men utlesingen er kjappere og den har høyere SNR [1].



Figur 2.4: Aktiv pikselsensor

2.2.2 Digital pikselsensor

I en digital pikselsensor har hver piksel en egen analog til digital-omformer (A/D-omformer). A/D-omformerne jobber parallelt, og digitale data som lagres i minnet leses direkte ut av pikselsensorene som i et konvensjonelt digitalt minne (se figur 2.5).



Figur 2.5: Digital pikselsensor

En DSP-arkitektur har flere fordeler sammenlignet med analoge bildesensorer som APS og PPS. Blant disse fordelene er bedret skalering med CMOS-teknologien på grunn av reduserte krav til den analoge delen av kretsen, og eliminering av utlesningsrelatert kolonnestøy. Med en A/D-omformer og minne i hver piksel blir det praktisk med massiv parallell "snapshot"-avbildning, A/D-omforming og høyhastighetsutlesning, og de analoge flaskehalsene A/D-omforming og utlesning elimineres [1].

2.3 Støy i CMOS-bildebrikker

CMOS-bildebrikker påvirkes av forskjellige støykilder som setter fundamentale begrensninger på ytelsen, spesielt ved lav belysning og i videoapplikasjoner [14]. Poten-

sielle støykilder er til stede fra fotodioden i sensoren gjennom kolonneforsterkerne, PGAene (Programmable Gain Amplifier) og A/D-omformerne [15].

2.3.1 FPN

FPN har vært en stor begrensning ved CMOS-bildebrikker. FPN er den fikserte variasjonen i utgangssignalet når man påtrykker et uniformt inngangssignal [11]. I en perfekt bildesensor vil alle pikslene ha samme utgangsverdi ved samme belysning, men slik er det ikke i realiteten. FPN varierer ikke med tiden, men dersom man antar at en lineær pikselrespons, kan den karakteriseres som en variasjon i offset og forsterkning i hver piksel [11]. Eller sagt på en annen måte:

$$V_{ij}(t) = G_{ij}X_{ij}(t) + O_{ij} \tag{2.8}$$

Her er V_{ij} utgangssignalet, G_{ij} er forsterkningen, X_{ij} er inngangssignalet mens O_{ij} er offseten til pikselen i posisjon (i, j).

FPN oppstår på grunn av mistilpasning i piksel og fargefiltre, variasjoner i kolonneforsterkere og mistilpasning mellom flere PGAer og A/D-omformere. FPN kan være enten koherent eller ikke-koherent [15].

2.3.2 Tidsvarierende støy

Tidsvarierende støy er en tidsavhengig variasjon i signalet og kan oppstå i pikselen, kolonneforsterkerne, PGAene og A/D-omformerne [15]. Eksempler på tidsvarierende støy er kTC-støy, Johnson-støy, 1/f-støy, RTS-støy (Random Telegraph Signal), mørkestrøm, fotonstøy, strømforsyningsstøy, fasestøy og kvantiseringsstøy [16].

2.3.2.1 Pikselstøy

Fotonstøy, kTC-støy, mørkestrøm og MOS-støy er blandt støykildene i pikselen.

Fotonstøy oppstår som en følge av statistiske variasjoner i antall innfallende fotoner i eksponeringstiden [16]. Dette er en stokastisk prosess som kan beskrives ved hjelp av Poisson-statistikk. Dersom en piksel motter en mengde fotoner, lik μ_{ph} i eksponeringsperioden, da er denne verdien gjennomsnittsverdien som også kan karakteriseres med en støykomponent σ_{ph}, som representerer fotonstøyen [16]. Relasjonen mellom gjennomsnittsverdien μ_{ph} og dens assosierte støy σ_{ph} er gitt av

$$\sigma_{ph} = \sqrt{\mu_{ph}}. \tag{2.9}$$

Etter at de innfallende fotonene er absorbert inn i silisiumet, resulterer strømmen av μ_{ph} fotoner i μ_e elektroner i hver piksel, karakterisert av en støykomponent σ_e, som har den samme rot-relasjonen [16].

Signalet som integreres i en piksel måles relativt til dens reset-nivå. Usikkerheten knyttet til dette nivået på grunn av termisk støy kalles reset-støy eller kTC-støy [15]. Reset-arkitekturen kan kontrueres slik at denne typen støy stort sett blir borte, enten ved hjelp av CDS-teknikker eller ved å bruke enveis MOS-reset-svitsjer i pikselen [15].

Mørkestrøm assosiert med lekasjestrøm i fotodioden, $I(dark)$, er veldig avhengig av eksponeringsperioden og er gitt av:

$$Noise = \frac{q}{C(pixel)} \times \sqrt{\frac{I(dark) \times \tau}{q}} \ [V] \tag{2.10}$$

hvor $C(pixel)$ er den totale pikselkapasitansen og q er elektronladningen [15]. De beste CMOS-prosessene har som regel ekstremt lav mørkestrøm for å oppnå best mulig bildekvalitet [15].

Hovedkilden til forsterkerstøy i pikslene er termisk og 1/f-støy i MOS-transistorene [15]. 1/f-støy kan stort sett elimineres ved hjelp av hurtig dobbelsampling av pikselen. Termisk støy kan også stort sett elimineres ved å begrense båndbredden til forsterkerne i pikslene.

2.3.2.2 Kolonneforsterkerstøy

Kolonneforsterkerne sampler reset og signalnivået til pikslene og bufrer eller forsterker deretter differansesignalet. De største støykildene i denne prosessen er kTC-støy assosiert med samplingsprosessen, og termisk og 1/f-støy i MOS-transistorene til forsterkeren [15].

De to ukorrelerte samplingsoperasjonene av resetnivået og signalet resulterer i et termisk støysignal som er gitt av

$$Noise = \sqrt{\frac{2kT}{C(Column)}} \ [V] \tag{2.11}$$

hvor $C(Column)$ er kolonnesamplingskapasitansen, k er Boltzmanns konstant og T er absolutt temperatur [15].

Termisk og 1/f-støy er tilstede i kolonneforsterkernes MOS-transistorer, men effekten av disse er generelt neglisjerbar sammenlignet med kTC-støyen fra samplingsprosessen [15].

2.3.2.3 PGA-støy

Støykildene i PGAene er termisk kTC-støy i forbindelse med samplingsoperasjoner, og termisk og 1/f-støy i forbindelse med forsterkeroperasjonen. Som i kolonneforsterkerne, utføres det vanligvis to ukorrelerte samplingsoperasjoner i PGAene som resulterer i et termisk støysignal gitt av:

$$Noise = \sqrt{\frac{2kT}{C(pga)}} \ [V] \tag{2.12}$$

Termisk og 1/f-støy i MOS-transistorene i forsterkeren kan designes slik at de er mye mindre enn kTC-støyen fra samplingsoperasjonen [15].

2.3.2.4 A/D-omformerstøy

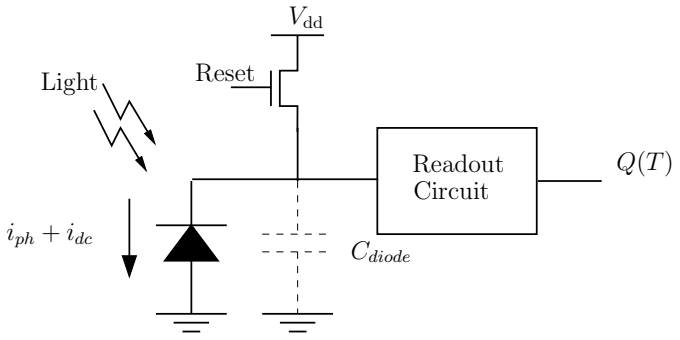
Hovedkilden til støy i A/D-omformerne er kvantiseringsstøy. En ideell A/D-omformers kvantiseringsstøy er gitt av:

$$Noise = \frac{LSB}{\sqrt{12}} = 0.288 \times LSB \tag{2.13}$$

En praktisk A/D-omformer har et støynivå som overgår 0.288 LSB på grunn av andre støykilder som termisk støy, forsterkerstøy og svitsjestøy. I tillegg vil tilfeldig mistilpasning i A/D-omformerkomponenter føre til FPN [15].

2.4 SNR og dynamisk område

Det brukes fortsatt mye ressurser på forskning og utvikling for å forbedre ytelsen til bildesensorer. Man forsøker å forbedre teknologien, optimalisere designet og utvikle nye sensorarkitekturer. Alt for å nå det samme målet, å forbedre signal-til-støy-forholdet (SNR) til en sensor for en gitt applikasjon eller oppløsning [17].



Figur 2.6: CMOS-bildesensor pikselmodell

Figur 2.6 viser en typisk piksel i en CMOS bildebrikke. Fotodioden resettes før begynnelsen av en eksponeringsperiode. Under eksponeringsperioden integreres den genererte fotostrømmen på den parasittiske kapasitansen C_{diode} og ladningen $Q(T)$ (evt. spenningen) leses ut etter eksponeringstiden T. Mørkestrøm og additiv støy integreres også sammen med fotoladningen. Støyen kan uttrykkes som summen av tre uavhengige komponenter [1]:

- Haglstøy $U(T)$, genereres når det går strøm gjennom dioden, tilnærmet Gaussisk $U(T) \sim \mathcal{N}(0, q\int_0^T (i_{ph}(t) + i_{dc})\mathrm{d}t)$ når fotostrømmen er stor nok. Her er q elektronladningen.

- Resetstøy (inkludert FPN), genereres ved resetting, har også en Gaussisk fordeling, $C \sim \mathcal{N}(0, \sigma_C^2)$.

- Utlesningsstøy $V(T)$ (inkludert kvantiseringsstøy) med null i middelverdi og en varians på σ_V^2.

Utgangsladningen fra en piksel kan dermed skrives som

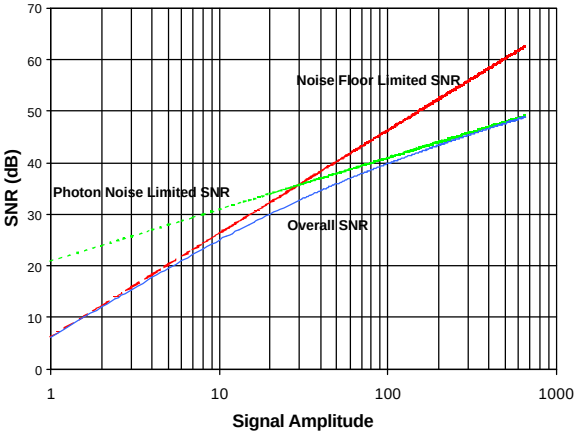
$$Q(T) = \int_0^T (i_{ph}(t) + i_{dc})\mathrm{d}t + U(T) + V(T) + C, \tag{2.14}$$

gitt at $Q(T) \leq Q_{sat}$, brønnkapasiteten (saturation charge) [1].

Dersom fotostrømmen er konstant i eksponeringsperioden, er SNR gitt av [1]

$$\mathrm{SNR}(i_{ph}) = 20\log_{10}\frac{i_{ph}T}{\sqrt{q(i_{ph}+i_{dc})T + \sigma_V^2 + \sigma_C^2}}. \tag{2.15}$$

Likning (2.15) viser at SNRen øker med i_{ph}, først med 20 dB per dekade når resettingsstøy- og utlesningsstøyvariansen dominerer, deretter med 10 dB per dekade når haglstøyvariansen dominerer. Siden SNR også øker med T er det alltid ønskelig med så lang eksponeringstid som mulig, men brønnkapasiteten og endring i fotostrømmen som følge av bevegelse setter en øvre grense for eksponeringstiden. Figur 2.7 viser hvordan SNR endres med signalamplituden [15].



Figur 2.7: SNR kontra signalamplitude

Et annet viktig godhetstall for bildebrikker er det dynamiske området. Det dynamiske området sier noe om bildebrikkens evne til å vise både lyse lys og mørke skygger i en scene. Det er definert som ratioen av den høyeste ikke-mettede fotostrømmen i_{max} til den minste påviselige fotostrømmen i_{min}, typisk definert som standardavviket til støyen ved lav belysning [1]. For en sensor med en brønnkapasitet Q_{sat} er det metningen som begrenser det høyeste signalet, mens det er utlesningsstrømmen som begrenser det minste påviselige signalet. Ved å benytte sensormodellen kan det dynamiske området uttrykkes som [1]

$$DR = 20\log\frac{i_{max}}{i_{min}} = 20\log\frac{Q_{sat}}{\sqrt{qi_{dc}T + \sigma_V^2 + \sigma_C^2}}. \tag{2.16}$$

2.5 PSNR og MAE

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) og Mean Absolute Error (MAE) er de to enkleste og mest brukte kvalitetsmålene på bildekvaliteten til digitale bilder når man har et

referansebilde å sammenligne med [18]. De er tiltalende fordi de er enkle å beregne, har klare fysiske betydninger og er matematisk gunstig med tanke på optimalisering, men de trenger ikke nødvendigvis si så mye om den visuelle kvaliteten. I tillegg til disse benyttes også Mean Squared Error (MSE) som er gitt av

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \tag{2.17}$$

hvor I og K er to $m \times n$ monokrome bilder, og et av de er en tilnærming til det andre med støy. PSNR beregnes ved hjelp av MSE og er gitt av

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \tag{2.18}$$

Her er MAX_I maksverdien til en piksel, og vil med 8-bits pikselverdier være lik 255. MAE er gitt av

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |f_i - y_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |e_i| \tag{2.19}$$

Som navnet tilsier er MAE et gjennomsnitt av de absolutte feilene $e_i = f_i - y_i$, hvor f_i er pikselverdi med støy mens y_i er den riktige pikselverdien.

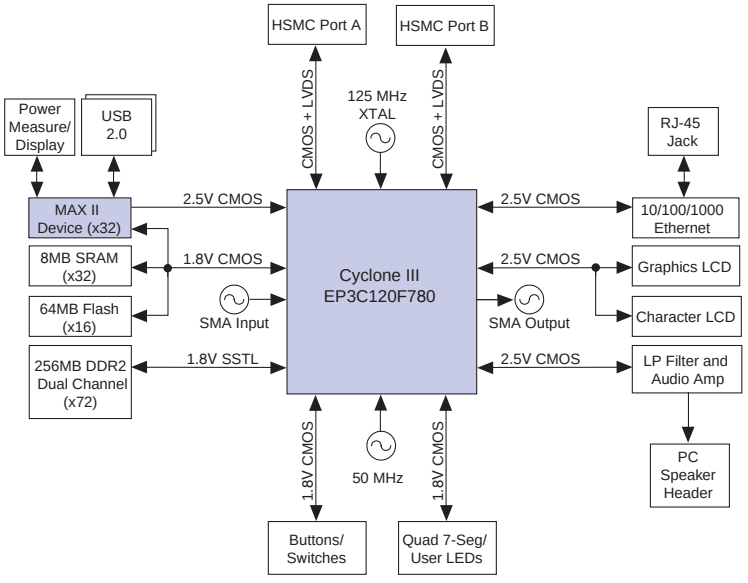
Kapittel 3

Metode

Dette kapittelet tar først for seg litt om Matlabsimuleringene som ble brukt i starten av utviklingen av systemet. Videre beskrives utstyret og programvaren som er brukt til å utvikle og implementere emulatoren. Deretter følger en beskrivelse av emulatoren som er designet og til slutt en beskrivelse av systemet som er utviklet for å teste emulatoren.

3.1 Matlabsimuleringer

Før de algortimene som er valgt ble implementert i hardware, ble de simulert i Matlab. Resultatet ble sammenlignet med simuleringer av støyen hvor Matlab-funksjonene *poissrnd* og *randn* ble brukt til å generere henholdsvis Poisson- og normalfordelte pseudo-tilfeldige verdier. Når resultatet av simuleringene var tilfredsstillende ble det gått videre med å implementere algoritmene i hardware. Resultatet av simuleringene er i vist i kapittel 4.1, mens Matlab-koden er gjengitt i vedlegg D.

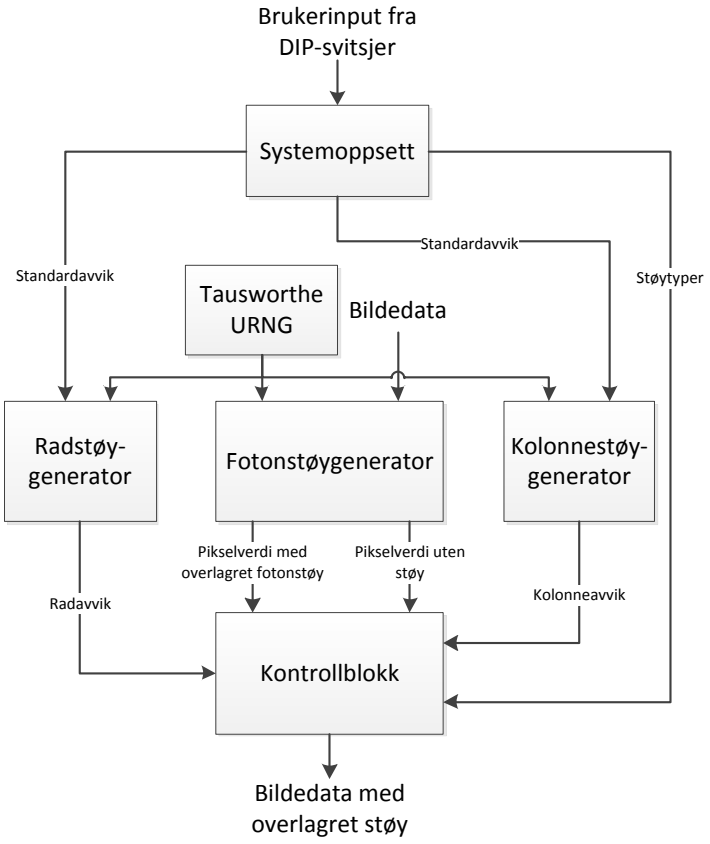


Figur 3.1: Cyclone III FPGA Development-kortets blokkdiagram

3.2 Utstyr og programvare

Systemet er utviklet og testet på *Cyclone III FPGA Development Kit*. Emulatoren er kodet i Verilog, og *Quartus II 9.1 sp1 Web Edition* er benyttet til kompiliering av Verilog-koden, simulering av emulatoren, og for å programmere FPGAen. *Nios II 9.1 sp1 IDE* ble brukt til å kompilere og laste over C-koden som ble brukt til å teste emulatoren.

Testsystemet implementerer en Nios II-prosessor og bruker ekstern DRAM, flash og et Ethernet PHY-grensesnitt, mens det endelige systemet består av DIP-svitsjer og LEDs i tillegg til systemet som er implementert på FPGAen.



Figur 3.2: Overordnet blokkdiagram for systemet.

3.3 Emulatoren

Emulatoren som er designet tar inn en 8-bits pikselverdi, en klokke, et reset-signal og en 8-bits verdi som er koblet til en DIP-svitsj (Dual In-Line Package). Utgangssignalene er en 8-bits pikselverdi med overlagret støy og 8 LEDs som er delt inn i to grupper. DIP-svitsjen og LEDene benyttes i første trinn i støygeneratoren hvor emulatoren settes opp. DIP-svitsjene brukes for å la brukeren sette opp systemet, mens LEDene viser statusen av denne prosessen. Systemet kan deles opp i seks blokker:

1. En del som lar brukeren velge oppløsning, støytype(r) og eventuelt standardavviket til rad- og kolonnestøyen.
2. Tausworthe Uniform Random Number Generator (URNG)
3. Fotonstøygenerator
4. Radstøygenerator
5. Kolonnestøygenerator
6. En kontrollblokk som overlagrer pikseldataen med de typene støy som er valgt og sender det ut.

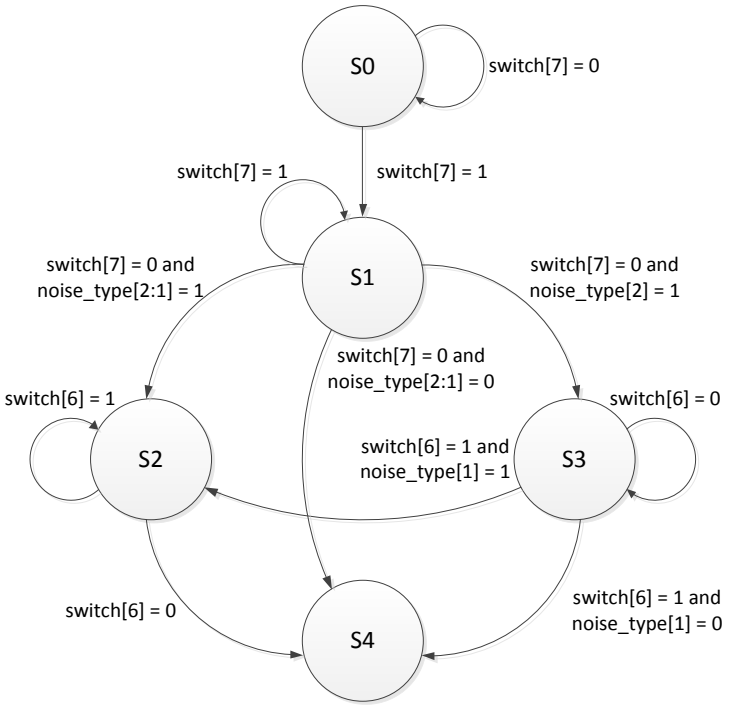
I tillegg til disse hovedblokkene inneholder emulatoren tre tellere som brukes for å holde orden på hvilken rad og kolonne pikselverdien som behandles hører til. Figur 3.2 viser et overordnet blokkdiagram over emulatoren.

3.3.1 Systemoppsett

Den delen av systemet som sørger for at brukeren får velge oppløsning, støytyper og SNR til rad- og kolonnestøyen består i hovedsak av en Finite-State Machine (FSM), hvor input fra DIP-svitsjer avgjør nestetilstanden og bestemmer utgangssignalene. FSMen er med andre ord av type Mealy. FSMen består av følgende tilstander:

- **S0**: Starttilstanden, her settes oppløsningen med DIP-svitsj 1 og 2. DIP-svitsj[2:1]="01" gir VGA-oppløsning, "10" gir 720p (HD), mens "11" setter oppløsningen til 1080p (full HD).
- **S1**: I denne tilstanden velger man støytyper man ønsker å emulere med DIP-svitsj[3:1]. DIP-svitsj 1 er knyttet til fotonstøy, 2 til radstøy og 3 er knyttet til kolonnestøy. Støyen er aktiv når den tilhørende svitsjen er på (=1).
- **S2**: Her settes standardavviket til kolonnestøyen, og følgelig er det en forutsetning at kolonnestøy ble valgt i tilstand S1 for at FSMen kommer til denne tilstanden.
- **S3**: Denne tilstanden gir brukeren muligheten til å velge standardavviket til radstøyen, og slik som med tilstand S2, kreves det at radstøyen ble valgt i tilstand S1 for at FSMen skal nå denne tilstanden.
- **S4**: Når FSMen kommer til denne tilstanden har brukeren valgt oppløsning, støytyper og eventuelt standardavviket til rad- og kolonnestøyen, og det eneste som gjenstår er å sette *enable*-signalet til støygeneratorene høyt.

Figur 3.3 viser tilstandsdiagrammet til FSMen. Den viser hva som kreves for å komme til de forskjellige tilstandene, men det er en overgang fra hver tilstand som er utelatt fra figuren. Dersom *resetn*-signalet går lavt vil nemlig FSMen hoppe til tilstand S0 uavhengig av hvilken tilstand den befinner seg i.



Figur 3.3: Tilstandsdiagram til FSMen.

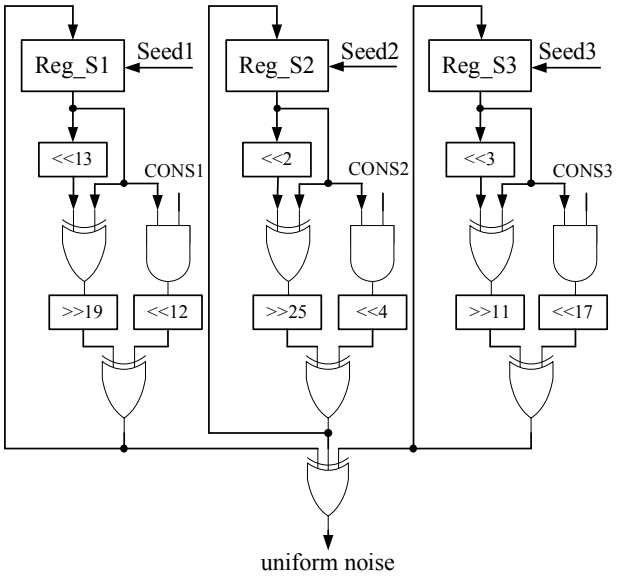
3.3.2 Tausworthe URNG

Det benyttes en Tausworthe URNG til å generere uniformtfordelte pseudo-tilfeldige tall. Vanligvis benyttes Linear Feedback Shift Registers (LFSR) til å generere uniformtfordelte tall i hardware. Selv om tradisjonelle LFSRs er tilstrekkelig til mange bruksområder, har en Tausworthe URNG bedre tilfeldighetskvaliteter med moderate hardware-kostnader [19].

Tausworthe-generatoren kombinerer tre LFSR-baserte URNGs for å oppnå bedre statistiske egenskaper. En generator med en periode $\approx 2^{88}$ er foreslått i [20] og figur 3.4 viser hvordan denne generatoren er implementert i hardware. Generatoren genererer 32-bits verdier som representerer tall mellom 0 og 1. Tabell 3.1 viser de forskjellige konstantene og seed-verdiene generatoren bruker.

Seed 1	0xFFFFFF
Seed 2	0xCCCCCC
Seed 3	0xFF00FF
Konstant 1	0xFFFFFFFE
Konstant 2	0xFFFFFFF8
Konstant 3	0xFFFFFFF0

Tabell 3.1: Seed- og konstantverdier benyttet i Tausworthe URNG.



Figur 3.4: Arkitekturen til en Tausworthe URNG.

3.3.3 Fotonstøygenerator

Fotonstøy kan som tidligere nevnt beskrives ved hjelp av Poisson-statistikk, hvor den støy-frie pikselverdien er forventningsverdien og variansen (se kapittel 2.3.2.1). Standardavviket til den støy-frie pikselverdien er dermed lik roten av pikselverdien.

Poissonfordelingen kan tilnærmes med en normalfordeling hvor forventningsverdien og variansen er lik. Denne tilnærmingen blir bedre ved høyere forventningsverdier. I denne oppgaven er det gått ett skritt lenger og brukt en forenklet "normalfordeling" for å emulere fotonstøy. Støygeneratoren benytter den empiriske regelen (eller 3-sigma-regelen) som sier at omtrent 68 % av verdiene ligger innenfor ett standardavvik, omtrent 95 % av verdiene ligger innenfor to standardavvik og omtrent 99.7 % av verdiene ligger innenfor tre standardavvik i en normalfordeling. Dersom resultatet fra Tausworthe-generatoren er $rnd \leq (2^{32} - 1) \cdot 0.68$ vil utgangsdataen være gitt av

$$output = input \pm \sqrt{input} \cdot rnd. \tag{3.1}$$

$2^{32} - 1$ er maksverdien til *rnd*, og siden *rnd* er uniformt fordelt vil dette sørge for at 68 % av verdiene som genereres vil være innenfor ett standardavvik. Det minst signifikante bitet til *rnd* brukes til å avgjøre om det skal være et negativt eller positivt avvik.

Hvis $(2^{32} - 1) \cdot 0.68 < rnd \leq (2^{32} - 1) \cdot 0.95$ er utgangsdataen gitt av

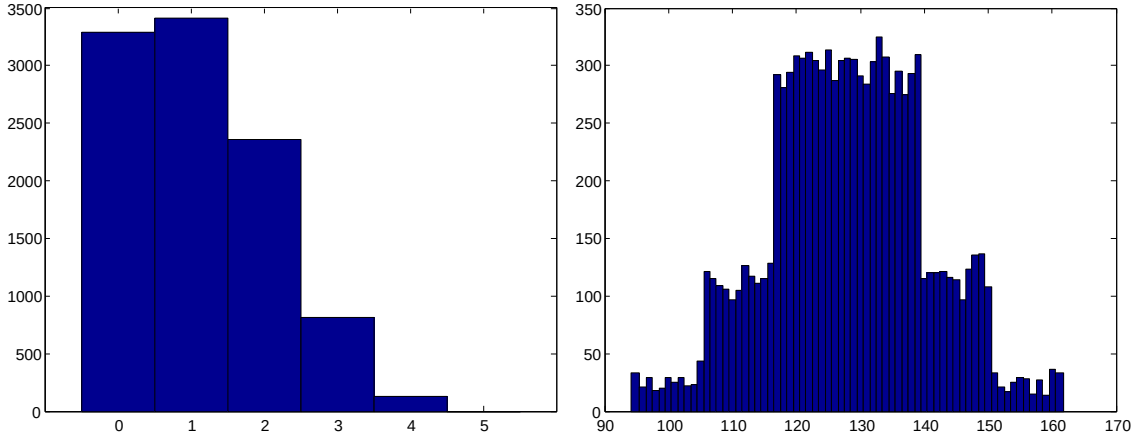
$$output = input \pm \left[\sqrt{input} \cdot rnd + \sqrt{input} \right]. \tag{3.2}$$

Dette gjør at 27 % av verdiene vil ligge mellom ett og to standardavvik fra forventningsverdien, og 95 % vil ligge innenfor to standardavvik.

Når *rnd* er større enn $(2^{32} - 1) \cdot 0.95$ er utgangsverdien gitt av

$$output = input \pm \left[\sqrt{input} \cdot rnd + 2 \cdot \sqrt{input} \right]. \tag{3.3}$$

Dermed vil 5 % av verdiene ligge mellom to og tre standardavvik fra forventningsverdien, og 100 % vil ligge innenfor tre standardavvik. Figur 3.5a og 3.5b viser de 10000 første verdiene som genereres med denne generatoren når inngangsverdien er henholdsvis 1 og 128.



(a) $\mu = 1$ (b) $\mu = 128$

Figur 3.5: De 10000 første verdiene som genereres med inngangsverdiene 1 og 128.

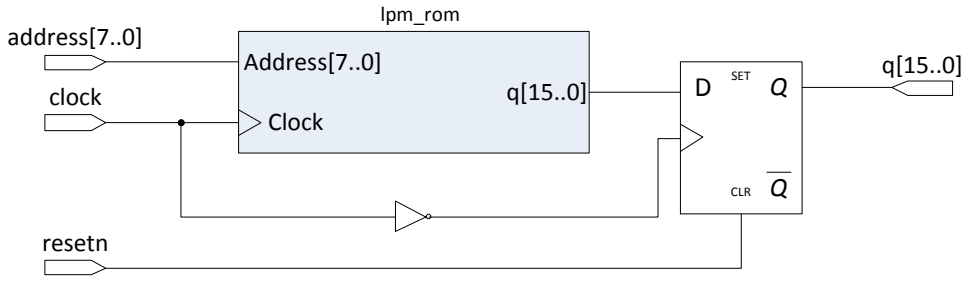
Standardavviket til alle de mulige inngangsverdiene er lagret i en oppslagstabell som vist i tabell 3.2. Som man kan se av denne tabellen er dataene i oppslagstabellen på 16 bit, hvor de 4 mest signifikante bitene (MSB) angir heltallsdelen, mens de 12 minst signifikante bitene (LSB) angir fraksjonsdelen.

Adresse	Data	Binær data
0	$\sqrt{0}$	0000 0000 0000 0000
1	$\sqrt{1}$	0001 0000 0000 0000
2	$\sqrt{2}$	0001 0110 1010 0000
.	.	.
.	.	.
.	.	.
255	$\sqrt{255}$	1111 1111 0111 1111

Tabell 3.2: Oppslagstabell.

Oppslagstabellen er implementert med en ROM-modul, som er en innebygget MegaWizard-funksjon i Quartus II. I tillegg inneholder den et register på utgangen som er klokket med en invertert klokke, slik at utgangen er gyldig på positive klokkeflanker (se figur 3.6). ROM-modulen initialiseres med en Memory Initialization File (.mif) som ble generert i Matlab. Denne Matlab-koden finnes i vedlegg F.

ROM-modulen er pipelined for å takle høye frekvenser. Derfor tar det 3 klokkesykler fra det påtrykkes en adresse til den tilhørende verdien ligger på utgangen. Når dataen fra ROMen er klar, multipliseres denne med resulatet fra Tausworthe-generatoren. Makskravet til systemet er 60 rammer per sekund med full



Figur 3.6: Arkitekturen til oppslagstabellen.

HD-oppløsning, som gir en frekvens på

$$\text{frekvens} = 1920 \cdot 1080 \cdot 60 = 124\,416\,000\,\text{Hz} = 124.416\,\text{MHz}. \tag{3.4}$$

For at systemet skulle takle så høye frekvenser var det nødvendig å pipeline multiplikasjonen. Dette ble løst ved å benytte "Shift and add"-algoritmen som vist i figur 3.8. Forskjellen mellom multiplikatoren i fotonstøygeneratoren og multiplikatorene i rad- og kolonnestøygeneratorene, er at fotonstøygeneratoren utfører en 16×32-bits multiplikasjon, mens de to andre generatorene utfører en 8×32-bits multiplikasjon. Dette gjøre at fotonstøygeneratoren bruker en klokkesykel mer på multiplikasjonen og totalt 4 klokkesykler.

Når resultatet fra multiplikasjonen er klart, avrundes resultatet til nærmeste heltall, før det gjøres en sjekk mot *rnd* for å avgjøre om fotonstøyen skal ligge innenfor ett, to eller tre standardavvik og om avviket skal være negativt eller positivt.

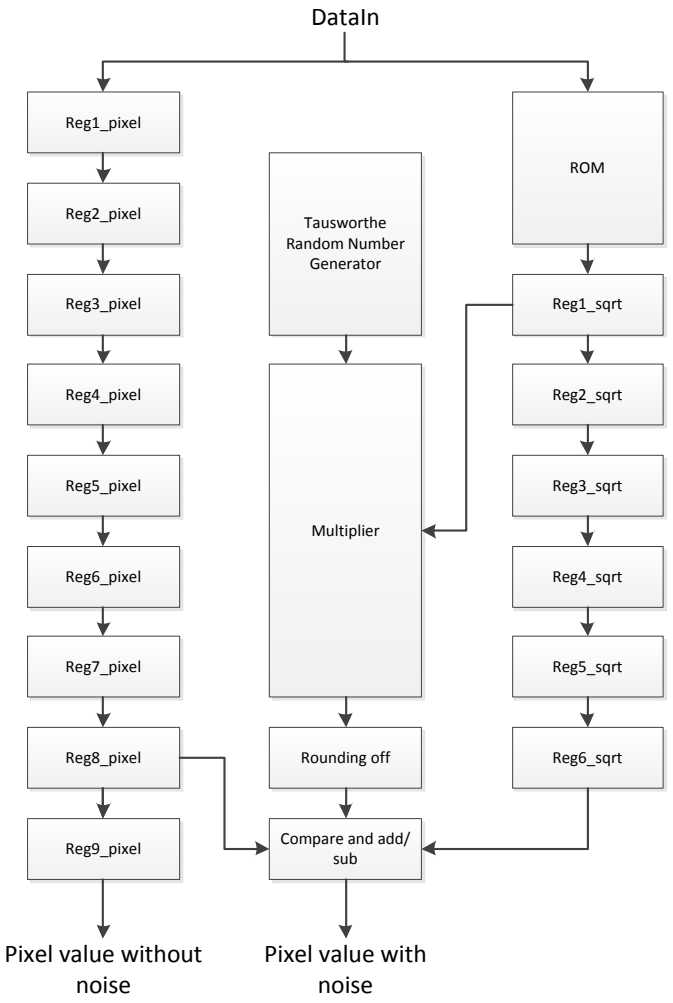
3.3.4 Radstøygenerator

Radstøy kan modelleres med en normalfordeling hvor forventningsverdien er lik null. Radstøyen emuleres ved hjelp av den samme tilnærmingen til normalfordelingen som benyttes i fotonstøygeneratoren, og standardavviket bestemmes av brukeren ved oppstart av sytemet.

I radstøygeneratoren multipliseres verdien fra inngangssignalet *row_std_dev* med verdien fra registeret kalt *Reg_S3* i figur 3.4. I likhet med utgangssignalet til Tausworthe-generatoren er dette et 32-bits tall, men det har noe dårligere tilfeldighetskvaliteter. Multiplikasjonen er pipelined på grunn av tidligere nevnte krav om at systemet må være i stand til å kunne kjøre på 124.416 MHz (se (3.4)), og utføres ved å benytte "shift and add"-algoritmen som vist i figur 3.8. AND-operasjonene i figuren er en bit-wise AND-operasjon.

Når multiplikasjonen er ferdig sjekkes verdien i registeret *Reg_S2* for avgjøre om støyen skal ligge innenfor ett, to eller tre standardavvik og om avviket skal være positivt eller negativt. Avviket lagres i et 8-bits register, mens fortegnet lagres i et eget register (1 = negativ og 0 = positiv). Det siste trinnet i radstøygeneratoren ligner veldig på det siste trinnet i fotonstøygeneratoren og det siste trinnet i kolonnestøygeneratoren.

Radstøygeneratoren vil naturlig nok bare komme opp med et radavvik en gang per rad, og da i det den første pikselen på en rad behandles. Det siste trinnet vil



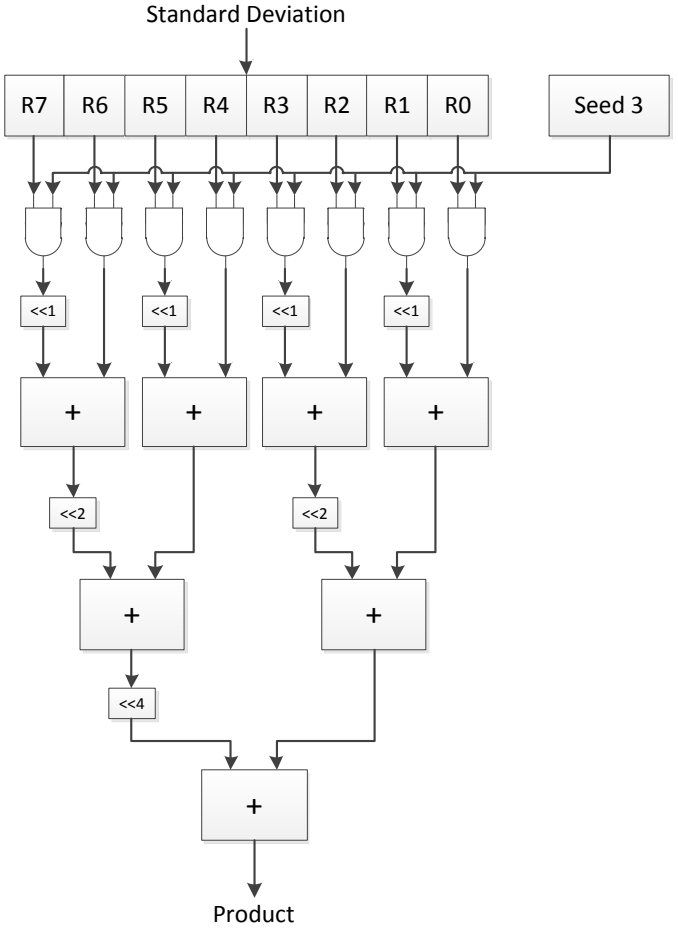
Figur 3.7: Blokkdiagram av fotonstøygeneratoren.

derfor sjekke en kolonneteller, og kun utføres dersom denne er lik null (kolonne null er den første). Multiplikasjonen vil allikevel beregne et nytt resultat hver klokkesykel. Dermed vil resultatet fra multiplikasjonen være klart i det kolonnetelleren igjen blir null.

3.3.5 Kolonnestøygenerator

Kolonnestøy kan i likhet med radstøy modelleres med en normalfordeling hvor standardavviket er lik null. Den samme algoritmen som gir en tilnærmet normalfordeling i foton- og radstøygeneratoren, benyttes også i kolonnestøygeneratoren. Og slik som med radstøygeneratoren bestemmes standardavviket til kolonnestøyen av brukeren ved oppstart.

Kolonnestøygeneratoren benytter en mulitplikator lik den i radstøygeneratoren (se 3.8), men standardavviket multipliseres med *Seed 2* i stedet for *Seed 3*. I det multiplikasjonen er ferdig, sjekkes verdien i registeret *Reg_S3* for avgjøre om støyen skal ligge innenfor ett, to eller tre standardavvik og om avviket skal være positivt eller negativt, på samme måte som i de to andre støygeneratorene. I motsetning til



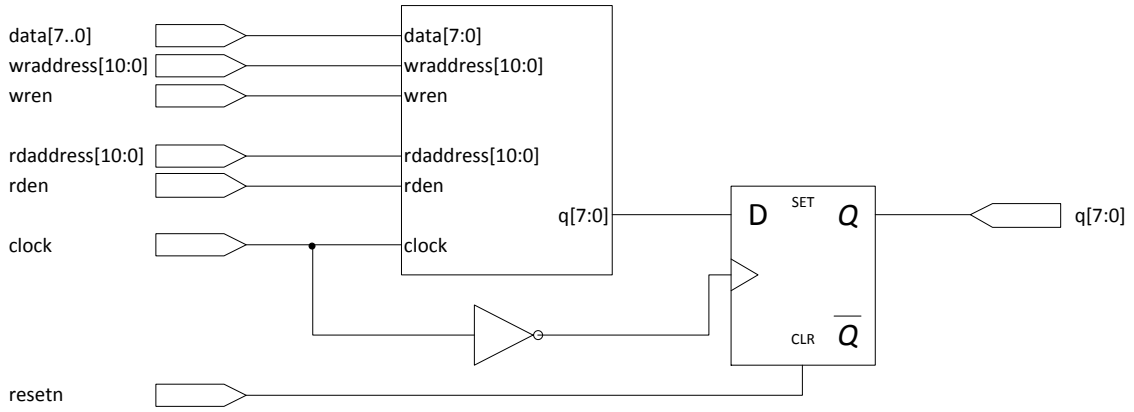
Figur 3.8: Blokkdiagram av multiplikatoren i radstøygeneratoren.

i radstøygeneratoren, lagres avviket og dets fortegn i det samme 8-bits registeret. Dette gjør at kolonneavviket har en maksverdi på 127 (7 bit).

En annen forskjell fra radstøygeneratoren er at siden bildene leses ut rad for rad, må kolonneavviket lagres til neste gang en piksel fra samme kolonne behandles. Dette er løst ved å benytte en dual-port RAM-instans på 2048 Byte. I likhet med ROM-modulen som brukes som oppslagstabell i fotonstøygeneratoren, er det også satt på et register på utgangen av dual-port RAM-enheten som klokkes på negative klokkeflanker. Grunnen til dette er som sagt for at verdien som leses ut skal være stabil på positive klokkeflanker. Figur 3.9 viser arkitekturen til RAM-modulen. To tellere brukes som lese- og skriveadresse til RAMen.

Kolonneavvikene blir bestemt i det den øverste raden i bildet leses ut. I det den siste pikselverdien på den første raden er sendt ut, bør kolonneavviket til den første kolonnen være tilgjengelig. Siden det tar 3 klokkesykler fra man påtrykker en adresse til den korresponderende verdien er tilgjengelig, er man nødt til å starte å lese ut av RAMen samtidig som man skriver de tre siste kolonneavvikene til den. Dermed er man nødt til å benytte en dual-port RAM, som skiller seg fra single-port RAM ved at den har denne evnen til å lese og skrive til forskjellige adresser samtidig.

I det den første raden av piksler er sendt ut, vil kolonnestøygeneratoren gå over til å kun lese ut kolonneavvikene av RAMen. I likhet med multiplikasjonen



Figur 3.9: Arkitekturen til RAM-modulen.

i radstøygeneratoren, utføres multiplikasjonen i kolonnestøygeneratoren selv om resultatet ikke benyttes.

3.4 Testsystem

Systemet som er brukt til å teste emulatoren består av en Nios II-prosessor, DDR2 SDRAM, flash og et fysisk Ethernet-grensesnitt. Prosessoren kjører *MicroC/OS-II* og en modifisert versjon av Altera sitt Simple Socket Server-program. De modifiserte metodene er gjengitt i vedlegg C.

Testsystemet er designet slik at en Nios II-prosessor tar imot bildedata over Ethernet og lagrer det i et buffer i DDR2 SDRAMen. I det CPUen har mottatt ett bilde og Ethernet-tilkoblingen er lukket, settes emulatoren i gang og prosessoren starter å sende bildedataen. CPUen vil vente til den har mottatt en pikselverdi med overlagret støy fra emulatoren før den sender en ny pikselverdi. Verdiene som prosessoren mottar fra emulatoren lagres i et nytt buffer, og når den har mottatt et helt bilde avventer den en ny Ethernet-tilkobling. Når denne Ethernet-tilkoblingen er på plass, vil CPUen sende bildet med overlagret støy.

Matlab ble brukt til å lese bildedata, og for å sende den til CPUen. For å motta data fra FPGAen ble det benyttet et *C#*-program som skrev resultatet til en tekstfil. Dette programmet finnes i vedlegg E. Matlab ble igjen brukt for å lese denne tekstfilen og vise resultatet.

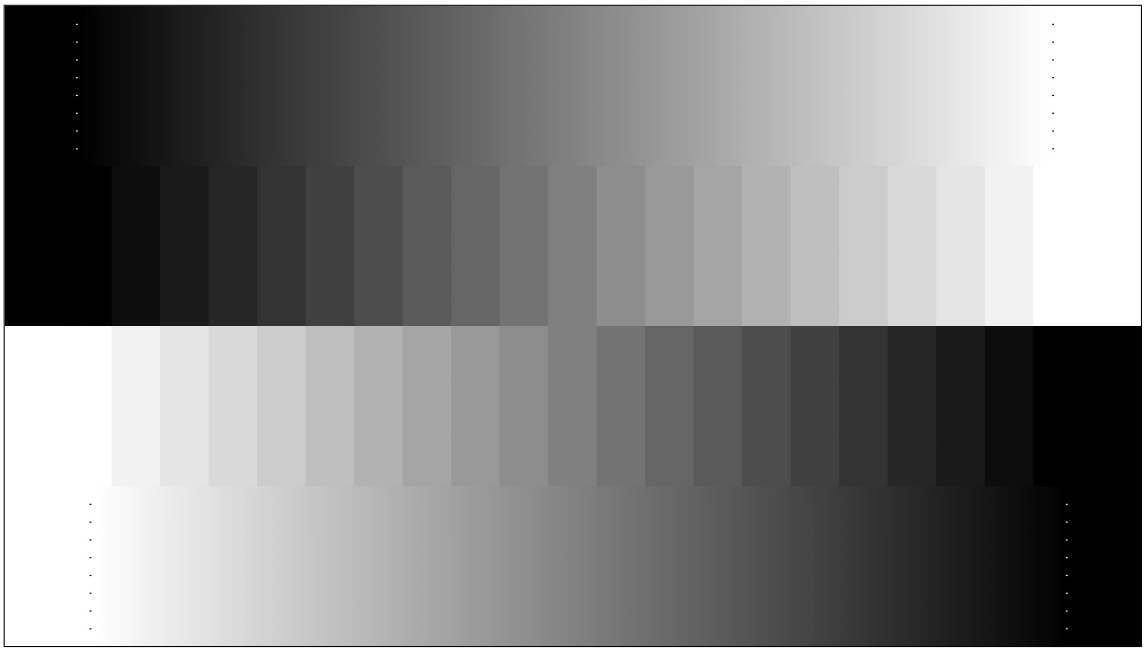
Kapittel 4

Resultater

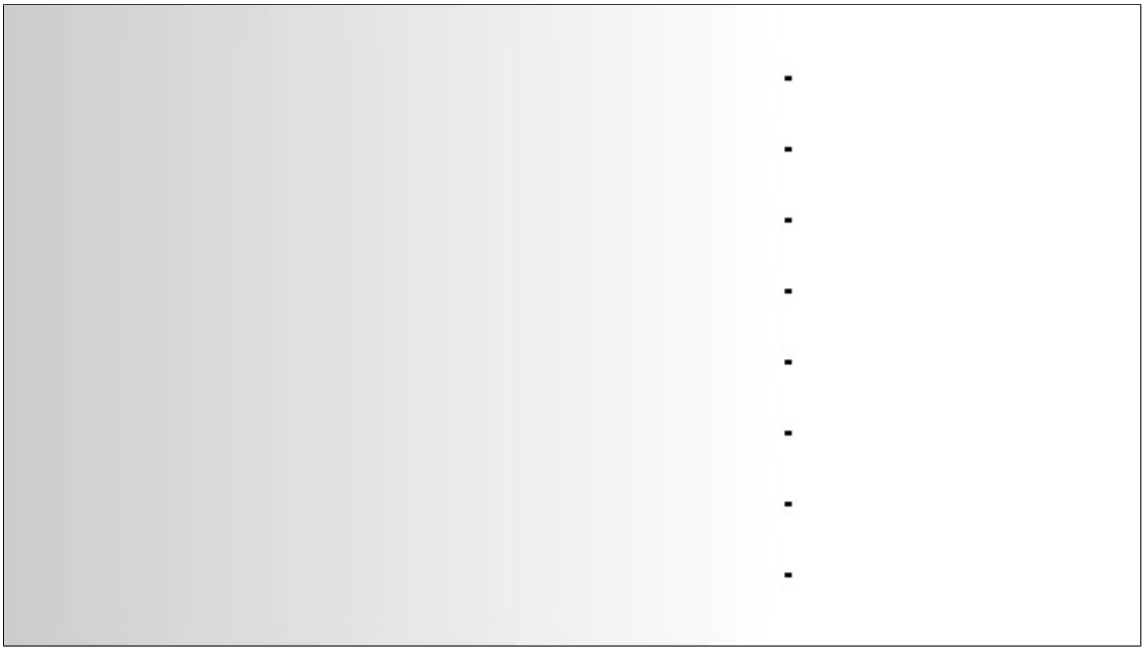
Dette kapittelet går først igjennom resultatene fra Matlabsimuleringene og testene på FPGAen som er utført. Videre tar kapittelet for seg Quartus II-simuleringer som viser noen av de viktigste funksjonene til emulatoren, før kapittelet avsluttes med en kort presentasjon av kompileringsresultatene til emulatoren fra *Quartus II* presenteres.

4.1 Matlabsimuleringer

Figurene 4.1 og 4.2 viser henholdsvis testbildet som er brukt og en forstørret del av testbildet, uten noen form for støy. Fordi testbildet har full HD-oppløsning er det litt vanskelig å se virkningen av støy. Det er derfor tatt med en forstørret del av alle test- og simuleringsbildene.



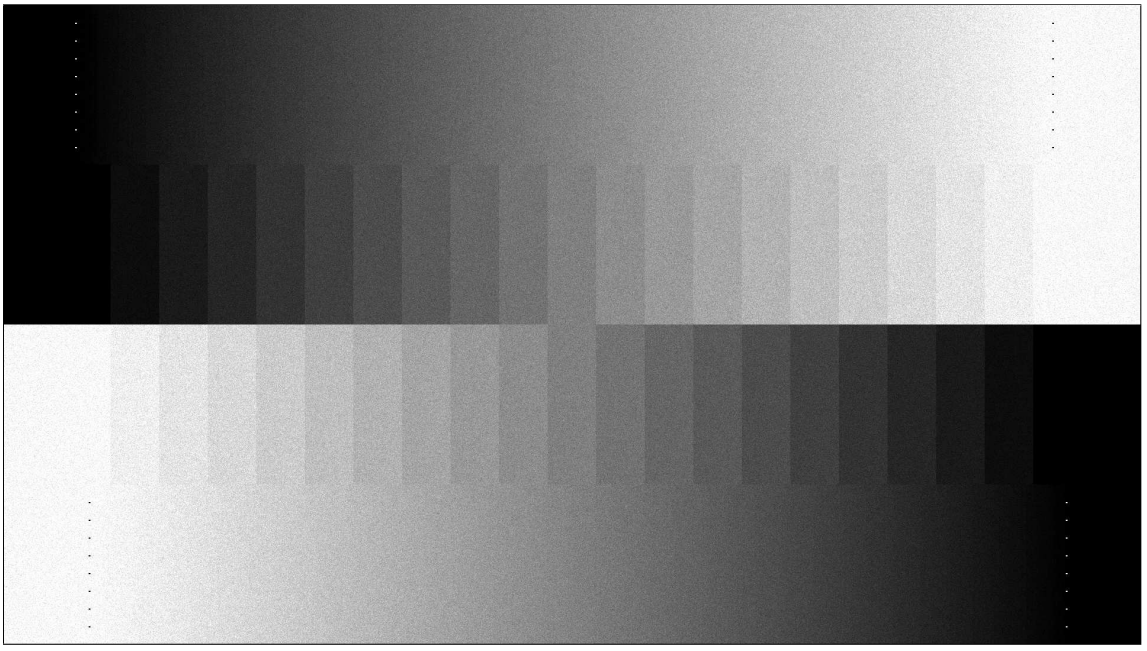
Figur 4.1: Testbildet uten støy.



Figur 4.2: Nærbilde av øverste høyre hjørnet av testbildet.

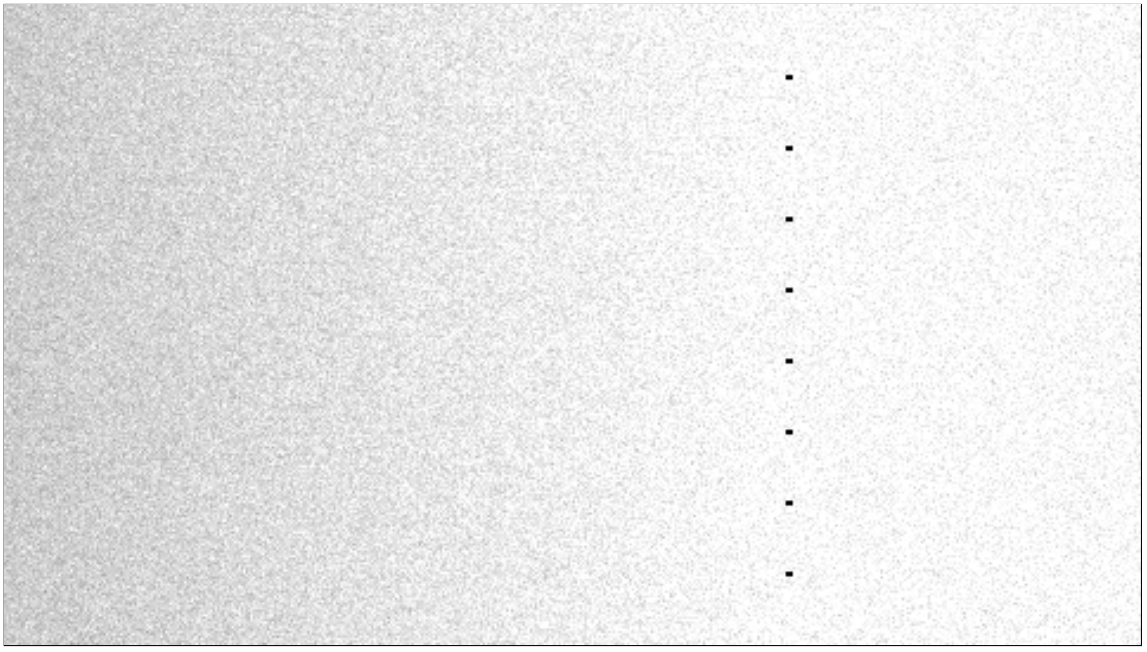
4.1.1 Simulering med Matlabfunksjoner for å generere Poisson- og normalfordelte pseudo-tilfeldige tall

Dette delkapittelet tar for seg simulering av foton-, rad- og kolonnestøy ved å benytte Matlabfunksjonene *poissrnd* og *randn* til å generere henholdsvis Poisson- og normalfordelte pseudo-tilfeldige verdier. Disse simuleringene er foretatt for å



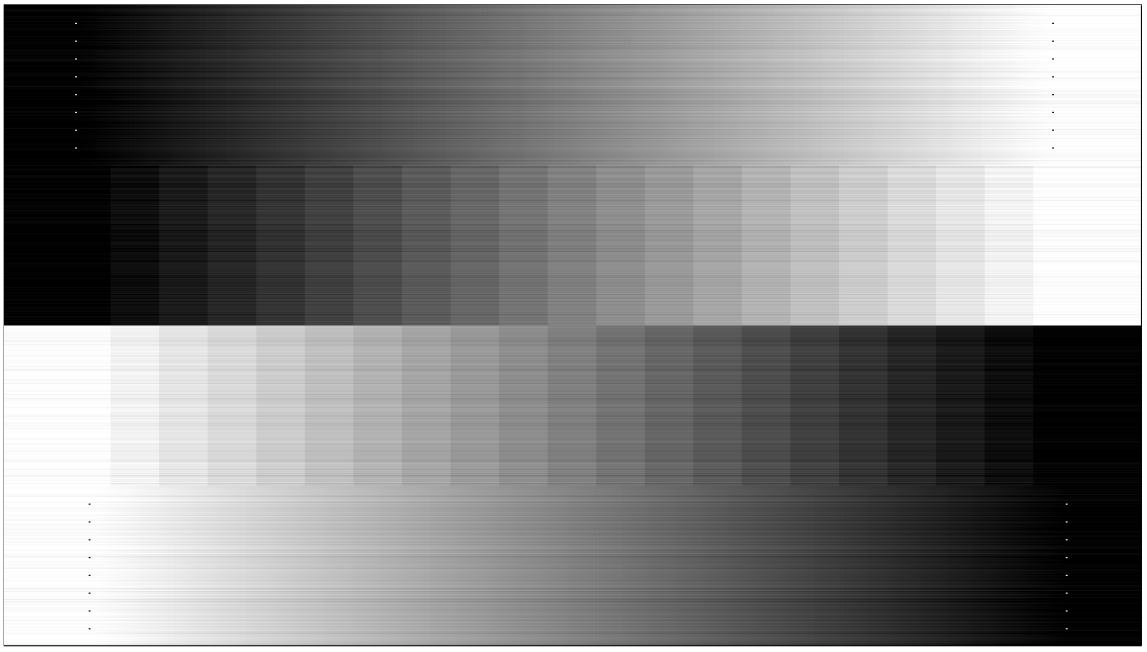
Figur 4.3: Resultatet etter å ha brukt Matlab-funksjonen *poissrnd* til å generere Poisson-fordelt støy på testbildet.

sammenlignes med simuleringene og resultatene av algoritmene emulatoren benytter til å emulere støy.

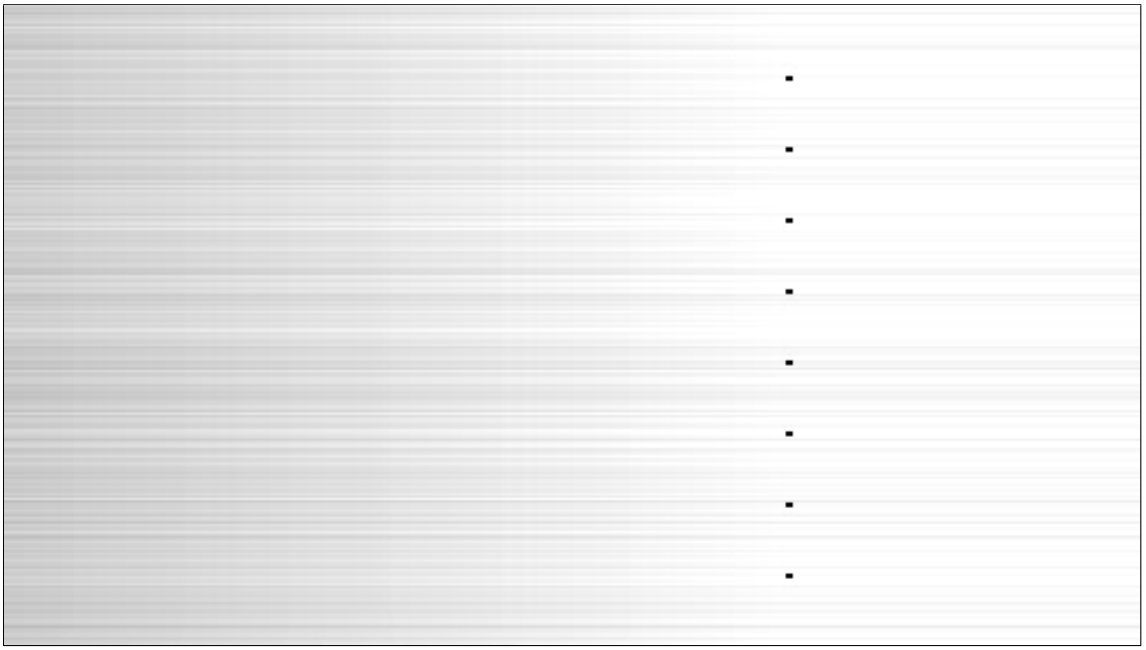


Figur 4.4: Nærbilde av simulert fotonstøy.

Figurene 4.3 og 4.4 viser simuleringen av fotonstøy. Det som er verdt å merke seg her, er at støyen øker med lysintensiteten (forventningsverdien) som forventet. Det må nevnes at i det pikselverdiene nærmer seg maksverdien 255 vil ikke støyen være Poissonfordelt lenger, da alle verdiene over maksverdien vil avrundes til 255.

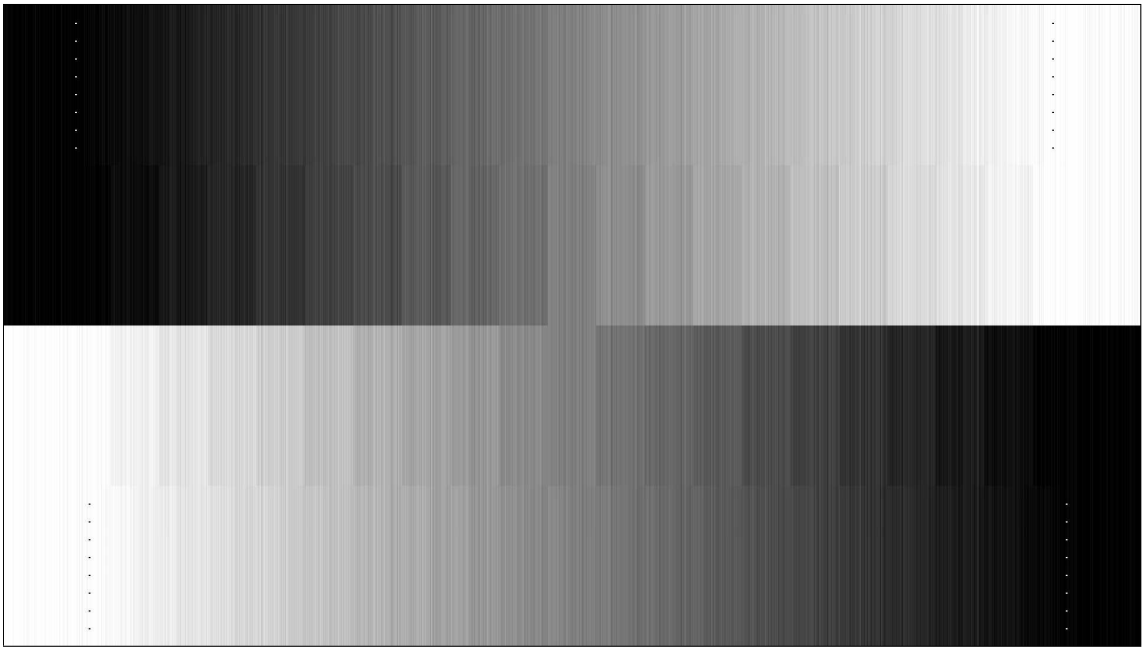


Figur 4.5: Simulert radstøy.



Figur 4.6: Nærbilde av simulert radstøy.

I figurene 4.5 og 4.6 ser man simulert radstøy med et standardavvik lik 7. Som man ser har noen rader et positivt avvik, mens andre har et negativt avvik. Summen av avvikene skal være lik null, men dette kan man ikke se ut fra bildene.



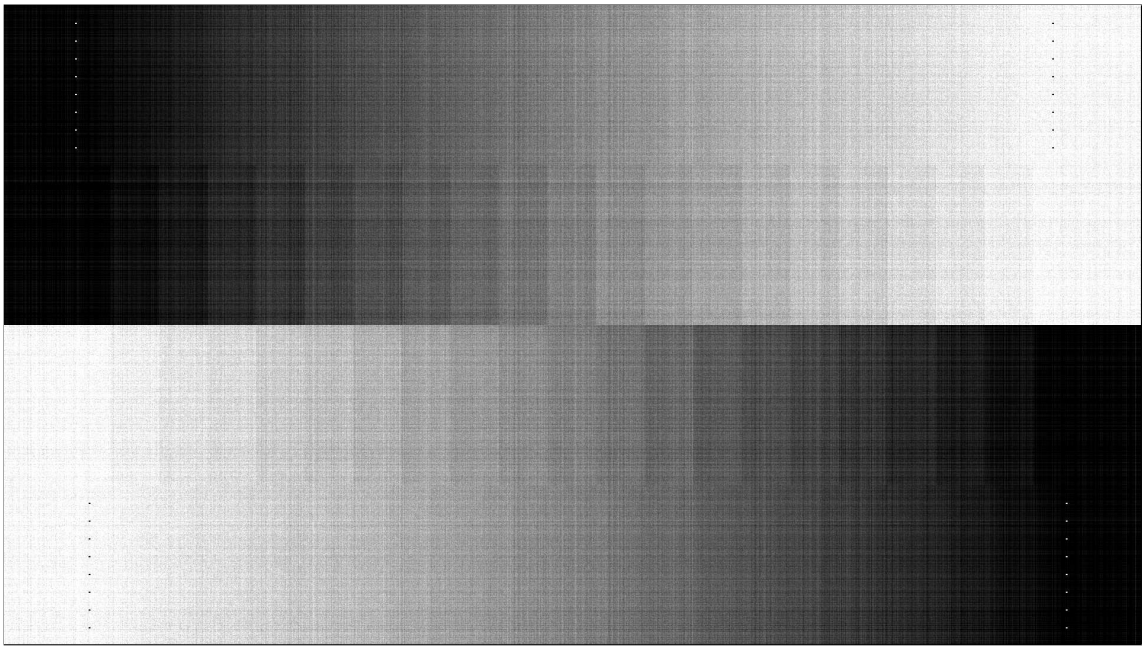
Figur 4.7: Simulert kolonnestøy.

Simuleringene av kolonnestøy kan sees i figurene 4.7 og 4.8. Denne kolonnestøyen har et standardavvik lik 7. Slik som tilfellet er med rader som er beheftet med radstøy, har noen av kolonnene et positivt avvik, mens andre har et negativt avvik.

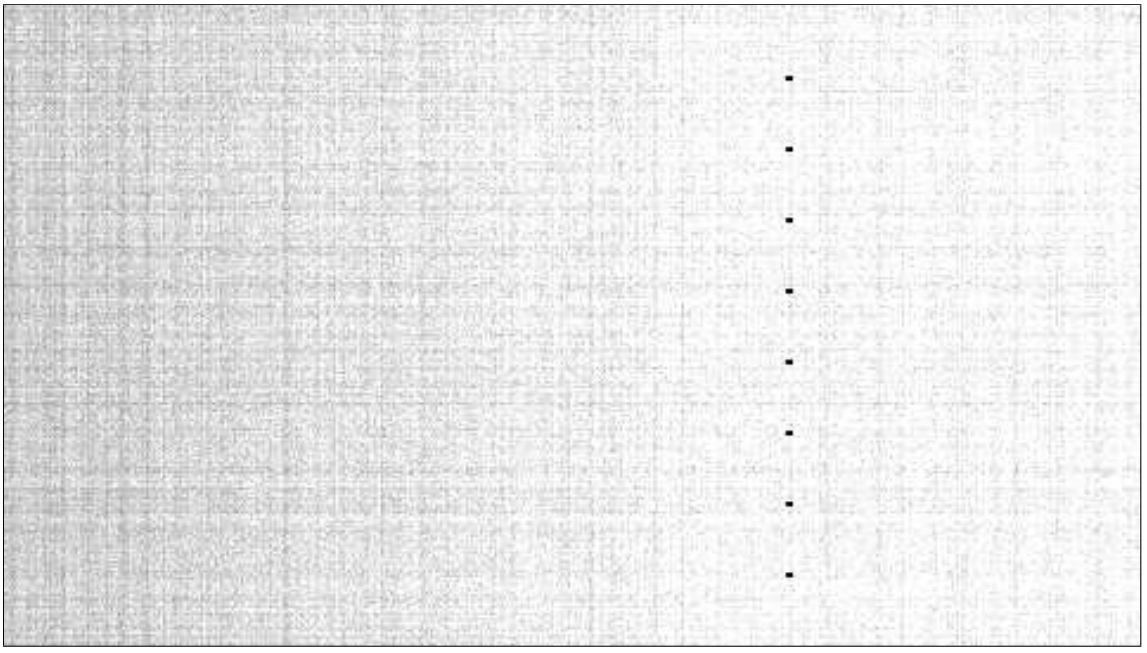
Figur 4.8: Nærbilde av simulert kolonnestøy.

Figurene 4.9 og 4.10 viser simuleringsresultatene når testbildet utsettes for simulert foton-, rad- og kolonnestøy. Standardavviket til rad- og kolonnestøyen er også her satt til 7. De tydelige linjene fra figurene 4.5 - 4.8 er fortsatt synlige, men her er de ikke like tydelige.

Tabell 4.1 viser noen utvalgte kvalitetsmål på simuleringsresultatene. Det er her verdt å merke seg at selv om rad- og kolonnestøyen er mer synlig enn fotonstøyen, så gir de bedre PSNR, MSE og MAE. Ikke overraskende er det summen av alle



Figur 4.9: Simulert foton-, rad- og kolonnestøy.



Figur 4.10: Nærbilde av simulert foton-, rad- og kolonnestøy.

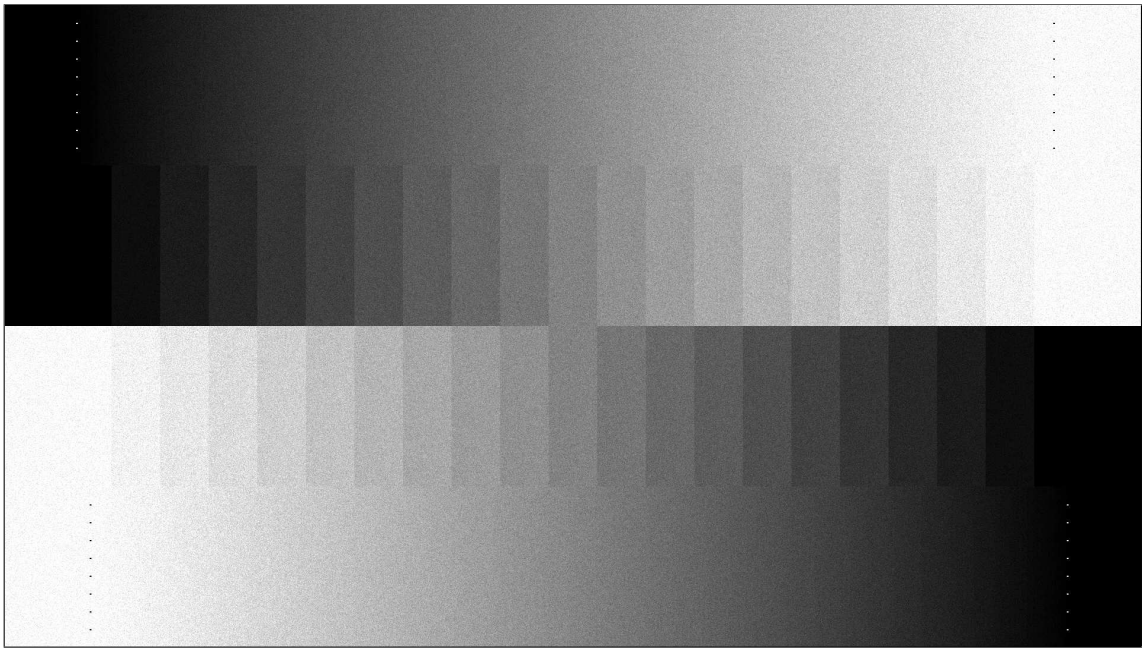
Tabell 4.1: Kvalitetsmål på simuleringsresultatene

Type støy	**PSNR (dB)**	**MSE**	**MAE**
Simulert fotonstøy	31.2403	48.8710	3.4059
Simulert radstøy	34.3584	23.8364	2.6399
Simulert kolonnestøy	34.6527	22.2745	2.4849
Alle	28.4742	92.3976	5.1167

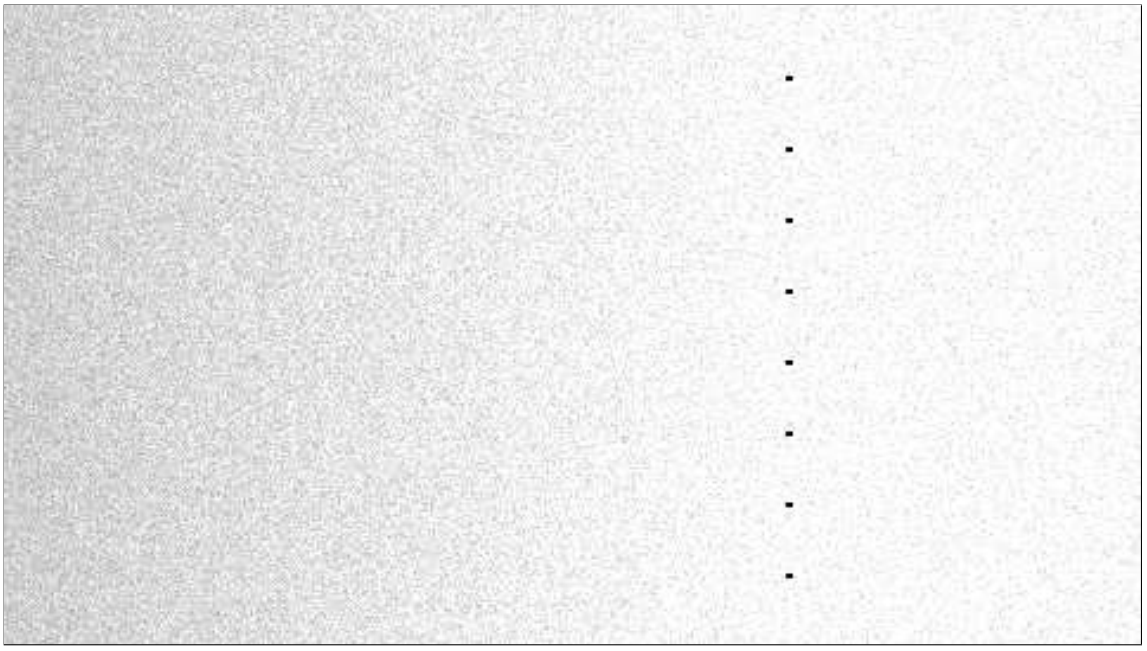
støytypene som gir dårligst PSNR.

4.1.2 Simulering av algoritmene som er brukt til å emulere foton-, rad- og kolonnestøy på FPGAen

Dette kapittelet presenterer resultatene fra simuleringene av algoritmene som er brukt til å emulere foton-, rad- og kolonnestøy på FPGAen. Disse simuleringene ble gjort for å gi en pekepinn på hvordan resultatet ville bli, før algoritmene ble implementert på FPGAen.

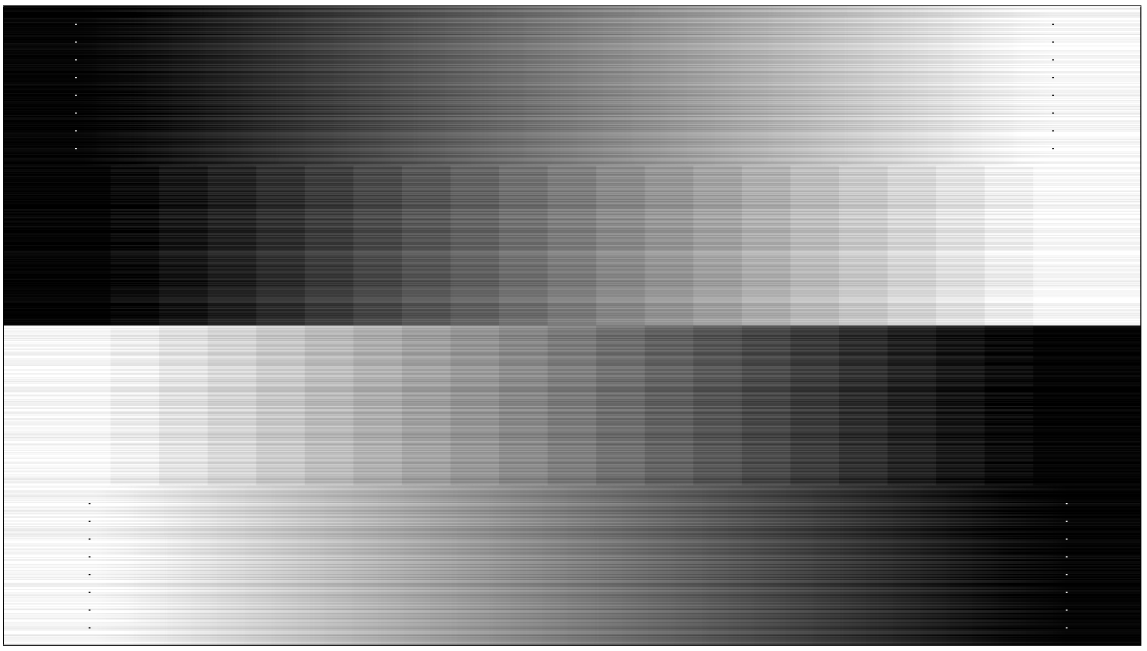


Figur 4.11: Resultatet av simulering av algoritmen som emulerer fotonstøy.

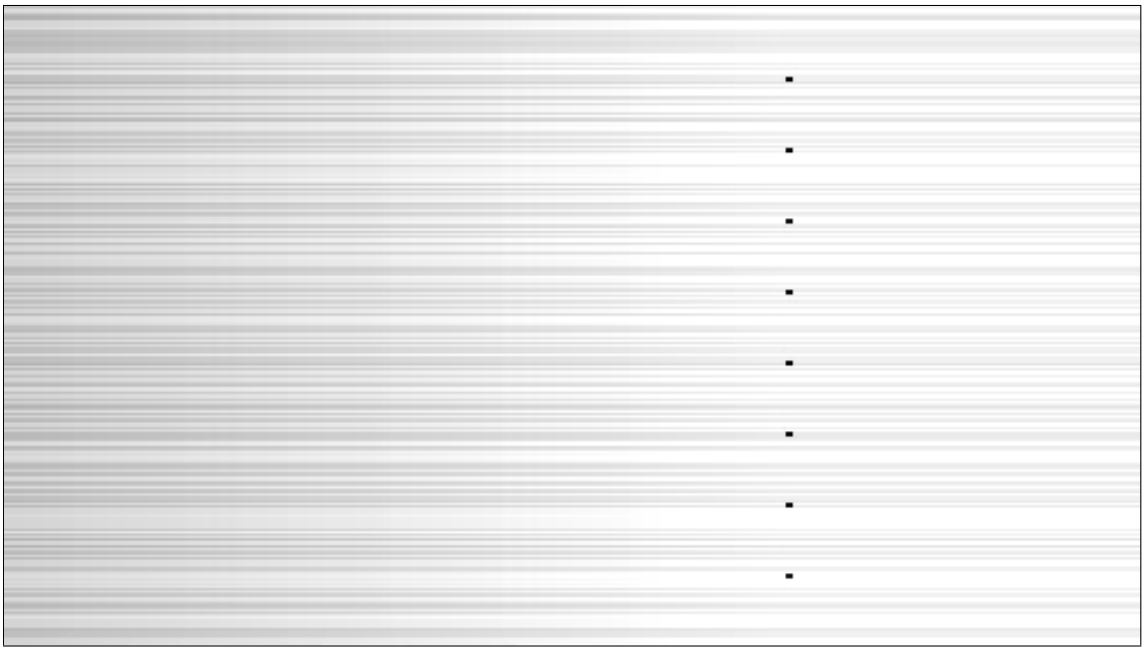


Figur 4.12: Nærbilde av emulert fotonstøy.

Resultatet fra simuleringen av algoritmen som er brukt til å generere fotonstøy kan man se i figur 4.11 og 4.12. Disse bildene kan sammenlignes med figurene 4.3 og 4.4.

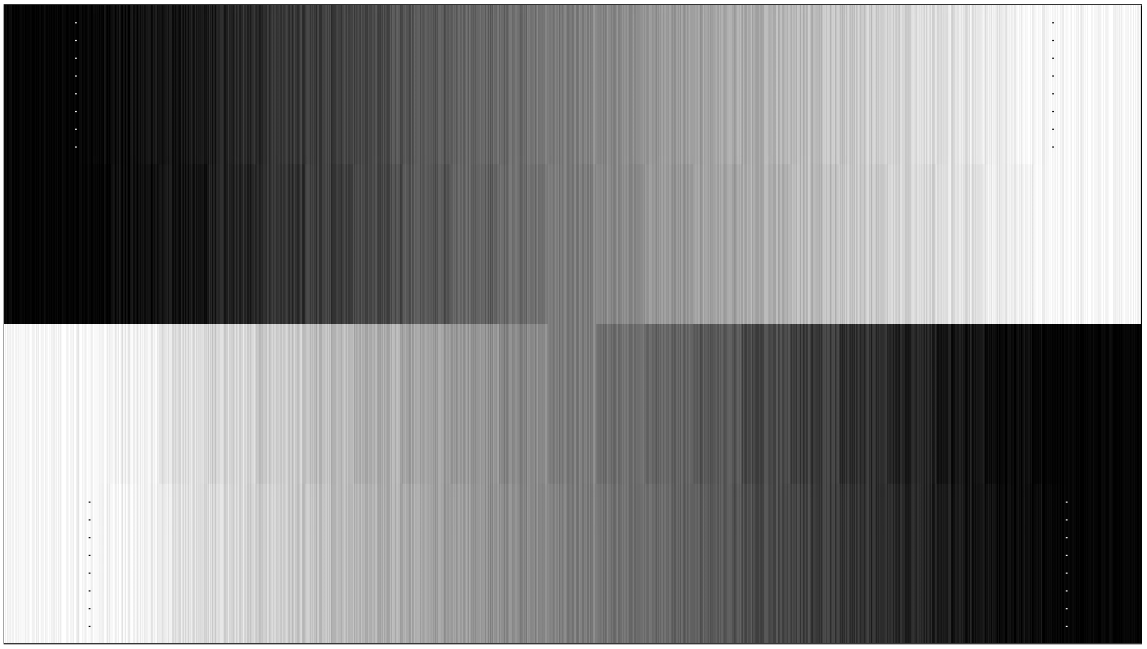


Figur 4.13: Resultatet av simulering av algoritmen som emulerer radstøy.



Figur 4.14: Nærbilde av emulert radstøy.

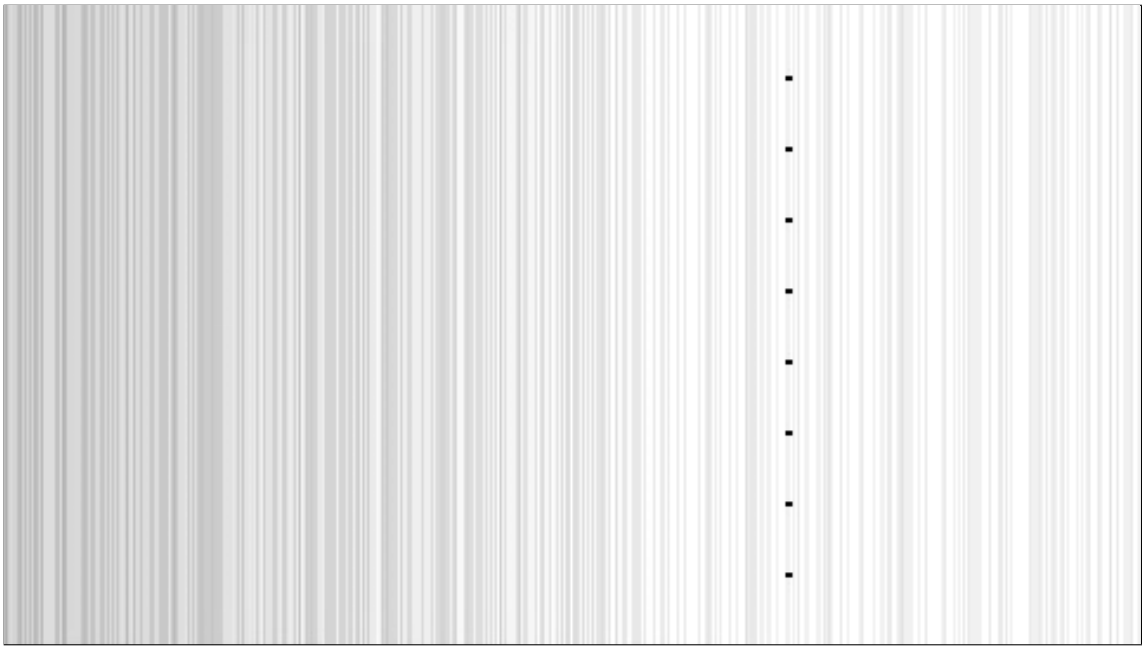
Figurene 4.13 og 4.14 viser emulert radstøy. Standardavviket til den emulerte radstøyen er satt 7. Sammenlignet med figur 4.5 og 4.6 ser man at radavvikene generelt er litt høyere i figurene som viser den emulerte radstøyen.



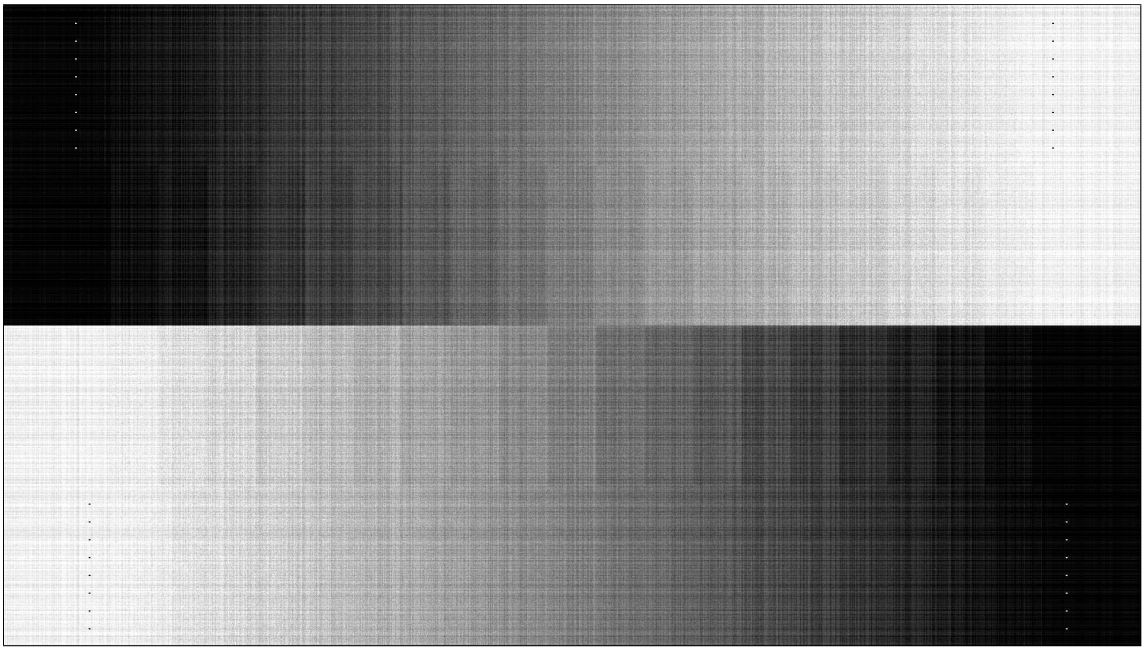
Figur 4.15: Resultatet av simulering av algoritmen som emulerer kolonnestøy.

I figur 4.15 og 4.16 ser man emulert kolonnestøy. Standardavviket til kolonnestøyen satt til 7, og i likhet med den emulerte radstøyen, ser det ut til at kolonneavvikene i disse figurene generelt er noe høyere enn den simulerte kolonnestøyen i figur 4.7 og 4.8.

Figurene 4.17 og 4.18 viser resultatet til simuleringen av algoritmene som er brukt til å emulere foton-, rad- og kolonnestøy i det samme bildet. Her er standardavvikene til rad- og kolonnestøyen satt til 7. Ved å sammenligne bildene

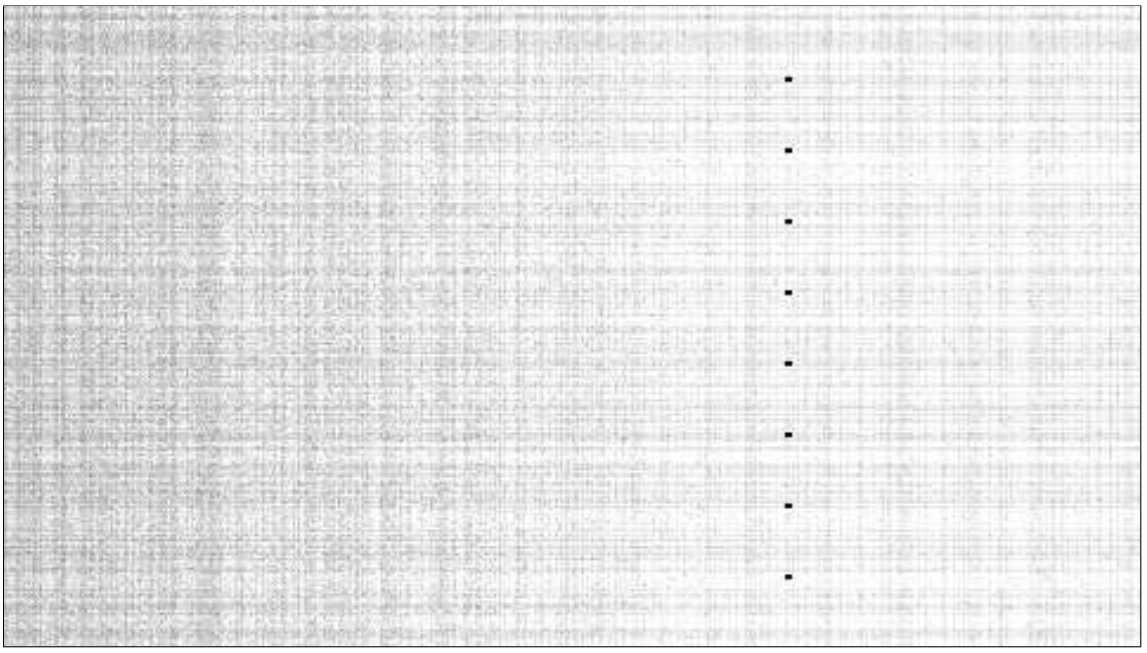


Figur 4.16: Nærbilde av emulert kolonnestøy.



Figur 4.17: Simulering av algoritmene som benyttes til å emulere foton-, rad- og kolonnestøy.

med figurene 4.9 og 4.10 ser man at simuleringene av emulatorens tilnærming til Poisson- og normalfordeling gir noe mer støy enn hvis man benytter en ekte Poisson- og normalfordeling. Ved å sammenligne tabell 4.1 med 4.2 ser man at simuleringene av algoritmene, som emulatoren bruker for å emulere støy, gir en PSNR som er 2-3 dB lavere enn tilsvarende simuleringer med Matlabs måte å generere normal- og



Figur 4.18: Nærbilde av figur 4.17.

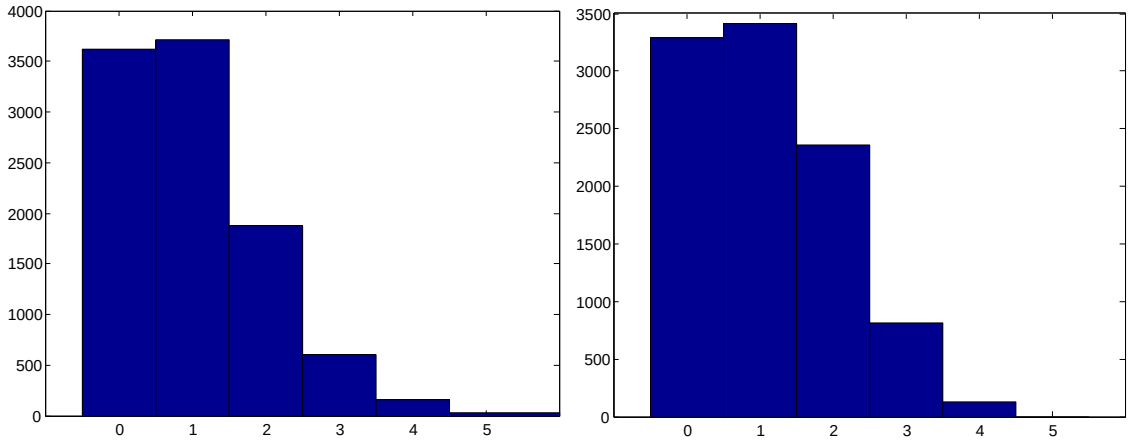
Poissonfordelte pseudo-tilfeldige tall.

Tabell 4.2: Kvalitetsmål på simuleringsresultatene av de emulerte støytypene

Type støy	**PSNR (dB)**	**MSE**	**MAE**
Emulert fotonstøy	29.3189	76.0662	4.7570
Emulert radstøy	31.0340	51.2487	4.5113
Emulert kolonnestøy	31.2444	48.8243	4.4129
Alle	26.2118	155.5596	6.4108

4.1.3 Fordelingsfunksjonene til algoritmene for emulering av foton-, rad- og kolonnestøy

Dette delkapittelet presenterer kort fordelingsfunksjonene til algoritmen som er brukt til å emulere fotonstøy og algoritmen som er brukt til å emulere rad- og kolonnestøy, og sammenligner disse med henholdsvis Poisson- og normalfordelingen. Fordelingsfunksjonen sier noe om hvor bra algoritmene emulerer foton-, rad- og kolonnestøy, og kan være med på å forklare hvorfor resultatene blir som de blir.

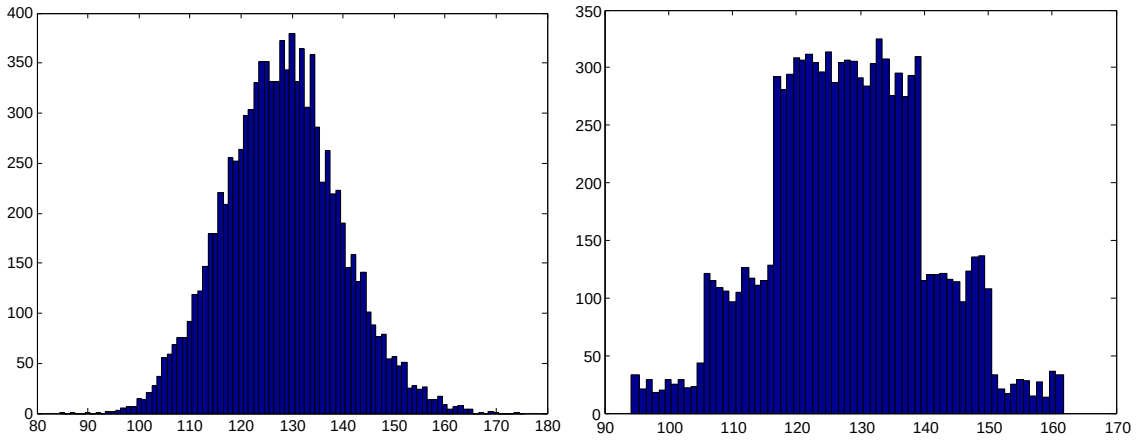


(a) Poissonfordeling med $\mu = 1$

(b) Emulatorens tilnærming til Poissonfordelingen med $\mu = 1$

Figur 4.19: De 10000 første verdiene generert med Matlabs *poissrnd* og algoritmen som brukes til å generere pseudo-tilfeldige tall i fotonstøygeneratoren med $\mu = 1$.

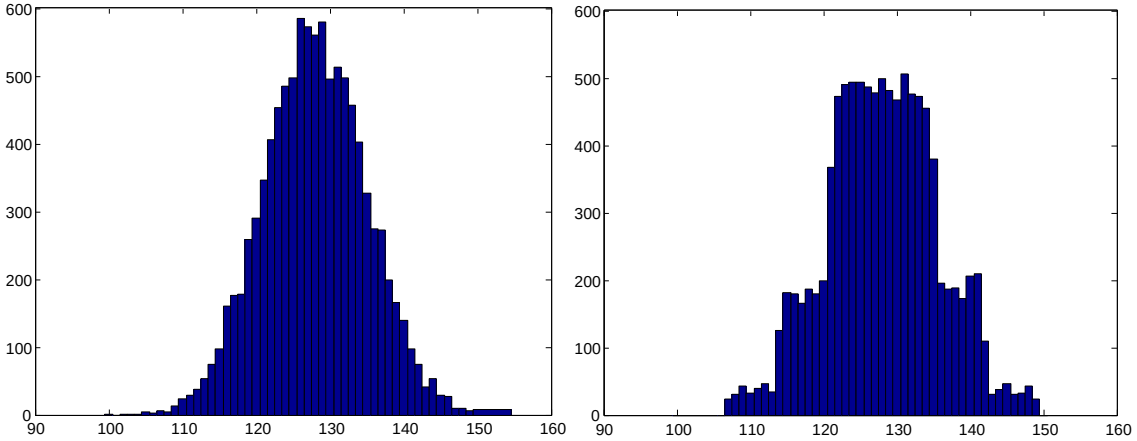
Figur 4.19 og 4.20 viser en sammenligning av Poissonfordelingen og fordelingen til de pseudo-tilfeldige tallene som genereres i fotonstøygeneratoren. Som man ser har de pseudo-tilfeldige verdiene som genereres i emulatoren en noe kunstig fordeling. Sammenlignet med Poissonfordelingen er det flere verdier som er ulik forventningsverdien. Det vil dermed være færre pikselverdier som vil være uberørt av den emulerte fotonstøyen, enn det som er tilfellet i en reell bildebrikke. Det er i tillegg verdt å merke seg at alle verdiene til tallgeneratoren som brukes til å emulere fotonstøy ligger innenfor tre standardavvik.



(a) Poissonfordeling med $\mu = 128$

(b) Emulatorens tilnærming til Poissonfordelingen med $\mu = 128$

Figur 4.20: De 10000 første verdiene generert med Matlabs *poissrnd* og algoritmen som brukes til å generere pseudo-tilfeldige tall i fotonstøygeneratoren med $\mu = 128$.



(a) Normalfordeling med $\mu = 128$ og $\sigma = 7$

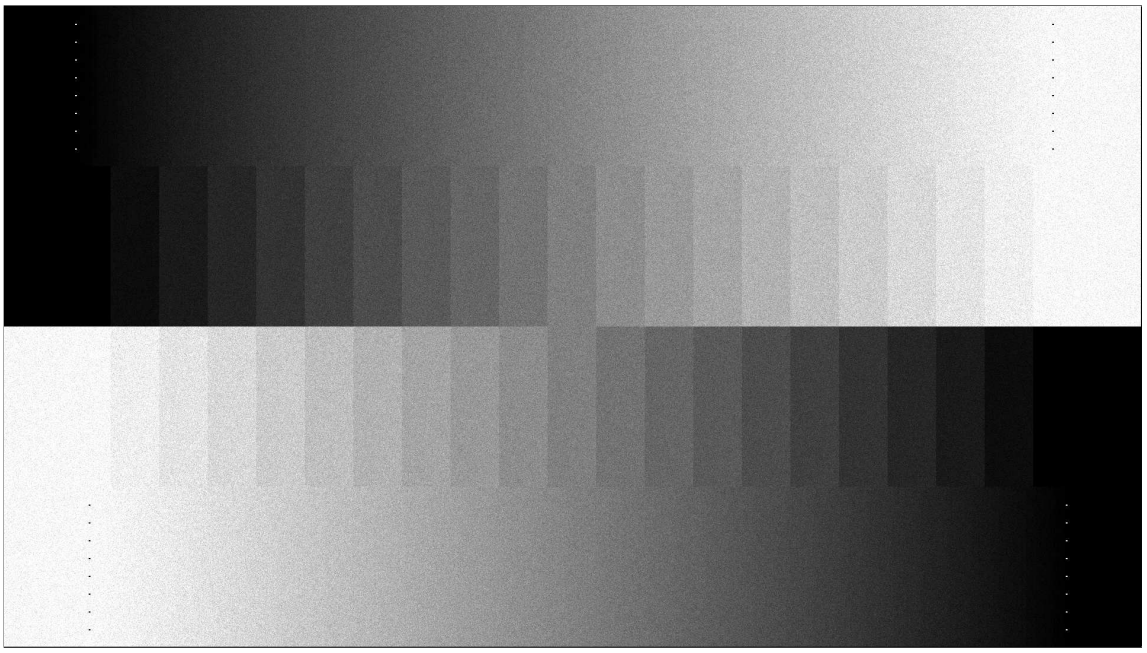
(b) Emulatorens tilnærming til normalfordelingen

Figur 4.21: De 10000 første verdiene generert med Matlabs *randn* og algoritmen som brukes til å generere pseudo-tilfeldige tall i rad- og kolonnestøygeneratorene med forventningsverdi 128 og standardavvik lik 7.

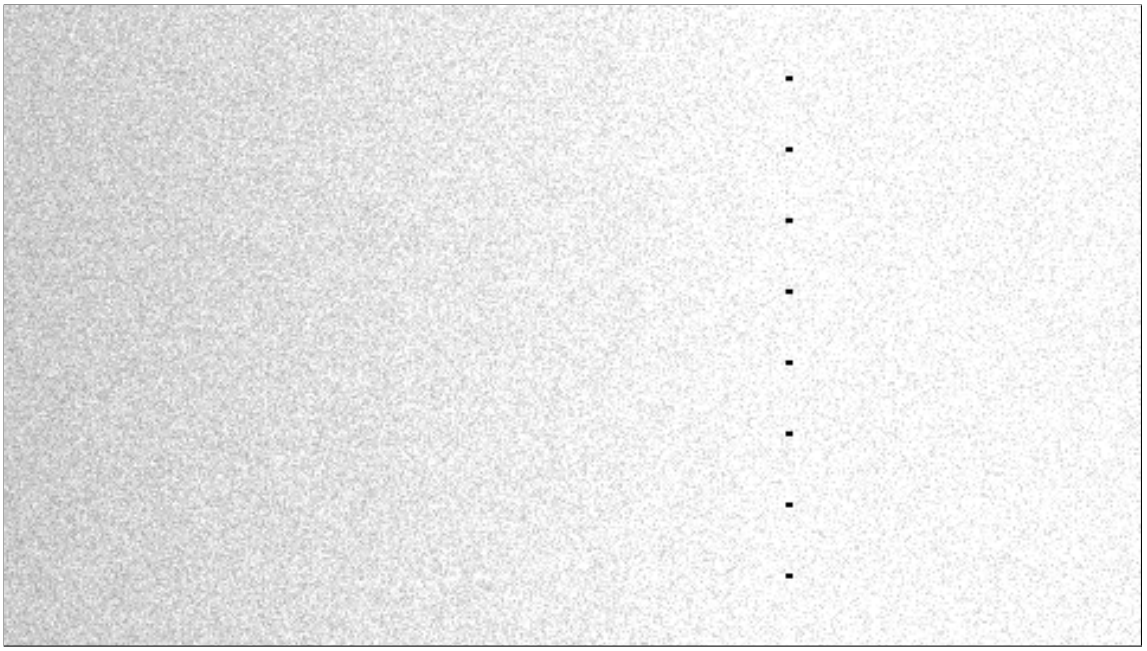
Figur 4.21 viser en sammenligning av Matlabs normalfordeling med en forventnigsverdi lik 128 og standardavvik lik 7, og emulatorens tilnærming til den samme fordelingen. Det samme gjelder her som for emulatorens tilnærming til Poissonfordelingen, noe som er naturlig med tanke på at algoritmene som benyttes for å generere tallene i emulatoren er nesten helt like.

4.2 Resultater fra testsystem

Dette kapittelet presenterer resultatene fra testene som er utført på FPGAen. Se kapittel 3.4 for litt mer om hvordan systemet er satt opp og hvilke programmer som er brukt.



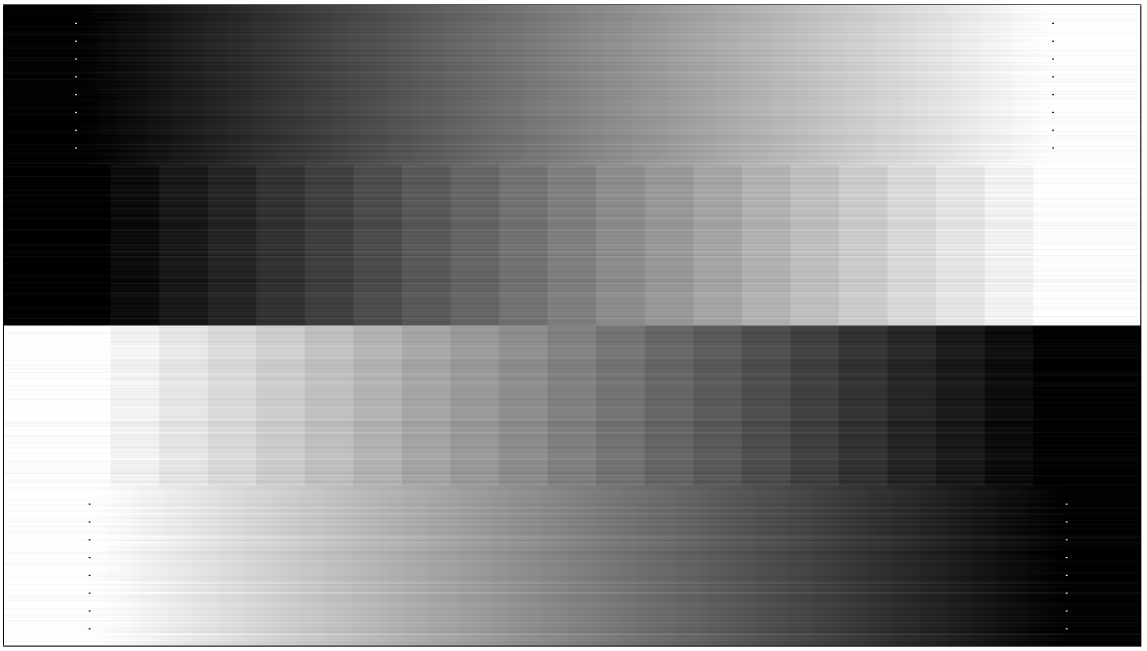
Figur 4.22: Resultatet fra test av emulering av fotonstøy på FPGAen.



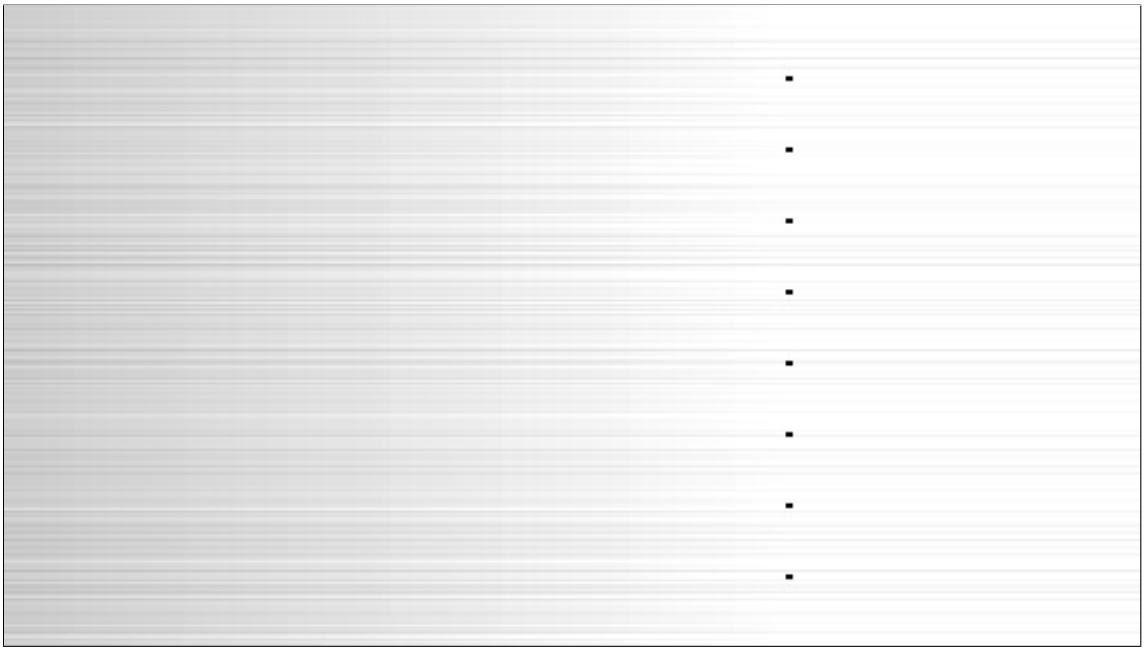
Figur 4.23: Nærbilde av figur 4.22.

Figur 4.22 og 4.23 viser resultatet av en test av emulatoren hvor den emulerer

fotonstøy. Man ser at resultatet er omtrent som i figur 4.3 - 4.4 og 4.11 - 4.12, og det er vanskelig å skille disse figurene fra hverandre.

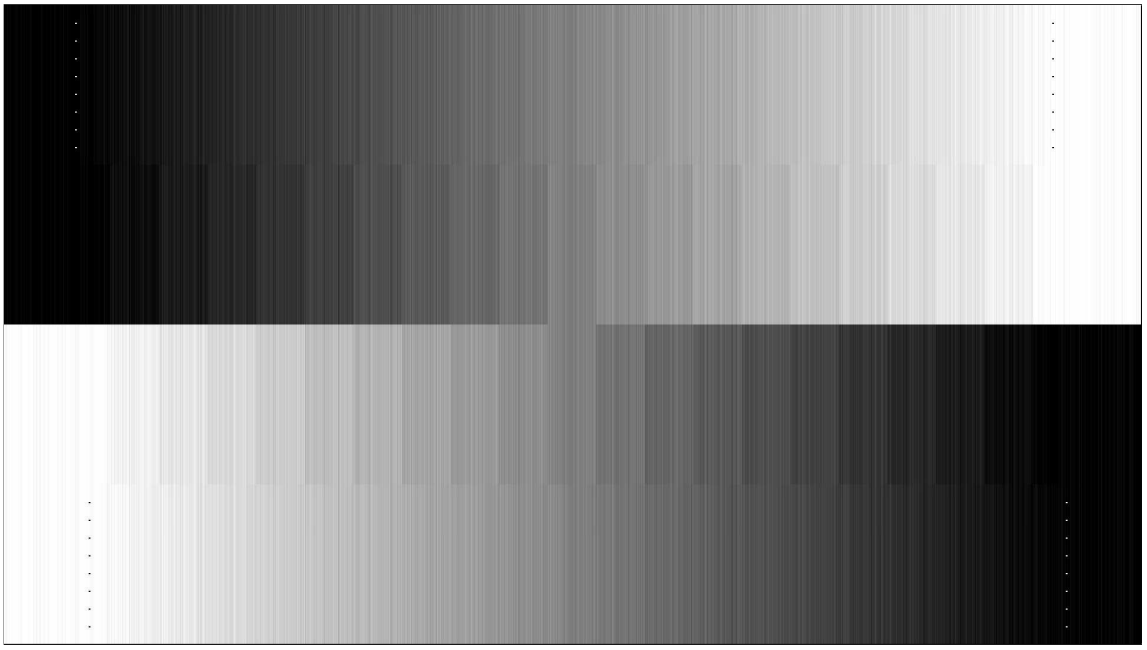


Figur 4.24: Resultatet fra test av emulering av radstøy på FPGAen.

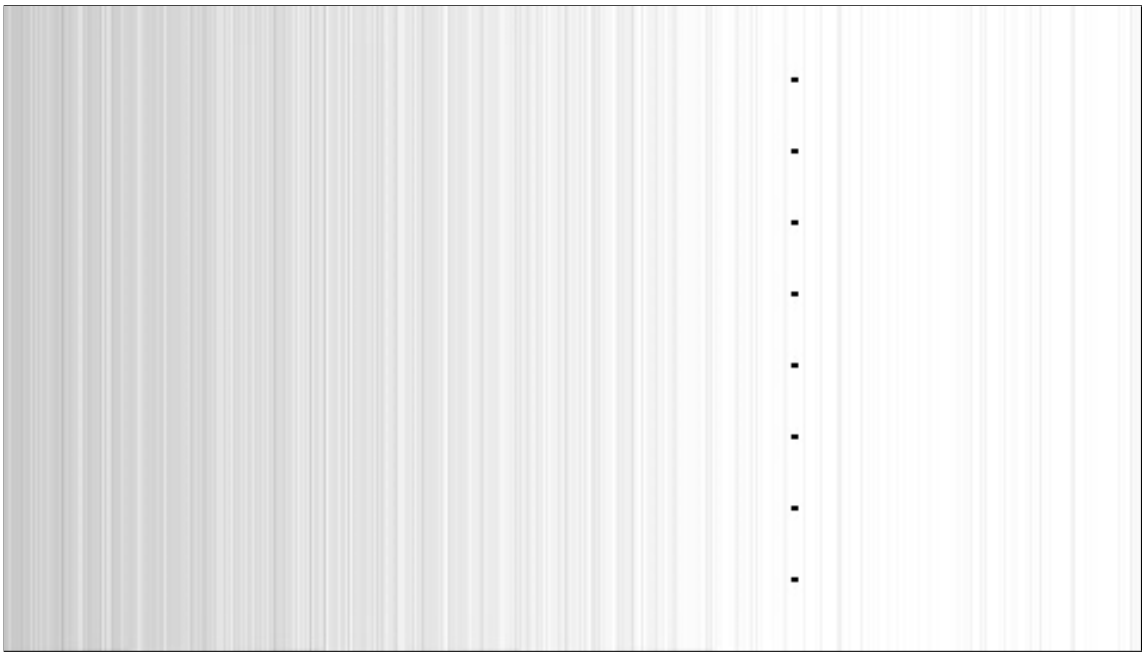


Figur 4.25: Nærbilde av figur 4.24.

Resultatet av testingen av emulering av radstøy ser man i figurene 4.24 og 4.25. I likhet med simuleringene av radstøy er standardavviket til radstøyen også her satt til 7 LSB. Som man ser er dette resultatet mer likt figurene 4.5 og 4.6 enn 4.13 og 4.14.



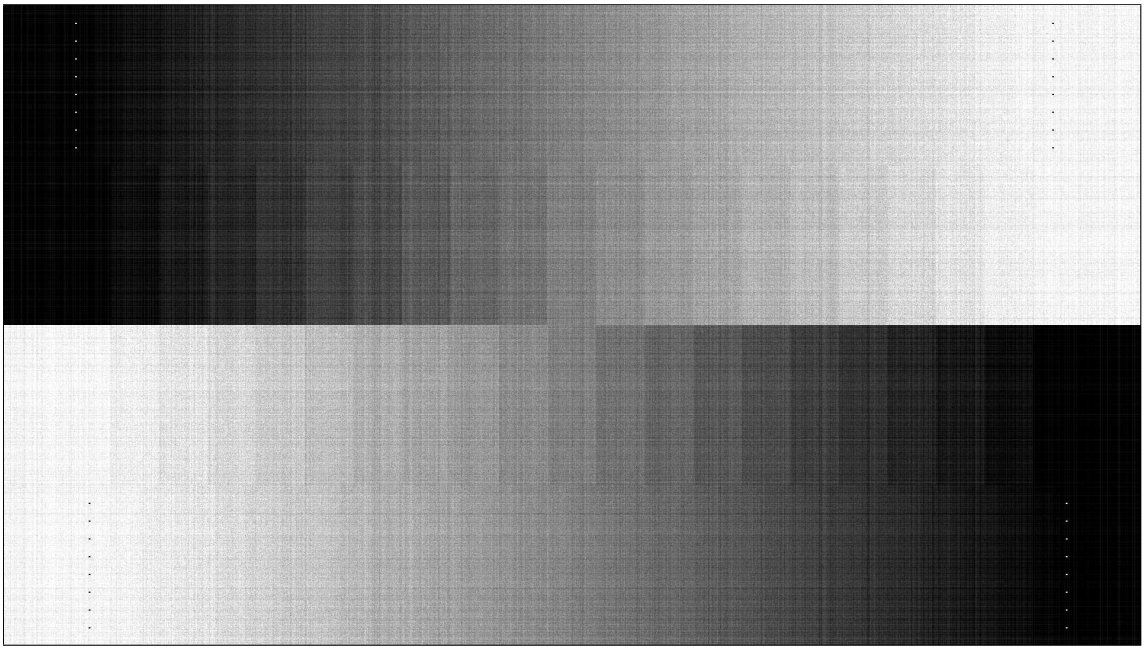
Figur 4.26: Resultat fra test av emulering av kolonnestøy på FPGAen.



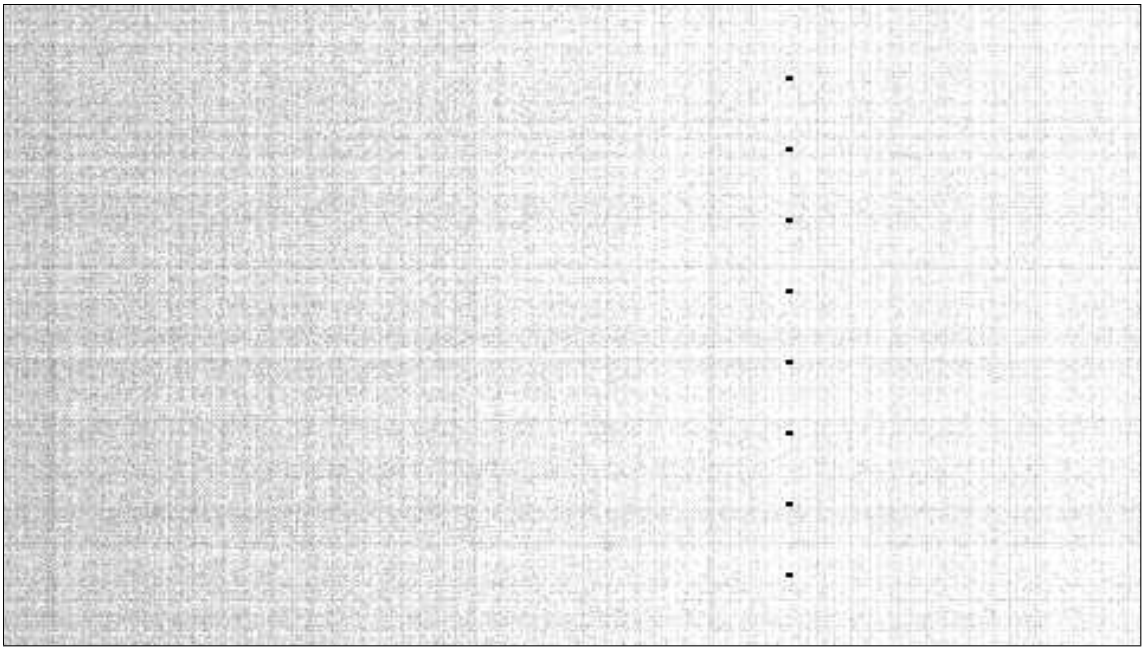
Figur 4.27: Nærbilde av figur 4.26.

I figurene 4.26 og 4.27 ser man resultatet av test av emulering av kolonnestøy. Også her er standardavviket til støyen satt til 7 LSB, og i likhet med resultatet av emulering av radstøy, ligner dette resultatet mest på simuleringene hvor Matlabfunksjonen *randn* ble brukt til å generere normalfordelt støy (se figur 4.7 og 4.8).

Figurene 4.28 og 4.29 viser resultatet fra testen hvor alle de implementerte støytypene ble emulert. Standardavviket til rad- og kolonnestøyen er som vanlig



Figur 4.28: Resultat fra test av alle de tre implementerte støytypene emulert på FPGAen.



Figur 4.29: Nærbilde av figur 4.28.

satt til 7 LSB. Sammenligner man disse figurene med figur 4.9 - 4.10 og 4.17 - 4.18, så ligner resultatet kanskje mest på figurene 4.9 og 4.10.

Tabell 4.3 viser en oversikt over kvalitetstallene til testresultatene. Sammenligner man denne med tabell 4.1 og 4.2 ser man at PSNRen ligger rundt den til de simuleringene utført med Matlabfunksjonene *randn* og *poissrnd* til å generere henholdsvis normal- og Poissonfordelt støy, og noe over de simuleringene av

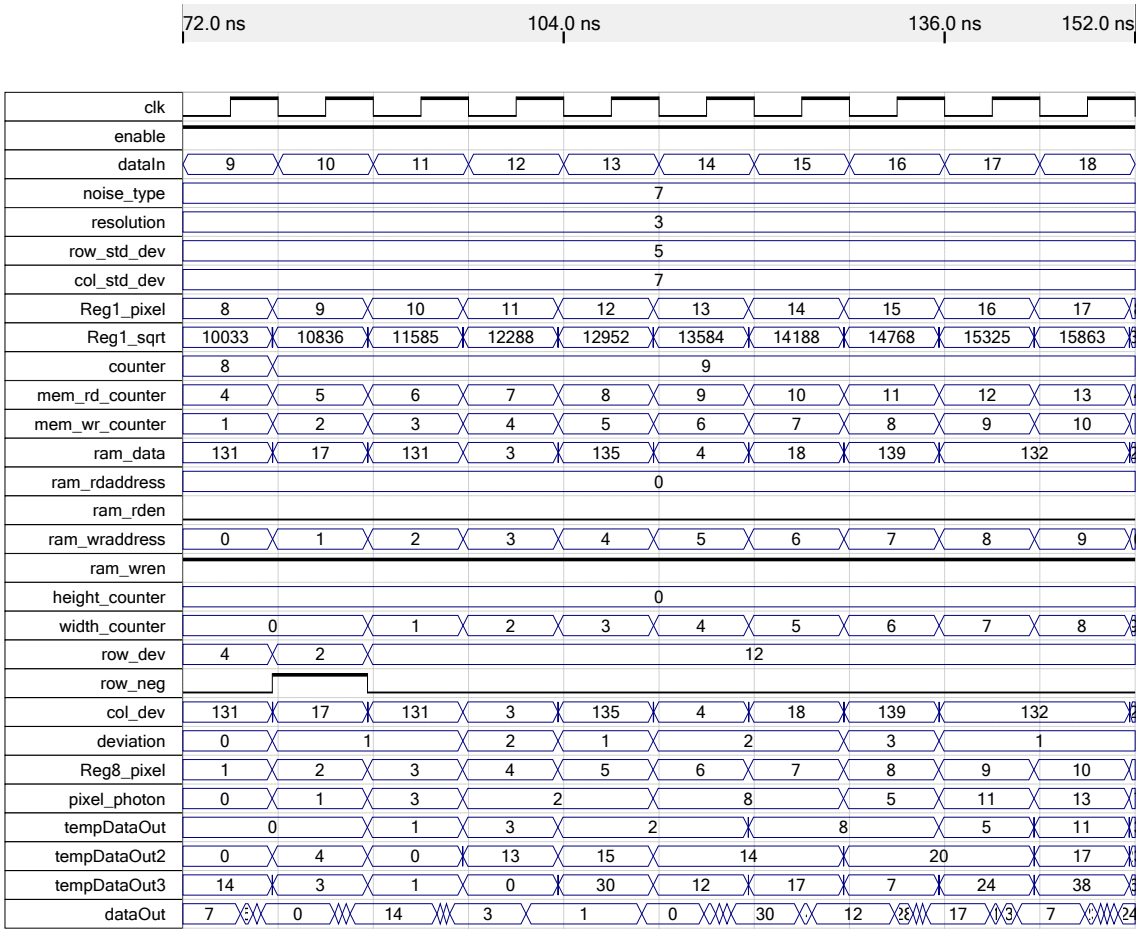
Tabell 4.3: Kvalitetsmål på resultatene fra test på FPGA

Emulert støy	**PSNR (dB)**	**MSE**	**MAE**
Fotonstøy	30.6665	55.7736	3.7064
Radstøy	34.9150	20.9691	2.3576
Kolonnestøy	34.5557	22.7777	2.4749
Alle	28.8158	85.4076	4.8183

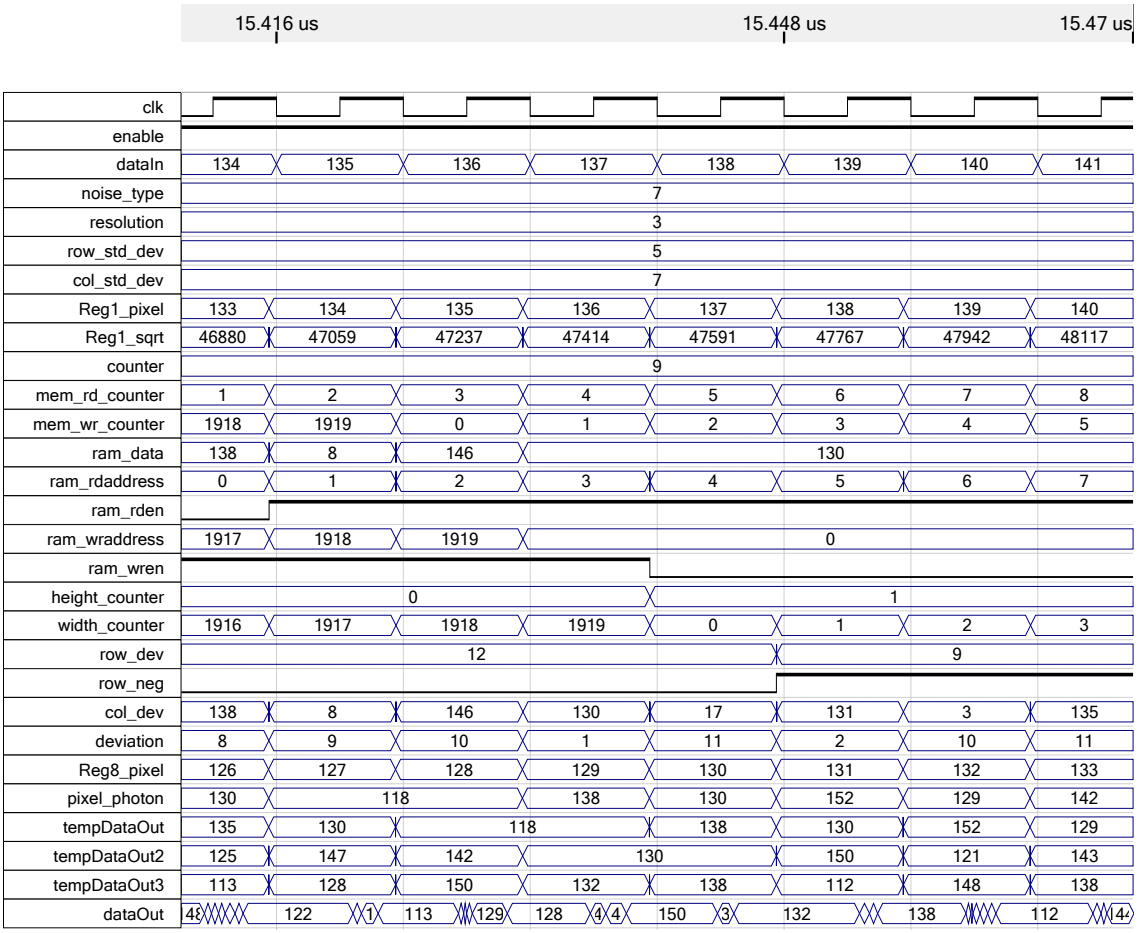
algoritmene som brukes i emulatoren.

4.3 Quartus II-simulering

Quartus II 9.1 sp1 Web Edition ble brukt til å simulere systemet for å verifisere timing og funksjonalitet. Figurene 4.30 og 4.31 viser et utdrag av et bølgediagram som simulerer emuleringen av output fra en CMOS-bildebrikke med full HD-oppløsning som inneholder foton-, rad- og kolonnestøy. Kun de viktigste signalene og registerene er tatt med.



Figur 4.30: Simulering av emulatoren rett etter oppstart.



Figur 4.31: Simulering av emulatoren i det den er ferdig med første raden i et bilde.

Figur 4.30 viser en simulering av emulatoren rett etter oppstart. Til inngangssignalet *dataIn* er det brukt en 8-bits teller som startet på null og teller oppover. Man kan se at utgangssignalet *dataOut* skifter verdi hele veien, men utgangsverdien 30 er verdien til den første pikselen. Ved å se på *dataIn* ser man at det tar 14 klokkesykler fra den første pikselverdien ligger på inngangen av emulatoren, til den er overlagret med støy og er klar på utgangen.

Registeret *Reg8_pixel* inneholder pikselverdier uten støy. Neste klokkesykel vil denne verdien overlagres med fotonstøy og lagres i registeret *pixel_photon*, samtidig som pikselverdien uten støy lagres i registeret *Reg9_pixel* (dette registeret er ikke tatt med i simuleringen). Dersom inngangssignalet *noise_type[0]* er lik 1 vil registeret *tempDataOut* få verdien til *pixel_photon*, og i motsatt tilfellet vil det få verdien som er lagret i registeret *Reg9_pixel*. Ser vi på figur 4.30 ser vi at verdien 1 er lagret i registeret *Reg8_pixel* etter 72 ns. Neste klokkesykel ser vi at registeret *pixel_photon* også får verdien 1. Den emulerte fotonstøyen var altså mindre enn en halv LSB i dette tilfellet og dermed ikke synlig. Den neste klokkesykelen forplantes verdien i *pixel_photon* til registeret *tempDataOut*. Deretter overlagres den med radstøy (så lenge *noise_type[1] = 1*), og lagres i registeret *tempDataOut2*. Som man ser av figurene 4.30 og 4.31 fikk den første raden et positivt avvik på 12 LSB. Til slutt legges det til et kolonneavvik og resultatet lagres i registeret *tempDataOut3* før det

sendes ut på *DataOut* neste klokkesykel. Figuren viser at den første kolonnen fikk et positivt avvik på 17 LSB og hvordan dette resultatet lagres i RAM.

Figur 4.31 viser hvordan systemet oppfører seg i det emulatoren er ferdig med en rad, og begynner på den neste. Som man ser av figuren begynner kolonnestøygeneratoren å lese fra RAMen før den er ferdig å skrive til den. Figuren viser også at det beregnes et nytt radavvik, som denne gangen er negativt (vist ved at signalet *row_neg* går høyt). I tillegg kan man observere at den første pikselen på rad nummer 2, har samme kolonneavvik som den første pikselen på den første raden, nemlig 17 LSB.

4.4 Kompileringsresultater fra Quartus II

Dette delkapittelet presenterer de viktigste kompileringsresultatene fra programmet *Quartus II 9.1 sp 1 Web Edition*.

Tabell 4.4: Maksfrekvensen til emulatoren

Modell	**Maksfrekvens**
Slow 1200 mV 85 °C	124.81 MHz
Slow 1200 mV 0 °C	137.02 MHz

Tabell 4.4 viser maksfrekvensen til emulatoren, og som resultatene viser er emulatoren i stand til å behandle 60 full HD-bilder i sekundet (se (3.4)). En oppsummering av kompileringsresultatene er vist i tabell 4.5.

Tabell 4.5: Oppsummering av kompileringsresultatene

Enhet	**Antall**
Totalt antall logiske enheter	2491
Kombinatoriske funksjoner	2326
Dedikerte logiske registre	1251
Totalt antall registre	1251
Pinner	34
Minnebit	20504

Kapittel 5

Diskusjon

Det er designet en emulator som emulerer output fra en A/D-omformer i en CMOS-bildebrikke, hvor fokuset har vært på funksjonalitet og ytelse. Systemet lar brukeren bestemme oppløsning, og støytyper som skal emuleres. Tilgjengelige oppløsninger er VGA (640×480), HD (1280×720) og full HD (1920×1080), og støytypene som er implementert er foton-, rad- og kolonnestøy. Hastigheten på systemet bestemmes av frekvensen på klokken systemet tar inn, og maksfrekvensen til emulatoren er 124.81 MHz.

Simuleringene av algoritmene emulatoren benytter for å emulere foton-, rad- og kolonnestøy viste at PSNRen til disse var noe lavere enn PSNRen til simuleringene av de samme støytypene hvor Matlabfunksjonene *randn* og *poissrnd* ble brukt til å generere henholdsvis normal- og Poissonfordelte tall. Dette kan best forklares ved å se på fordelingsfunksjonene vist i figur 4.20 og 4.21. Som man ser av disse histogrammene vil algoritmene som emulatoren bruker gi flere piksler med avvik enn ved å benytte virkelige normal- og Poissonfordelte tall. Så selv om maksavviket er større i en virkelig normal- eller Poissonfordeling enn de fordelingene til algoritmene emulatoren benytter, så blir summen av avvikene mindre. Dette gjenspeiles også i kvalitetstallet MAE for de forskjellige simuleringene.

Resultatene fra testene på FPGAen viste seg å ligne mer på simuleringene med Matlabs måte å generere normal- og Poissonfordelte tall, enn simuleringene av algoritmene som emulatoren bruker. Forskjellen på simuleringene av algoritmene til emulatoren og testingen av emulatoren på FPGA er at simuleringene benytter de 1920×1080 første tallene fra Tausworthe-generatoren, mens testen på FPGAen plukker ut 1920×1080 tall fra forskjellige plasser i rekken, avhengig av når CPUen er klar til å lagre resultatet og sende en ny pikselverdi. Dette viser at PSNR og MAE vil variere noe fra bilde til bilde selv med samme input, og annet kan ikke forventes når det brukes pseudo-tilfeldige tall.

Testene og simuleringene viser at emulatoren vil emulere støy som ligner visuelt på foton-, rad- og kolonnestøy. Simuleringen av algoritmene som brukes til å generere noe som minner om normal- og Poissonfordelte tall, viser at fordelingen til støyen er noe kunstig, og dette kan forårsake kunstige artifakter i bildet.

Som sagt har fokuset under designprossesen vært på funksjonalitet og ytelse. At systemet har en ventetid på 14 klokkesykler fra det påtrykkes en pikselverdi til den er overlagret med støy har lite å si, det viktigste er at systemet kan kjøre på

frekvenser opp til 124.81 MHz som gjør at systemet kan behandle 60 full HD-bilder i sekundet. De fleste klokkesyklene systemet bruker er nødvendig for å oppnå ønsket gjennomstrømning, men det er mulig å minske ventetiden noe.

Det kan også gjøres enkle grep for å minske effektforbruket. Mesteparten av prosessene som genererer foton-, rad- og kolonnestøy kjører uavhengig av støytypene som er valgt og hvilken piksel, det vil si posisjon i bildet, som behandles. Ved å kun kjøre de prosessene som trengs til enhver tid kan man spare mye effekt, men effektforbruket har aldri vært noe tema under arbeidet med denne oppgaven.

Kompileringsresultatene viser at sytemet har et relativt beskjedent arealbruk. Systemet bruker for eksempel mindre enn 2 % av de logiske enhetene som er tilgjengelig på *Cyclone III FPGA Development Kit*. Systemet kan dermed implementeres på de fleste FPGAene som er tilgjengelig i dag, selv om det ikke er gjort noen grep for å minske arealet. Men ved å benytte en FPGA med nok minne til å lagre testbildet internt, og nok PLLer til å implementere de ønskede frekvensene kan hele systemet implementeres på FPGAen, hvor man kun trenger å tilføre en referanseklokke til PLLene.

Vanligvis er det lagt inn en offset i bildebrikkene, på for eksempel 100 LSB, for å hindre at støyfordelingen ved laveste belysning blir feil, som følge av at pikselverdien ikke kan bli mindre enn null. For å sørge for at støyfordelingen blir riktig for de høyeste lysintensitetene øker man bit-bredden. Dette er ikke implementert i emulatoren, men det skulle ikke by på særlig store problemer å gjøre det.

Kapittel 6

Konklusjon

Denne rapporten tar for seg utviklingen av et system som emulerer output fra en A/D-omformer i en CMOS-bildebrikke på *Cyclone III FPGA Development Kit*. Systemet lar brukeren velge mellom oppløsningene VGA (640×480), HD (1280×720) og full HD (1920×1080), og støytypene fotonstøy, radstøy og kolonnestøy. SNRen er gjort programmerbar ved at brukeren velger standardavvikene til rad- og kolonnestøyen ved oppstart, dersom disse støytypene er valgt. Emulatoren takler frekvenser opp mot 124.81 MHz, noe som gjør at den er i stand til å behandle 60 full HD-bilder i sekundet.

Simuleringene og testene viser at emulatoren gir et resultat som er visuelt likt reell foton-, rad- og kolonnestøy, men fordelingen til emulatorens tilnærming til Poisson- og normalfordeling er noe kunstig og kan gi uventede artifakter i bildet. PSNR og MAE til bildene ut av emulatoren vil variere noe, men ligge i forventet område.

Videre arbeid kan bestå av å implementere en Gaussisk Random Number Generator (RNG) og en Poisson RNG for å få støyfordelinger som er mer lik de som observeres i CMOS-bildebrikker. Andre ting som kan implementeres er flere støytyper, en offset for å hindre feil støyfordeling ved lav lysintensitet og større bit-bredde for å hindre feil støyfordeling ved høy lysintensitet.

Bibliografi

[1] X. Liu, "CMOS Image Sensors Dynamic Range and SNR Enhancement via Statistical Signal Processing," Ph.D. dissertation, Stanford University, 2002.

[2] C. Mead, "A Sensitive Electronic Photoreceptor," in *1985 Chapel Hill Conference on VLSI*, Chapel Hill, NC, 1985.

[3] P. B. Andersen, "Fotodiode," *Store Norske Leksikon*, 2009. [Online]. Available: http://www.snl.no/fotodiode

[4] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology.* Wiley, 1985.

[5] W. S. Boyle and G. E. Smith, "Charge-coupled semiconductor devices," *Bell Systems Technical Journal*, vol. 49, no. 1, pp. 587–593, 1970.

[6] J. Nakamura, *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras.* Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.

[7] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*, 8th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc., 2007.

[8] H. Nyquist, "Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors," *Phys. Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 110–113, Jul 1928.

[9] J. B. Johnson, "Thermal Agitation of Electricity in Conductors," *Phys. Rev.*, vol. 32, no. 1, p. 97, Jul 1928.

[10] T. Hansen, "Haglstøy," *Store Norske Leksikon.* [Online]. Available: http://www.snl.no/haglstoy

[11] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, and J. Salvi, "Review of CMOS image sensors," *Microelectronics Journal*, vol. 37, no. 5, pp. 433 – 451, 2006. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V44-4H21R3N-1/2/348a7b2ee3dfd1f4fcc6783d808fb7cb

[12] S. Kempainen, "CMOS image sensors: Eclipsing CCDs in visual information?" *EDN*, vol. 42, no. 21, pp. 101–102, 1997.

[13] T. Suzuki, "Challenges of Image-Sensor Development," in *Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2010 IEEE International*, 7-11 2010, pp. 27 –30.

[14] H. Tian, B. Fowler, and A. E. Gamal, "Analysis of Temporal Noise in CMOS Photodiode Active Pixel Sensor," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 36, no. 1, pp. 92–101, 2001.

[15] H.-P. C. Group, "Noise Sources in CMOS Image Sensors," 1998. [Online]. Available: http://www.stw.tu-ilmenau.de/~ff/beruf$_$cc/cmos/cmos$_$noise.pdf

[16] A. J. Theuwissen, "CMOS Image Sensors: State-of-the-art," *Solid-State Electronics*, vol. 52, no. 9, pp. 1401 – 1406, 2008, papers Selected from the 37th European Solid-State Device Research Conference - ESSDERC'07. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TY5-4SJR2HN-1/2/78b043cab23cdae1370392a63576d363

[17] A. J. P. Theuwissen, *Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.

[18] Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, and E. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 4, pp. 600 –612, april 2004.

[19] G. Zhang and P. H. W. Leong, "Ziggurat-based hardware gaussian random number generator," in *IEEE International Conf. Field-Programmable Logic and its Applications*, 2005, pp. 275–280.

[20] P. L'Ecuyer, "Maximally equidistributed combined tausworthe generators," *Math. Comput.*, vol. 65, no. 213, pp. 203–213, 1996.

Tillegg A

Verilogkoden til emulatoren

```
1 module system (
2
3   /*Input*/
4   clk_50,
5   clk_125,
6   resetn,
7   dataIn,
8   switch,
9
10  /*Output*/
11  state_led,
12  status_led,
13  dataOut
14 );
15
16 input      clk_50;
17 input      clk_125;
18 input      resetn;
19 input  [7:0] dataIn;
20 input  [7:0] switch;
21
22 output [2:0] state_led;
23 output [4:0] status_led;
24 output [7:0] dataOut;
25
26 reg [2:0] state_led;
27 reg [4:0] status_led;
28
29 parameter SIZE = 3;
30 parameter S0 = 3'd0;
31 parameter S1 = 3'd1;
32 parameter S2 = 3'd2;
33 parameter S3 = 3'd3;
34 parameter S4 = 3'd4;
35
36 reg [SIZE-1:0] state;
37 reg [SIZE-1:0] next_state;
38
39 reg [2:0] noise_type;
40 reg [1:0] resolution;
```

```
41 reg [5:0] row_std_dev;
42 reg [5:0] col_std_dev;
43 reg enable;
44
45   noise_generator noise_generator_instance(
46     .enable (enable),
47     .clk (clk_125),
48     .dataIn (dataIn),
49     .noise_type (noise_type),
50     .resolution (resolution),
51     .row_std_dev (row_std_dev),
52     .col_std_dev (col_std_dev),
53     .dataOut (dataOut)
54   );
55
56 always @ (switch, state, noise_type)
57 begin
58   case (state)
59     S0: //Velger oppløsning
60       begin
61         if (switch[7] == 1'b1) begin
62           next_state <= S1;
63         end else begin
64           next_state <= S0;
65         end
66       end
67     S1: //Velger støytype
68       begin
69         if (switch[7] == 1'b0) begin
70           if (noise_type[2] == 1'b1) begin
71             next_state <= S2;
72           end else if (noise_type[1] == 1'b1) begin
73             next_state <= S3;
74           end else begin
75             next_state <= S4;
76           end
77         end else begin
78           next_state <= S1;
79         end
80       end
81     S2: //radstøy
82       begin
83         if (switch[6] == 1'b1) begin
84           if (noise_type[1] == 1'b1) begin
85             next_state <= S3;
86           end else begin
87             next_state <= S4;
88           end
89         end else begin
90           next_state <= S2;
91         end
92       end
93     S3: //kolonnestøy
94       begin
95         if (switch[6] == 1'b0) begin
```

```
96            next_state <= S4;
97          end else begin
98            next_state <= S3;
99          end
100       end
101     S4:
102       begin
103         next_state <= S4;
104       end
105   endcase
106 end
107
108 always @ (posedge clk_50 or negedge resetn)
109 begin
110   if (!resetn) begin
111     state <= S0;
112   end else begin
113     state <= next_state;
114   end
115 end
116
117 always @ (posedge clk_50)
118 begin
119   case (state)
120     S0:
121       begin
122         resolution <= switch[1:0];
123         status_led <= {3'b111, ~(resolution)};
124         state_led <= 3'b110;
125         enable <= 1'b0;
126       end
127     S1:
128       begin
129         noise_type <= switch[2:0];
130         status_led <= {2'b11, ~(noise_type)};
131         state_led <= 3'b101;
132         enable <= 1'b0;
133       end
134     S2:
135       begin
136         col_std_dev <= switch[5:0];
137         status_led <= ~col_std_dev[4:0];
138         state_led <= 3'b100;
139         enable <= 1'b0;
140       end
141     S3:
142       begin
143         row_std_dev <= switch[5:0];
144         status_led <= ~row_std_dev[4:0];
145         state_led <= 3'b011;
146         enable <= 1'b0;
147       end
148     S4:
149       begin
150         status_led <= 5'b11111;
```

```
151           state_led <= 3'b010;
152           enable <= 1'b1;
153         end
154       default:
155         begin
156           state_led <= 3'b000;
157           status_led <= 5'b11111;
158         end
159     endcase
160 end
161
162 endmodule
```

```
  1 module noise_generator (
  2   /* inputs */
  3   enable,
  4   clk,
  5   dataIn,
  6   noise_type,
  7   resolution,
  8   row_std_dev,
  9   col_std_dev,
 10
 11   /* outputs */
 12   dataOut
 13 );
 14
 15 input      enable;
 16 input        clk;
 17 input  [ 7 : 0] dataIn;
 18 input  [ 2 : 0] noise_type;
 19 input  [ 1 : 0] resolution;
 20 input  [ 5 : 0] row_std_dev;
 21 input  [ 5 : 0] col_std_dev;
 22
 23 output [ 7 : 0] dataOut;
 24
 25 wire   [ 7 : 0] dataIn;
 26
 27 reg    [ 7 : 0] dataOut;
 28
 29 reg [7:0] tempDataOut;
 30 reg [7:0] tempDataOut2;
 31 reg [7:0] tempDataOut3;
 32
 33 reg [7:0] ram_data;
 34 reg ram_wren;
 35 reg ram_rden;
 36 reg [10:0] ram_wraddress;
 37 reg [10:0] ram_rdaddress;
 38 wire [7:0] ram_q;
 39
 40 wire [15:0] rom_q;
 41
 42 reg [7:0] Reg1_pixel;
 43 reg [7:0] Reg2_pixel;
```

```
44 reg [7:0] Reg3_pixel;
45 reg [7:0] Reg4_pixel;
46 reg [7:0] Reg5_pixel;
47 reg [7:0] Reg6_pixel;
48 reg [7:0] Reg7_pixel;
49 reg [7:0] Reg8_pixel;
50 reg [7:0] Reg9_pixel;
51 reg [15:0] Reg1_sqrt;
52 reg [15:0] Reg2_sqrt;
53 reg [15:0] Reg3_sqrt;
54 reg [15:0] Reg4_sqrt;
55 reg [15:0] Reg5_sqrt;
56 reg [15:0] Reg6_sqrt;
57
58 reg [7:0] pixel_photon;
59
60 reg [7:0] temp;
61
62 reg [7:0] counter;
63 reg [10:0] mem_rd_counter;
64 reg [10:0] mem_wr_counter;
65
66 reg [7:0] deviation;
67 reg [7:0] row_dev;
68 reg [39:0] row_dev_pro;
69 reg [35:0] row_sum1;
70 reg [35:0] row_sum2;
71 reg [32:0] x1;
72 reg [32:0] x2;
73 reg [32:0] x3;
74 reg [32:0] x4;
75 reg row_neg;
76
77 reg [7:0] col_dev;
78 reg [7:0] col_dev_pipe;
79 reg [7:0] col_dev_pipe2;
80 reg [39:0] col_dev_pro;
81 reg [35:0] col_sum1;
82 reg [35:0] col_sum2;
83 reg [15:0] col_buffer;
84 reg [32:0] z1;
85 reg [32:0] z2;
86 reg [32:0] z3;
87 reg [32:0] z4;
88
89 reg [31:0] rnd;
90
91 reg [47:0] produkt;
92 reg [39:0] part_produkt1;
93 reg [39:0] part_produkt2;
94 reg [35:0] part1;
95 reg [35:0] part2;
96 reg [35:0] part3;
97 reg [35:0] part4;
98 reg [33:0] y1;
```

```
 99 reg [33:0] y2;
100 reg [33:0] y3;
101 reg [33:0] y4;
102 reg [33:0] y5;
103 reg [33:0] y6;
104 reg [33:0] y7;
105 reg [33:0] y8;
106
107 reg [31:0] s1;
108 reg [31:0] s2;
109 reg [31:0] s3;
110
111 reg [10:0] width_counter;
112 reg [10:0] height_counter;
113 reg [10:0] width;
114 reg [10:0] height;
115
116 reg [7:0] row_dev_reg;
117 reg [7:0] col_dev_reg;
118
119 parameter [31:0] number1 = 32'hFFFFFFFE;
120 parameter [31:0] number2 = 32'hFFFFFFF8;
121 parameter [31:0] number3 = 32'hFFFFFFF0;
122
123 parameter [31:0] sigma = 32'hAE147AE1;
124 parameter [31:0] sigma2 = 32'hF3333333;
125
126   test_rom rom_instance(
127     .clock (clk),
128     .resetn (enable),
129     .address (dataIn),
130     .q (rom_q)
131   );
132
133   test_ram_dp ram_instance(
134     .data (ram_data),
135     .wraddress (ram_wraddress),
136     .wren (ram_wren),
137     .rdaddress (ram_rdaddress),
138     .rden (ram_rden),
139     .clock (clk),
140     .resetn (enable),
141     .q (ram_q)
142   );
143
144 //Tausworthe pseudo random generator
145 always @ (negedge enable or posedge clk)
146 begin
147   if (!enable) begin
148     s1 = 32'hFFFFFF;
149     s2 = 32'hCCCCCC;
150     s3 = 32'hFF00FF;
151   end else begin
152     s1 = (((s1<<13)^s1)>>19)^((s1&number1)<<12);
153     s2 = (((s2<<2)^s2)>>25)^((s2&number2)<<4);
```

```
154       s3 = (((s3<<3)^s3)>>11)^((s3&number3)<<17);
155       rnd = s1^s2^s3;
156     end
157   end
158
159   //Sets the resolution and the upper limit for the counters
160   //height_counter and width_counter
161   always @ (resolution)
162   begin
163     case (resolution)
164       2'b00:
165         begin
166           width = 11'd1920;
167           height = 11'd1080;
168         end
169       2'b01:
170         begin
171           width = 11'd640;
172           height = 11'd480;
173         end
174       2'b10:
175         begin
176           width = 11'd1280;
177           height = 11'd720;
178         end
179       2'b11:
180         begin
181           width = 11'd1920;
182           height = 11'd1080;
183         end
184     endcase
185   end
186
187   always @ (row_std_dev)
188   begin
189     row_dev_reg <= {2'b00, row_std_dev};
190   end
191
192   always @ (col_std_dev)
193   begin
194     col_dev_reg <= {2'b00, col_std_dev};
195   end
196
197   //Counters
198   always @ (posedge clk or negedge enable)
199   begin
200     if (!enable) begin
201       counter = 8'd0;
202     end else begin
203       if (counter >= 9) begin
204         counter = counter;
205       end else begin
206         counter = counter + 8'd1;
207       end
208     end
```

```
209 end
210
211 always @ (posedge clk or negedge enable)
212 begin
213   if (!enable) begin
214     width_counter = 11'd0;
215     height_counter = 11'd0;
216   end else begin
217     if (counter >= 9) begin
218       if (width_counter >= width-1) begin
219         width_counter = 11'd0;
220         if (height_counter >= height-1) begin
221           height_counter = 11'd0;
222         end else begin
223           height_counter = height_counter + 11'd1;
224         end
225       end else begin
226         width_counter = width_counter + 11'd1;
227       end
228     end else begin
229       height_counter = height_counter;
230       width_counter = width_counter;
231     end
232   end
233 end
234
235 always @ (posedge clk or negedge enable)
236 begin
237   if (!enable) begin
238     mem_wr_counter = 11'd0;
239   end else begin
240     if (counter >= 7) begin
241       if (mem_wr_counter == width-1) begin
242         mem_wr_counter = 11'd0;
243       end else begin
244         mem_wr_counter = mem_wr_counter + 11'd1;
245       end
246     end else begin
247       mem_wr_counter = mem_wr_counter;
248     end
249   end
250 end
251
252 always @ (posedge clk or negedge enable)
253 begin
254   if (!enable) begin
255     mem_rd_counter = 11'd0;
256   end else begin
257     if (counter >= 4) begin
258       if (mem_rd_counter == width-1) begin
259         mem_rd_counter = 11'd0;
260       end else begin
261         mem_rd_counter = mem_rd_counter + 11'd1;
262       end
263     end else begin
```

```
264         mem_rd_counter = mem_rd_counter;
265       end
266     end
267 end
268
269 //Photon Noise
270 always @ (negedge enable or posedge clk)
271 begin
272     if (!enable) begin
273       y1 <= 34'd0;
274       y2 <= 34'd0;
275       y3 <= 34'd0;
276       y4 <= 34'd0;
277       y5 <= 34'd0;
278       y6 <= 34'd0;
279       y7 <= 34'd0;
280       y8 <= 34'd0;
281       Reg1_pixel <= 8'd0;
282       Reg2_pixel <= 8'd0;
283       Reg3_pixel <= 8'd0;
284       Reg4_pixel <= 8'd0;
285       Reg5_pixel <= 8'd0;
286       Reg6_pixel <= 8'd0;
287       Reg7_pixel <= 8'd0;
288       Reg8_pixel <= 8'd0;
289       Reg9_pixel <= 8'd0;
290       Reg1_sqrt <= 16'd0;
291       Reg2_sqrt <= 16'd0;
292       Reg3_sqrt <= 16'd0;
293       Reg4_sqrt <= 16'd0;
294       Reg5_sqrt <= 16'd0;
295       Reg6_sqrt <= 16'd0;
296       part1 <= 36'd0;
297       part2 <= 36'd0;
298       part3 <= 36'd0;
299       part4 <= 36'd0;
300       part_produkt1 <= 40'd0;
301       part_produkt2 <= 40'd0;
302       produkt <= 48'd0;
303       deviation <= 8'd0;
304       temp <= 8'd0;
305       pixel_photon <= 8'd0;
306     end else begin
307 /*-------------------- STAGE 1 ------------------------------*/
308       Reg1_pixel <= dataIn;
309 /*-------------------- STAGE 2 ------------------------------*/
310       Reg2_pixel <= Reg1_pixel;
311 /*-------------------- STAGE 3 ------------------------------*/
312       Reg1_sqrt <= rom_q;
313       Reg3_pixel <= Reg2_pixel;
314 /*-------------------- STAGE 4 ------------------------------*/
315       y1 <=
316         (Reg1_sqrt[0] ? {1'd0, rnd} : 0) +
317         (Reg1_sqrt[1] ? {rnd, 1'd0} : 0);
318       y2 <=
```

```
319       (Reg1_sqrt[2] ? {1'd0, rnd} : 0) +
320       (Reg1_sqrt[3] ? {rnd, 1'd0} : 0);
321     y3 <=
322       (Reg1_sqrt[4] ? {1'd0, rnd} : 0) +
323       (Reg1_sqrt[5] ? {rnd, 1'd0} : 0);
324     y4 <=
325       (Reg1_sqrt[6] ? {1'd0, rnd} : 0) +
326       (Reg1_sqrt[7] ? {rnd, 1'd0} : 0);
327     y5 <=
328       (Reg1_sqrt[8] ? {1'd0, rnd} : 0) +
329       (Reg1_sqrt[9] ? {rnd, 1'd0} : 0);
330     y6 <=
331       (Reg1_sqrt[10] ? {1'd0, rnd} : 0) +
332       (Reg1_sqrt[11] ? {rnd, 1'd0} : 0);
333     y7 <=
334       (Reg1_sqrt[12] ? {1'd0, rnd} : 0) +
335       (Reg1_sqrt[13] ? {rnd, 1'd0} : 0);
336     y8 <=
337       (Reg1_sqrt[14] ? {1'd0, rnd} : 0) +
338       (Reg1_sqrt[15] ? {rnd, 1'd0} : 0);
339
340     Reg4_pixel <= Reg3_pixel;
341     Reg2_sqrt <= Reg1_sqrt;
342
343 /*------------------- STAGE 5 ---------------------------------*/
344     part1 <= {2'd0, y1} + {y2, 2'd0};
345     part2 <= {2'd0, y3} + {y4, 2'd0};
346     part3 <= {2'd0, y5} + {y6, 2'd0};
347     part4 <= {2'd0, y7} + {y8, 2'd0};
348
349     Reg5_pixel <= Reg4_pixel;
350     Reg3_sqrt <= Reg2_sqrt;
351 /*------------------- STAGE 6 ---------------------------------*/
352     part_produkt1 <= {4'd0, part1} + {part2, 4'd0};
353     part_produkt2 <= {4'd0, part3} + {part4, 4'd0};
354
355     Reg6_pixel <= Reg5_pixel;
356     Reg4_sqrt <= Reg3_sqrt;
357
358 /*------------------- STAGE 7 ---------------------------------*/
359     produkt <= {8'd0, part_produkt1} + {part_produkt2, 8'd0};
360
361     Reg7_pixel <= Reg6_pixel;
362     Reg5_sqrt <= Reg4_sqrt;
363
364 /*------------------- STAGE 8 ---------------------------------*/
365     if (produkt[35] == 1) begin //avrunding
366       deviation <= {4'b0000, produkt[47:44]} + 8'b00000001;
367     end else begin
368       deviation <= {4'b0000, produkt[47:44]};
369     end
370
371     Reg8_pixel <= Reg7_pixel;
372     Reg6_sqrt <= Reg5_sqrt;
373
```

```
374 /*------------------- STAGE 9 ---------------------------------*/
375     if (s1 <= sigma) begin
376       if (rnd[0] == 1) begin
377         if (Reg8_pixel + deviation >= 255) begin
378           pixel_photon <= 8'd255;
379         end else begin
380           pixel_photon <= Reg8_pixel + deviation;
381         end
382       end else begin
383         if (deviation >= Reg8_pixel) begin
384           pixel_photon <= 8'd0;
385         end else begin
386           pixel_photon <= Reg8_pixel - deviation;
387         end
388       end
389     end else if (s1 <= sigma2) begin
390       temp = Reg6_sqrt[11] ? {4'd0, Reg6_sqrt[15:12]} + 8'd1 : {4'd0,
           Reg6_sqrt[15:12]};
391       if (rnd[0] == 1) begin
392         if (Reg8_pixel + temp + deviation >= 255) begin
393           pixel_photon <= 8'd255;
394         end else begin
395           pixel_photon <= Reg8_pixel + temp + deviation;
396         end
397       end else begin
398         if (deviation + temp >= Reg8_pixel) begin
399           pixel_photon <= 8'd0;
400         end else begin
401           pixel_photon <= Reg8_pixel - temp - deviation;
402         end
403       end
404     end else begin
405       temp = Reg6_sqrt[10] ? {3'd0, Reg6_sqrt[15:11]} + 8'd1 : {3'd0,
           Reg6_sqrt[15:11]};
406       if (rnd[0] == 1) begin
407         if (Reg8_pixel + temp + deviation >= 255) begin
408           pixel_photon <= 8'd255;
409         end else begin
410           pixel_photon <= Reg8_pixel + temp + deviation;
411         end
412       end else begin
413         if (deviation + temp >= Reg8_pixel) begin
414           pixel_photon <= 8'd0;
415         end else begin
416           pixel_photon <= Reg8_pixel - temp - deviation;
417         end
418       end
419     end
420
421     Reg9_pixel <= Reg8_pixel;
422
423 /*-------------------------------------------------------------*/
424   end
425 end
426
```

```
427 //Row Noise
428 always @ (negedge enable or posedge clk)
429 begin
430   if (!enable) begin
431     x1 <= 33'd0;
432     x2 <= 33'd0;
433     x3 <= 33'd0;
434     x4 <= 33'd0;
435     row_sum1 <= 36'd0;
436     row_sum2 <= 36'd0;
437     row_dev_pro <= 40'd0;
438     row_dev <= 8'd0;
439     row_neg <= 1'b0;
440   end else begin
441 /*-------------------- STAGE 1 ------------------------*/
442
443     x1 <=
444       (row_dev_reg[0] ? {1'd0, s3} : 0) +
445       (row_dev_reg[1] ? {s3, 1'd0} : 0);
446     x2 <=
447       (row_dev_reg[2] ? {1'd0, s3} : 0) +
448       (row_dev_reg[3] ? {s3, 1'd0} : 0);
449     x3 <=
450       (row_dev_reg[4] ? {1'd0, s3} : 0) +
451       (row_dev_reg[5] ? {s3, 1'd0} : 0);
452     x4 <=
453       (row_dev_reg[6] ? {1'd0, s3} : 0) +
454       (row_dev_reg[7] ? {s3, 1'd0} : 0);
455
456 /*-------------------- STAGE 2 ------------------------*/
457
458     row_sum1 <= x1 + {x2, 2'd0};
459     row_sum2 <= x3 + {x4, 2'd0};
460
461 /*-------------------- STAGE 3 ------------------------*/
462
463     row_dev_pro <= row_sum1 + {row_sum2, 4'd0};
464
465 /*-------------------- STAGE 4 ------------------------*/
466
467     if (width_counter == 0) begin
468       if (s2 <= sigma) begin
469         row_dev <= row_dev_pro[39:32];
470       end else if (s2 <= sigma2) begin
471         row_dev <= row_dev_reg + row_dev_pro[39:32];
472       end else begin
473         row_dev <= (row_dev_reg<<1)+row_dev_pro[39:32];
474       end
475
476       if (s2[0] == 1) begin
477         row_neg <= 1'b1;
478       end else begin
479         row_neg <= 1'b0;
480       end
481     end else begin
```

```
482         row_neg <= row_neg;
483         row_dev <= row_dev;
484       end
485     end
486 end
487
488 //Column noise
489 always @ (negedge enable or posedge clk)
490 begin
491     if (!enable) begin
492       z1 <= 33'd0;
493       z2 <= 33'd0;
494       z3 <= 33'd0;
495       z4 <= 33'd0;
496       col_sum1 <= 36'd0;
497       col_sum2 <= 36'd0;
498       col_dev_pro <= 40'd0;
499       col_dev <= 8'd0;
500       ram_data <= 8'd0;
501       ram_wraddress <= 11'd0;
502       ram_rdaddress <= 11'd0;
503       ram_wren <= 1'b0;
504       ram_rden <= 1'b0;
505     end else begin
506 /*---------------- STAGE 1 ----------------------------*/
507       z1 <=
508         (col_dev_reg[0] ? {1'd0, s2} : 0) +
509         (col_dev_reg[1] ? {s2, 1'd0} : 0);
510       z2 <=
511         (col_dev_reg[2] ? {1'd0, s2} : 0) +
512         (col_dev_reg[3] ? {s2, 1'd0} : 0);
513       z3 <=
514         (col_dev_reg[4] ? {1'd0, s2} : 0) +
515         (col_dev_reg[5] ? {s2, 1'd0} : 0);
516       z4 <=
517         (col_dev_reg[6] ? {1'd0, s2} : 0) +
518         (col_dev_reg[7] ? {s2, 1'd0} : 0);
519
520 /*---------------- STAGE 2 ----------------------------*/
521
522       col_sum1 <= z1 + {z2, 2'd0};
523       col_sum2 <= z3 + {z4, 2'd0};
524
525 /*---------------- STAGE 3 ----------------------------*/
526
527       col_dev_pro <= col_sum1 + {col_sum2, 4'd0};
528
529 /*---------------- STAGE 4 ----------------------------*/
530
531       if (height_counter == 0 && width_counter < width-1) begin
532         if (s3 <= sigma) begin
533           if (s3[0] == 1) begin
534             ram_data <= {1'b1, col_dev_pro[38:32]};
535             ram_wraddress <= mem_wr_counter;
536             ram_wren <= 1'b1;
```

```
537           col_dev <= {1'b1, col_dev_pro[38:32]};
538         end else begin
539           ram_data <= col_dev_pro[39:32];
540           ram_wraddress <= mem_wr_counter;
541           ram_wren <= 1'b1;
542           col_dev <= col_dev_pro[39:32];
543         end
544       end else if (s3 <= sigma2) begin
545         if (s3[0] == 1) begin
546           ram_data <= {1'b1, col_dev_reg[6:0] + col_dev_pro[38:32]};
547           ram_wraddress <= mem_wr_counter;
548           ram_wren <= 1'b1;
549           col_dev <= {1'b1, col_dev_reg[6:0] + col_dev_pro[38:32]};
550         end else begin
551           ram_data <= col_dev_reg + col_dev_pro[39:32];
552           ram_wraddress <= mem_wr_counter;
553           ram_wren <= 1'b1;
554           col_dev <= col_dev_reg + col_dev_pro[39:32];
555         end
556       end else begin
557         if (s3[0] == 1) begin
558           ram_data <= {1'b1 ,(col_dev_reg[6:0]<<1) + col_dev_pro
                [38:32]};
559           ram_wraddress <= mem_wr_counter;
560           ram_wren <= 1'b1;
561           col_dev <= {1'b1 ,(col_dev_reg[6:0]<<1) + col_dev_pro
                [38:32]};
562         end else begin
563           ram_data <= (col_dev_reg<<1) + col_dev_pro[39:32];
564           ram_wraddress <= mem_wr_counter;
565           ram_wren <= 1'b1;
566           col_dev <= (col_dev_reg<<1) + col_dev_pro[39:32];
567         end
568       end
569
570       if (width_counter == width-4) begin
571         ram_rdaddress <= mem_rd_counter;
572         ram_rden <= 1'b1;
573       end else if (width_counter == width-3) begin
574         ram_rdaddress <= mem_rd_counter;
575         ram_rden <= 1'b1;
576       end else if (width_counter == width-2) begin
577         ram_rdaddress <= mem_rd_counter;
578         ram_rden <= 1'b1;
579       end else if (width_counter == width-1) begin
580         ram_wren <= 1'b0;
581         ram_rdaddress <= mem_rd_counter;
582         ram_rden <= 1'b1;
583       end else begin
584         ram_rden <= 1'b0;
585       end
586
587     end else begin
588       ram_wren <= 1'b0;
589       ram_rdaddress <= mem_rd_counter;
```

```
590         ram_rden <= 1'b1;
591         col_dev <= ram_q;
592       end
593     end
594 end
595
596 always @ (negedge enable or posedge clk)
597 begin
598     if (!enable) begin
599       dataOut <= 8'd0;
600       tempDataOut <= 8'd0;
601       tempDataOut2 <= 8'd0;
602       tempDataOut3 <= 8'd0;
603       col_dev_pipe <= 8'd0;
604       col_dev_pipe2 <= 8'd0;
605     end else begin
606 /*------------------------------------ STAGE 1
      ------------------------------------*/
607
608       if (noise_type[0] == 1'b1) begin //Photon noise
609         tempDataOut <= pixel_photon;
610       end else begin //No photon noise
611         tempDataOut <= Reg9_pixel;
612       end
613
614       col_dev_pipe <= col_dev;
615
616 /*------------------------------------ STAGE 2
      ------------------------------------*/
617
618       if (noise_type[1] == 1'b1) begin //Row noise
619         if (row_neg == 1) begin
620           if (row_dev >= tempDataOut) begin
621             tempDataOut2 <= 8'd0;
622           end else begin
623             tempDataOut2 <= tempDataOut - row_dev;
624           end
625         end else begin
626           tempDataOut2 <= tempDataOut + row_dev;
627         end
628       end else begin //No row noise
629         tempDataOut2 <= tempDataOut;
630       end
631
632       col_dev_pipe2 <= col_dev_pipe;
633
634 /*------------------------------------ STAGE 3
      ------------------------------------*/
635
636       if (noise_type[2] == 1'b1) begin //Column noise
637         if (col_dev_pipe2[7] == 1) begin
638           if (col_dev_pipe2[6:0] >= tempDataOut2) begin
639             tempDataOut3 <= 8'd0;
640           end else begin
641             tempDataOut3 <= tempDataOut2 - col_dev_pipe2[6:0];
```

```
642           end
643         end else begin
644           tempDataOut3 <= tempDataOut2 + col_dev_pipe2[6:0];
645         end
646       end else begin //No column noise
647         tempDataOut3 <= tempDataOut2;
648       end
649
650 /*------------------------------------ STAGE 4
      ------------------------------------*/
651
652       dataOut <= tempDataOut3;
653
654     end
655 end
656
657 endmodule
```

Tillegg B

Emulatoren i testsystemet

```
1  module noise_generator (
2    /* inputs */
3    enable,
4    clk,
5    dataIn,
6    dataValid,
7    resolution,
8    noise_type,
9    row_std_dev,
10   col_std_dev,
11   cpu_ready,
12
13   /* outputs */
14   data_ready,
15   finished,
16   dataOut
17 );
18
19 input      enable;
20 input        clk;
21 input  [ 7 : 0] dataIn;
22 input      dataValid;
23 input  [ 1 : 0] resolution;
24 input  [ 2 : 0] noise_type;
25 input  [ 7 : 0] row_std_dev;
26 input  [ 7 : 0] col_std_dev;
27 input      cpu_ready;
28
29 output       data_ready;
30 output       finished;
31 output [ 7 : 0] dataOut;
32
33 reg        data_ready;
34 reg        finished;
35 reg    [ 7 : 0] dataOut;
36
37 reg    [10 : 0] width;
38 reg    [10 : 0] width_counter;
39 reg    [10 : 0] height;
40 reg    [10 : 0] height_counter;
```

```
41 reg     [20 : 0] total;
42 reg     [20 : 0] pixel_counter;
43 reg     [ 3 : 0] counter;
44
45 reg [7:0] rom_address;
46 reg [15:0] rom_q;
47
48 reg [7:0] ram_data;
49 reg ram_wren;
50 reg ram_rden;
51 reg [10:0] ram_wraddress;
52 reg [10:0] ram_rdaddress;
53 wire [7:0] ram_q;
54
55 reg [31:0] rnd;
56 reg [31:0] s1;
57 reg [31:0] s2;
58 reg [31:0] s3;
59
60 reg [47:0] produkt;
61 reg [39:0] part_produkt1;
62 reg [39:0] part_produkt2;
63 reg [35:0] part1;
64 reg [35:0] part2;
65 reg [35:0] part3;
66 reg [35:0] part4;
67 reg [33:0] y1;
68 reg [33:0] y2;
69 reg [33:0] y3;
70 reg [33:0] y4;
71 reg [33:0] y5;
72 reg [33:0] y6;
73 reg [33:0] y7;
74 reg [33:0] y8;
75
76 reg [7:0] deviation;
77 reg [7:0] row_dev;
78 reg [39:0] row_dev_pro;
79 reg [35:0] row_sum1;
80 reg [35:0] row_sum2;
81 reg [32:0] x1;
82 reg [32:0] x2;
83 reg [32:0] x3;
84 reg [32:0] x4;
85 reg row_neg;
86
87 reg [7:0] col_dev;
88 reg [7:0] col_dev_pipe;
89 reg [7:0] col_dev_pipe2;
90 reg [39:0] col_dev_pro;
91 reg [35:0] col_sum1;
92 reg [35:0] col_sum2;
93 reg [15:0] col_buffer;
94 reg [32:0] z1;
95 reg [32:0] z2;
```

```
 96 reg [32:0] z3;
 97 reg [32:0] z4;
 98
 99 reg [15:0] sqrt;
100
101 reg [7:0] pipe_pixel5;
102 reg [15:0] pipe_sqrt1;
103 reg [15:0] pipe_sqrt2;
104 reg [15:0] pipe_sqrt3;
105 reg [15:0] pipe_sqrt4;
106 reg [15:0] pipe_sqrt5;
107
108 reg [7:0] temp;
109
110 reg [7:0] tempDataOut;
111 reg [7:0] tempDataOut2;
112 reg [7:0] tempDataOut3;
113
114 reg [7:0] col_dev_reg;
115 reg [7:0] row_dev_reg;
116 reg [2:0] noise_type_reg;
117
118 parameter [31:0] number1 = 32'hFFFFFFFE;
119 parameter [31:0] number2 = 32'hFFFFFFF8;
120 parameter [31:0] number3 = 32'hFFFFFFF0;
121
122 parameter [31:0] sigma = 32'hAE147AE1;
123 parameter [31:0] sigma2 = 32'hF3333333;
124
125   test_rom rom_instance(
126     .clock (clk),
127     .resetn (enable),
128     .address (rom_address),
129     .q (rom_q)
130   );
131
132   test_ram_dp ram_instance(
133     .data (ram_data),
134     .wraddress (ram_wraddress),
135     .wren (ram_wren),
136     .rdaddress (ram_rdaddress),
137     .rden (ram_rden),
138     .clock (clk),
139     .resetn (enable),
140     .q (ram_q)
141   );
142
143 //Tausworthe pseudo random generator
144 always @ (negedge enable or posedge clk)
145 begin
146   if (!enable) begin
147     s1 = 32'hFFFFFF;
148     s2 = 32'hCCCCCC;
149     s3 = 32'hFF00FF;
150   end else begin
```

```
151       s1 = (((s1<<13)^s1)>>19)^((s1&number1)<<12);
152       s2 = (((s2<<2)^s2)>>25)^((s2&number2)<<4);
153       s3 = (((s3<<3)^s3)>>11)^((s3&number3)<<17);
154       rnd = s1^s2^s3;
155     end
156 end
157
158 always @(resolution)
159 begin
160     case (resolution)
161       2'b00:
162         begin
163           width = 11'd1920;
164           height = 11'd1080;
165           total = 21'd2073600;
166         end
167       2'b01:
168         begin
169           width = 11'd640;
170           height = 11'd480;
171           total = 21'd307200;
172         end
173       2'b10:
174         begin
175           width = 11'd1280;
176           height = 11'd720;
177           total = 21'd921600;
178         end
179       2'b11:
180         begin
181           width = 11'd1920;
182           height = 11'd1080;
183           total = 21'd2073600;
184         end
185     endcase
186 end
187
188 always @(row_std_dev)
189 begin
190     row_dev_reg <= row_std_dev;
191 end
192
193 always @(col_std_dev)
194 begin
195     col_dev_reg <= col_std_dev;
196 end
197
198 always @(noise_type)
199 begin
200     noise_type_reg <= noise_type;
201 end
202
203 //Counters
204 always @(posedge dataValid or negedge enable)
205 begin
```

```
206   if (!enable) begin
207     width_counter <= 11'd0;
208     height_counter <= 11'd0;
209   end else begin
210     if (width_counter >= width) begin
211       width_counter <= 11'd1;
212       if (height_counter >= height-1) begin
213         height_counter <= 11'd0;
214       end else begin
215         height_counter <= height_counter + 11'd1;
216       end
217     end else begin
218       width_counter <= width_counter + 11'd1;
219     end
220   end
221 end
222
223 //Row Noise
224 always @ (negedge enable or posedge clk)
225 begin
226   if (!enable) begin
227     row_dev = 8'd0;
228     x1 = 33'd0;
229     x2 = 33'd0;
230     x3 = 33'd0;
231     x4 = 33'd0;
232     row_sum1 = 36'd0;
233     row_sum2 = 36'd0;
234     row_dev_pro = 40'd0;
235   end else begin
236 /*------------------- STAGE 1 -------------------------*/
237
238     x1 <=
239       (row_dev_reg[0] ? {1'd0, s3} : 0) +
240       (row_dev_reg[1] ? {s3, 1'd0} : 0);
241     x2 <=
242       (row_dev_reg[2] ? {1'd0, s3} : 0) +
243       (row_dev_reg[3] ? {s3, 1'd0} : 0);
244     x3 <=
245       (row_dev_reg[4] ? {1'd0, s3} : 0) +
246       (row_dev_reg[5] ? {s3, 1'd0} : 0);
247     x4 <=
248       (row_dev_reg[6] ? {1'd0, s3} : 0) +
249       (row_dev_reg[7] ? {s3, 1'd0} : 0);
250
251 /*------------------- STAGE 2 -------------------------*/
252
253     row_sum1 <= x1 + {x2, 2'd0};
254     row_sum2 <= x3 + {x4, 2'd0};
255
256 /*------------------- STAGE 3 -------------------------*/
257
258     row_dev_pro <= row_sum1 + {row_sum2, 4'd0};
259
260 /*------------------- STAGE 4 -------------------------*/
```

```
261
262     if (width_counter == 1 && counter == 1) begin
263       if (s2 <= sigma) begin
264         row_dev <= row_dev_pro[39:32];
265       end else if (s2 <= sigma2) begin
266         row_dev <= row_dev_reg + row_dev_pro[39:32];
267       end else begin
268         row_dev <= (row_dev_reg<<1)+row_dev_pro[39:32];
269       end
270
271       if (s2[0] == 1) begin
272         row_neg <= 1'b1;
273       end else begin
274         row_neg <= 1'b0;
275       end
276     end else begin
277       row_neg <= row_neg;
278       row_dev <= row_dev;
279     end
280   end
281 end
282
283 //Column noise
284 always @ (negedge enable or posedge clk)
285 begin
286   if (!enable) begin
287     col_dev = 8'd0;
288     z1 = 33'd0;
289     z2 = 33'd0;
290     z3 = 33'd0;
291     z4 = 33'd0;
292     col_sum1 = 36'd0;
293     col_sum2 = 36'd0;
294     col_dev_pro = 40'd0;
295   end else begin
296 /*---------------- STAGE 1 ----------------------*/
297     z1 <=
298       (col_dev_reg[0] ? {1'd0, s2} : 0) +
299       (col_dev_reg[1] ? {s2, 1'd0} : 0);
300     z2 <=
301       (col_dev_reg[2] ? {1'd0, s2} : 0) +
302       (col_dev_reg[3] ? {s2, 1'd0} : 0);
303     z3 <=
304       (col_dev_reg[4] ? {1'd0, s2} : 0) +
305       (col_dev_reg[5] ? {s2, 1'd0} : 0);
306     z4 <=
307       (col_dev_reg[6] ? {1'd0, s2} : 0) +
308       (col_dev_reg[7] ? {s2, 1'd0} : 0);
309
310 /*---------------- STAGE 2 ----------------------*/
311
312     col_sum1 <= z1 + {z2, 2'd0};
313     col_sum2 <= z3 + {z4, 2'd0};
314
315 /*---------------- STAGE 3 ----------------------*/
```

```
316
317     col_dev_pro <= col_sum1 + {col_sum2, 4'd0};
318
319 /*---------------- STAGE 4 ----------------------*/
320
321     if (height_counter == 0 && counter == 1) begin
322       if (s3 <= sigma) begin
323         if (s3[0] == 1) begin
324           ram_data <= {1'b1, col_dev_pro[38:32]};
325           ram_wraddress <= width_counter-11'd1;
326           ram_wren <= 1'b1;
327           col_dev <= {1'b1, col_dev_pro[38:32]};
328         end else begin
329           ram_data <= col_dev_pro[39:32];
330           ram_wraddress <= width_counter-11'd1;
331           ram_wren <= 1'b1;
332           col_dev <= col_dev_pro[39:32];
333         end
334       end else if (s3 <= sigma2) begin
335         if (s3[0] == 1) begin
336           ram_data <= {1'b1, col_dev_reg[6:0] + col_dev_pro[38:32]};
337           ram_wraddress <= width_counter-11'd1;
338           ram_wren <= 1'b1;
339           col_dev <= {1'b1, col_dev_reg[6:0] + col_dev_pro[38:32]};
340         end else begin
341           ram_data <= col_dev_reg + col_dev_pro[39:32];
342           ram_wraddress <= width_counter-11'd1;
343           ram_wren <= 1'b1;
344           col_dev <= col_dev_reg + col_dev_pro[39:32];
345         end
346       end else begin
347         if (s3[0] == 1) begin
348           ram_data <= {1'b1 ,(col_dev_reg[6:0]<<1) + col_dev_pro
                [38:32]};
349           ram_wraddress <= width_counter-11'd1;
350           ram_wren <= 1'b1;
351           col_dev <= {1'b1 ,(col_dev_reg[6:0]<<1) + col_dev_pro
                [38:32]};
352         end else begin
353           ram_data <= (col_dev_reg<<1) + col_dev_pro[39:32];
354           ram_wraddress <= width_counter-11'd1;
355           ram_wren <= 1'b1;
356           col_dev <= (col_dev_reg<<1) + col_dev_pro[39:32];
357         end
358       end
359
360     end else if (height_counter > 0 && counter == 1) begin
361       ram_wren <= 1'b0;
362       ram_rdaddress <= width_counter;
363       ram_rden <= 1'b1;
364       col_dev <= ram_q;
365     end else begin
366       col_dev <= col_dev;
367       ram_wren <= ram_wren;
368       ram_rden <= ram_rden;
```

```
369         ram_wraddress <= ram_wraddress;
370         ram_rdaddress <= ram_rdaddress;
371       end
372     end
373 end
374
375 //Photon noise and control block
376 always @ (posedge clk or negedge enable)
377 begin
378     if (enable == 0) begin
379       dataOut <= 8'd0;
380       counter <= 4'd0;
381       pixel_counter <= 21'd0;
382       finished <= 1'b0;
383       rom_address <= 8'd0;
384       data_ready <= 1'b0;
385       sqrt <= 16'd0;
386       pipe_sqrt1 <= 16'd0;
387       pipe_sqrt2 <= 16'd0;
388       pipe_sqrt3 <= 16'd0;
389       pipe_sqrt4 <= 16'd0;
390       pipe_sqrt5 <= 16'd0;
391       pipe_pixel5 <= 8'd0;
392       y1 <= 34'd0;
393       y2 <= 34'd0;
394       y3 <= 34'd0;
395       y4 <= 34'd0;
396       y5 <= 34'd0;
397       y6 <= 34'd0;
398       y7 <= 34'd0;
399       y8 <= 34'd0;
400       part1 <= 36'd0;
401       part2 <= 36'd0;
402       part3 <= 36'd0;
403       part4 <= 36'd0;
404       part_produkt1 <= 40'd0;
405       part_produkt2 <= 40'd0;
406       produkt <= 48'd0;
407       temp <= 8'd0;
408       tempDataOut <= 8'd0;
409       tempDataOut2 <= 8'd0;
410       deviation <= 8'd0;
411     end else begin
412       if (counter == 0 && dataValid == 1) begin
413         rom_address <= dataIn;
414
415         counter <= counter + 4'd1;
416       end else if (counter == 1) begin
417         counter = counter + 4'd1;
418       end else if (counter == 2) begin
419         counter = counter + 4'd1;
420       end else if (counter == 3) begin
421         sqrt <= rom_q;
422         counter = counter + 4'd1;
423       end else if (counter == 4) begin
```

```
424
425         y1 <=
426           (sqrt[0] ? {1'd0, rnd} : 0) +
427           (sqrt[1] ? {rnd, 1'd0} : 0);
428         y2 <=
429           (sqrt[2] ? {1'd0, rnd} : 0) +
430           (sqrt[3] ? {rnd, 1'd0} : 0);
431         y3 <=
432           (sqrt[4] ? {1'd0, rnd} : 0) +
433           (sqrt[5] ? {rnd, 1'd0} : 0);
434         y4 <=
435           (sqrt[6] ? {1'd0, rnd} : 0) +
436           (sqrt[7] ? {rnd, 1'd0} : 0);
437         y5 <=
438           (sqrt[8] ? {1'd0, rnd} : 0) +
439           (sqrt[9] ? {rnd, 1'd0} : 0);
440         y6 <=
441           (sqrt[10] ? {1'd0, rnd} : 0) +
442           (sqrt[11] ? {rnd, 1'd0} : 0);
443         y7 <=
444           (sqrt[12] ? {1'd0, rnd} : 0) +
445           (sqrt[13] ? {rnd, 1'd0} : 0);
446         y8 <=
447           (sqrt[14] ? {1'd0, rnd} : 0) +
448           (sqrt[15] ? {rnd, 1'd0} : 0);
449
450         pipe_sqrt1 <= sqrt;
451         counter = counter + 4'd1;
452       end else if (counter == 5) begin
453         part1 <= y1 + {y2, 2'd0};
454         part2 <= y3 + {y4, 2'd0};
455         part3 <= y5 + {y6, 2'd0};
456         part4 <= y7 + {y8, 2'd0};
457
458         pipe_sqrt2 <= pipe_sqrt1;
459         counter = counter + 4'd1;
460       end else if (counter == 6) begin
461         part_produkt1 <= part1 + {part2, 4'd0};
462         part_produkt2 <= part3 + {part4, 4'd0};
463
464         pipe_sqrt3 <= pipe_sqrt2;
465         counter = counter + 4'd1;
466       end else if (counter == 7) begin
467         produkt <= part_produkt1 + {part_produkt2, 8'd0};
468
469         pipe_sqrt4 <= pipe_sqrt3;
470         counter = counter + 4'd1;
471       end else if (counter == 8) begin
472         if (produkt[43] == 1) begin //avrunding
473           deviation <= {4'b0000, produkt[47:44]} + 8'b00000001;
474         end else begin
475           deviation <= {4'b0000, produkt[47:44]};
476         end
477
478         pipe_sqrt5 <= pipe_sqrt4;
```

```
479       pipe_pixel5 <= dataIn;
480       counter = counter + 4'd1;
481     end else if (counter == 9) begin
482       if (noise_type_reg[0] == 1) begin //Photon noise
483         if (s1 <= sigma) begin
484           if (rnd[0] == 1) begin
485             if (pipe_pixel5+deviation > 255) begin
486               tempDataOut <= 8'd255;
487             end else begin
488               tempDataOut <= pipe_pixel5 + deviation;
489             end
490           end else begin
491             if (deviation >= pipe_pixel5) begin
492               tempDataOut <= 8'd0;
493             end else begin
494               tempDataOut <= pipe_pixel5 - deviation;
495             end
496           end
497         end else if (s1 <= sigma2) begin
498           temp = pipe_sqrt5[11] ? {4'd0, pipe_sqrt5[15:12]} + 8'd1 :
                {4'd0, pipe_sqrt5[15:12]};
499           if (rnd[0] == 1) begin
500             if (pipe_pixel5+temp+deviation > 255) begin
501               tempDataOut <= 8'd255;
502             end else begin
503               tempDataOut <= pipe_pixel5 + temp + deviation;
504             end
505           end else begin
506             if (deviation + temp >= pipe_pixel5) begin
507               tempDataOut <= 8'd0;
508             end else begin
509               tempDataOut <= pipe_pixel5 - temp - deviation;
510             end
511           end
512         end else begin
513           temp = pipe_sqrt5[10] ? {3'd0, pipe_sqrt5[15:11]} + 8'd1 :
                {3'd0, pipe_sqrt5[15:11]};
514           if (rnd[0] == 1) begin
515             if (pipe_pixel5+temp+deviation > 255) begin
516               tempDataOut <= 8'd255;
517             end else begin
518               tempDataOut <= pipe_pixel5 + temp + deviation;
519             end
520           end else begin
521             if (deviation + temp >= pipe_pixel5) begin
522               tempDataOut <= 8'd0;
523             end else begin
524               tempDataOut <= pipe_pixel5 - temp - deviation;
525             end
526           end
527         end
528       end else begin //No photon noise
529         tempDataOut <= pipe_pixel5;
530       end
531
```

```
532       counter = counter + 4'd1;
533     end else if (counter == 10) begin
534       if (noise_type_reg[1] == 1) begin //Row noise
535         if (row_neg == 1) begin
536           if (row_dev >= tempDataOut) begin
537             tempDataOut2 <= 8'd0;
538           end else begin
539             tempDataOut2 <= tempDataOut - row_dev;
540           end
541         end else begin
542           if (tempDataOut + row_dev >= 255) begin
543             tempDataOut2 <= 8'd255;
544           end else begin
545             tempDataOut2 <= tempDataOut + row_dev;
546           end
547         end
548       end else begin //No row noise
549         tempDataOut2 <= tempDataOut;
550       end
551       col_dev_pipe2 <= col_dev;
552       counter <= counter + 4'd1;
553     end else if (counter == 11) begin
554       if (noise_type_reg[2] == 1) begin //Column noise
555         if (col_dev_pipe2[7] == 1) begin
556           if ({1'b0, col_dev_pipe2[6:0]} >= tempDataOut2) begin
557             tempDataOut3 <= 8'd0;
558           end else begin
559             tempDataOut3 <= tempDataOut2 - {1'b0, col_dev_pipe2[6:0]};
560           end
561         end else begin
562           if ({1'b0, col_dev_pipe2[6:0]} + tempDataOut2 >= 255) begin
563             tempDataOut3 <= 8'd255;
564           end else begin
565             tempDataOut3 <= tempDataOut2 + {1'b0, col_dev_pipe2[6:0]};
566           end
567         end
568       end else begin //No column noise
569         tempDataOut3 <= tempDataOut2;
570       end
571       counter <= counter + 4'd1;
572     end else if (counter == 12) begin
573       dataOut <= tempDataOut3;
574       counter <= counter + 4'd1;
575       pixel_counter <= pixel_counter + 21'd1;
576     end else if (counter == 13) begin
577       data_ready = 1'b1;
578       if (cpu_ready >= 1) begin
579         data_ready <= 1'b0;
580         counter <= 4'd0;
581         if (pixel_counter >= total) begin
582           finished <= 1'b1;
583         end else begin
584           finished <= 1'b0;
585         end
586       end else begin
```

```
587           counter <= counter;
588         end
589       end else begin
590         counter <= 4'd0;
591       end
592     end
593 end
594
595 endmodule
```

Tillegg C

Nios II C-kode

Koden under viser de modifiserte metodene i Alteras Simple Socket Server-program som brukes i testsystemet.

```
1  int width = 0;
2  int height = 0;
3
4  INT32U teller = 0;
5  INT32U counter = 0;
6  INT8U teller2 = 0;
7  int teller3 = 0;
8
9  INT16U width_counter = 0;
10 INT16U height_counter = 0;
11
12 INT32U totalt = 2073600;
13 INT32U res_teller = 0;
14
15 int enable = 0;
16 int mode = 0;
17
18 INT8U chosen = 0;
19 int test = 0;
20
21 int ferdig = 0;
22
23 int trans_size = 480;
24 int dimX = 1920;
25
26 INT8U buffer[2073600];
27 INT8U resultat[2073600];
28 INT8U temp1[480];
29 INT8U temp2[480];
30 INT8U temp3[480];
31 INT8U temp4[480];
32
33 volatile int ram_address = 0xF0;
34
35 volatile int var_width;
36 volatile int var_height;
37
38 int knapp_teller = 0;
```

```
39
40 INT32U data_teller = 0;
41 int ramme_teller = 0;
42
43 void setup()
44 {
45     //printf("Noise_type: %d\n", IORD(TEST_PIO_BASE, 0));
46
47     IOWR(LED_PIO_BASE, 0, 0x22);
48     IOWR(ENABLE_PIO_BASE, 0, 0x00);
49     IOWR(DATA_VALID_PIO_BASE, 0, 0x00);
50     IOWR(ENABLE_PIO_BASE, 0, 0xff);
51     IOWR(RESOLUTION_PIO_BASE, 0, 0x3);
52     IOWR(NOISE_TYPE_PIO_BASE, 0, 0x4);
53     IOWR(ROW_STD_DEV_PIO_BASE, 0, 0x07);
54     IOWR(COL_STD_DEV_PIO_BASE, 0, 0x07);
55     IOWR(DATA_PIO_BASE, 0, buffer[counter++]);
56     IOWR(DATA_VALID_PIO_BASE, 0, 0xFF);
57
58     while(ferdig == 0)
59     {
60         if (IORD_8DIRECT(DATA_READY_PIO_BASE, 0) >= 1)
61         {
62             if (width_counter >= 1920)
63             {
64                 width_counter = 1;
65                 if (height_counter >= 1080)
66                 {
67                     height_counter = 1;
68                 }
69                 else
70                 {
71                     height_counter++;
72                 }
73             }
74             else
75             {
76                 width_counter++;
77             }
78
79             IOWR(DATA_VALID_PIO_BASE, 0, 0x00);
80             resultat[res_teller++] = IORD(DATA_FROM_HW_PIO_BASE, 0);
81
82             if (res_teller < totalt)
83             {
84                 IOWR(DATA_PIO_BASE, 0, buffer[counter++]);
85             }
86             else
87             {
88                 ferdig = 1;
89                 break;
90             }
91             IOWR(CPU_READY_PIO_BASE, 0, 0xFF);
92         }
93         else
```

```
94          {
95              IOWR(CPU_READY_PIO_BASE, 0, 0x00);
96              IOWR(DATA_VALID_PIO_BASE, 0, 0xFF);
97          }
98      }
99
100     printf("Ferdig\n");
101
102 }
103
104 void result(SSSConn* conn)
105 {
106     int i;
107     int j;
108
109     if (mode == 1)
110     {
111         printf("Start sending\n");
112         for (i=0; i<1080; i++)
113         {
114             for (j=0; j<1920; j++)
115             {
116                 if (j<trans_size)
117                     temp1[j] = resultat[j+i*dimX];
118                 else if (j<2*trans_size)
119                     temp2[j-trans_size] = resultat[j+i*dimX];
120                 else if (j<3*trans_size)
121                     temp3[j-2*trans_size] = resultat[j+i*dimX];
122                 else
123                     temp4[j-3*trans_size] = resultat[j+i*dimX];
124             }
125             send(conn->fd, temp1, sizeof(temp1)*sizeof(INT8U), 0);
126             usleep(10);
127             send(conn->fd, temp2, sizeof(temp2)*sizeof(INT8U), 0);
128             usleep(10);
129             send(conn->fd, temp3, sizeof(temp3)*sizeof(INT8U), 0);
130             usleep(10);
131             send(conn->fd, temp4, sizeof(temp4)*sizeof(INT8U), 0);
132             usleep(10);
133         }
134         printf("Sendt\n");
135     }
136 }
137
138 /*
139  * sss_handle_accept()
140  *
141  * This routine is called when ever our listening socket has an
        incoming
142  * connection request. Since this example has only data transfer socket
        ,
143  * we just look at it to see whether its in use... if so, we accept the
144  * connection request and call the telent_send_menu() routine to
        transmit
```

```
145  * instructions to the user. Otherwise, the connection is already in
         use;
146  * reject the incoming request by immediately closing the new socket.
147  *
148  * We'll also print out the client's IP address.
149  */
150 void sss_handle_accept(int listen_socket, SSSConn* conn)
151 {
152   int                 socket, len;
153   struct sockaddr_in  incoming_addr;
154
155   len = sizeof(incoming_addr);
156
157   if ((conn)->fd == -1)
158   {
159     if((socket=accept(listen_socket,(struct sockaddr*)&incoming_addr,&
          len))<0)
160     {
161       alt_NetworkErrorHandler(EXPANDED_DIAGNOSIS_CODE,
162                               "[sss_handle_accept] accept failed");
163     }
164     else
165     {
166       (conn)->fd = socket;
167       printf("[sss_handle_accept] accepted connection request from %s
            \n",
168           inet_ntoa(incoming_addr.sin_addr));
169       result(conn);
170     }
171   }
172   else
173   {
174     printf("[sss_handle_accept] rejected connection request from %s\n",
175         inet_ntoa(incoming_addr.sin_addr));
176   }
177
178   return;
179 }
180
181 /*
182  * sss_exec_command()
183  *
184  * This routine is called whenever we have new, valid receive data from
         our
185  * sss connection. It will parse through the data simply looking for
         valid
186  * commands to the sss server.
187  *
188  * Incoming commands to talk to the board LEDs are handled by sending
         the
189  * MicroC/OS-II SSSLedCommandQ a pointer to the value we received.
190  *
191  * If the user wishes to quit, we set the "close" member of our SSSConn
192  * struct, which will be looked at back in sss_handle_receive() when it
193  * comes time to see whether to close the connection or not.
```

```
194  */
195 void sss_exec_command(SSSConn* conn)
196 {
197    int bytes_to_process = conn->rx_wr_pos - conn->rx_rd_pos;
198
199     while(bytes_to_process--)
200     {
201         buffer[teller++] = *(conn->rx_rd_pos++);
202
203         if (teller >= totalt)
204         {
205             INT8U test = buffer[teller-1];
206             printf("JIPPI!!! Data: %d \n", test);
207         }
208     }
209
210   return;
211 }
```

Tillegg D

Matlabsimuleringer

D.1 Simuleringer av støy med Matlabmetodene *poissrnd* og *randn*

```
bilde = imread('daf.png');

a = bilde(:,:,1);
foton = a;
rad = a;
kolonne = a;
alt = a;

var = 7;
var2 = 7;
offset2 = zeros(1080, 1);

seed1 = uint32(16777215);
seed2 = uint32(13421772);
seed3 = uint32(16711935);

for y=1:1080
    for x=1:1920

        temp1 = bitshift(uint32(bitand(seed1, uint32(4294967294))), 12, 32);
        temp11 = bitshift(bitxor(bitshift(seed1, 13, 32), seed1), -19, 32);

        temp2 = bitshift(uint32(bitand(seed2, uint32(4294967288))), 4);
        temp22 = bitshift(bitxor(bitshift(seed2, 2, 32), seed2), -25, 32);

        temp3 = bitshift(uint32(bitand(seed3, uint32(4294967280))), 17, 32);
        temp33 = bitshift(bitxor(bitshift(seed3, 3, 32), seed3), -11, 32);

        seed1 = bitxor(temp1, temp11);
        seed2 = bitxor(temp2, temp22);
```

```
31          seed3 = bitxor(temp3, temp33);
32
33          tall = uint32(bitxor(bitxor(seed1, seed2), seed3));
34
35          temp = 0;
36          for q=1:32
37              if (bitget(tall, q) == 1)
38                  temp = temp + 2^-q;
39              end
40          end
41          ol = temp;
42
43          temp = double(a(y,x));
44
45          if (seed1 <= 0.68*2^32)
46              if (bitget(tall, 1) == 1)
47                  if (foton(y,x) + sqrt(temp)*ol >= 255)
48                      foton(y,x) = 255;
49                  else
50                      foton(y,x) = round(a(y,x) + sqrt(temp)*ol);
51                  end
52              else
53                  if (foton(y,x) <= sqrt(temp)*ol)
54                      foton(y,x) = 0;
55                  else
56                      foton(y,x) = round(a(y,x) - sqrt(temp)*ol);
57                  end
58              end
59          elseif (seed1 <= 0.95*2^32)
60              if (bitget(tall, 1) == 1)
61                  if (foton(y,x) + sqrt(temp)*(1+ol) >= 255)
62                      foton(y,x) = 255;
63                  else
64                      foton(y,x) = round(a(y,x) + sqrt(temp)*(1+ol));
65                  end
66              else
67                  if (foton(y,x) <= sqrt(temp)*(1+ol))
68                      foton(y,x) = 0;
69                  else
70                      foton(y,x) = round(a(y,x) - sqrt(temp)*(1+ol));
71                  end
72              end
73          else
74              if (bitget(tall, 1) == 1)
75                  if (foton(y,x) + sqrt(temp)*(2+ol) >= 255)
76                      foton(y,x) = 255;
77                  else
78                      foton(y,x) = round(a(y,x) + sqrt(temp)*(2+ol));
79                  end
80              else
81                  if (foton(y,x) <= sqrt(temp)*(2+ol))
82                      foton(y,x) = 0;
83                  else
84                      foton(y,x) = round(a(y,x) - sqrt(temp)*(2+ol));
85                  end
```

```
86              end
87          end
88
89          if (x == 1)
90              rnd = 0;
91              for t=1:32
92                  if (bitget(seed2, 1) == 1)
93                      rnd = rnd + 2^(t-33);
94                  end
95              end
96
97              if (seed3 <= 0.68*2^32)
98                  rnd = rnd +1;
99              elseif (seed3 <= 0.95*2^32)
100                 rnd = rnd +2;
101             else
102                 rnd = rnd +3;
103             end
104
105             if (bitget(seed2, 1) == 1)
106                 rnd = -rnd;
107             end
108
109             offset = round(var*rnd);
110         end
111
112         if (y == 1)
113             rnd2 = 0;
114             for s=1:32
115                 if (bitget(seed3, 1) == 1)
116                     rnd2 = rnd2 + 2^(s-33);
117                 end
118             end
119
120             if (seed2 <= 0.68*2^32)
121                 rnd2 = rnd2 +1;
122             elseif (seed2 <= 0.95*2^32)
123                 rnd2 = rnd2 +2;
124             else
125                 rnd2 = rnd2 +3;
126             end
127
128             if (bitget(seed3, 1) == 1)
129                 rnd2 = -rnd2;
130             end
131
132             offset2(x) = round(var2*rnd2);
133         end
134
135         if (foton(y,x)+offset+offset2(x) >= 255)
136             alt(y,x) = 255;
137         elseif (foton(y,x) + offset + offset2(x) <= 0)
138             alt(y,x) = 0;
139         else
140             alt(y,x) = foton(y,x) + offset + offset2(x);
```

```
141         end
142
143         if (a(y,x) + offset2(x) >= 255)
144             kolonne(y,x) = 255;
145         elseif (a(y,x) + offset2(x) <= 0)
146             kolonne(y,x) = 0;
147         else
148             kolonne(y,x) = a(y,x) + offset2(x);
149         end
150
151         if (a(y,x) + offset >= 255)
152             rad(y,x) = 255;
153         elseif (a(y,x) + offset <= 0)
154             rad(y,x) = 0;
155         else
156             rad(y,x) = a(y,x) + offset;
157         end
158
159     end
160 end
161
162 figure(1);
163 imshow(foton);
164 figure(2);
165 imshow(rad);
166 figure(3);
167 imshow(kolonne);
168 figure(4);
169 imshow(alt);
170
171 psnr(foton);
172 psnr(rad);
173 psnr(kolonne);
174 psnr(alt);
```

D.2 Simuleringer av algoritmene emulatoren bruker

```
1 a = imread('daf.png');
2 a = a(:,:,1);
3 photon = a;
4 row = a;
5 col = a;
6 all = a;
7
8 r1 = randn(1, 1920);
9 r2 = randn(1, 1080);
10
11 col_dev = zeros(1, 1920);
12
13 col_std_dev = 7;
14 row_std_dev = 7;
15
16 for i=1:1080
```

```
17      for j=1:1920
18
19          if (i==1)
20              col_dev(j) = r1(j)*col_std_dev;
21          end
22
23          if (j==1)
24              row_dev = r2(i)*row_std_dev;
25          end
26
27          temp = double(a(i,j));
28          p = poissrnd(temp, 1, 1);
29
30          if (p >= 255)
31              p = 255;
32          elseif (p <= 0)
33              p = 0;
34          end
35
36          photon(i,j) = p;
37
38          if (row(i,j)+row_dev >= 255)
39              row(i,j) = 255;
40          elseif(row(i,j) + row_dev <= 0)
41              row(i,j) = 0;
42          else
43              row(i,j) = row(i,j) + row_dev;
44          end
45
46          if (col(i,j)+col_dev(j) >= 255)
47              col(i,j) = 255;
48          elseif(col(i,j)+col_dev(j) <= 0)
49              col(i,j) = 0;
50          else
51              col(i,j) = col(i,j) + col_dev(j);
52          end
53
54          if (p+row_dev+col_dev(j) >= 255)
55              all(i,j) = 255;
56          elseif (p+row_dev+col_dev(j) <= 0)
57              all(i,j) = 0;
58          else
59              all(i,j) = round(p + row_dev + col_dev(j));
60          end
61
62
63      end
64  end
65
66  figure(1);
67  imshow(photon);
68  figure(2);
69  imshow(row);
70  figure(3);
71  imshow(col);
```

```
72 figure(4);
73 imshow(all);
74
75 psnr(photon);
76 psnr(row);
77 psnr(col);
78 psnr(all);
```

D.3 Metoden som brukes til å regne ut PSNR, MAE og MSE

```
1  function [psnr, mean] = psnr(a)
2
3  b = imread('daf.png');
4  b = b(:,:,1);
5
6  temp = 0;
7  temp2 = 0;
8
9  for i=1:1080
10     for j=1:1920
11         temp = temp + abs(double(a(i,j)-b(i,j)))^2;
12         temp2 = temp2 + abs(double(a(i,j)-b(i,j)));
13     end
14 end
15
16 mse = temp/(1920*1080);
17 mean = temp2/(1920*1080);
18
19 psnr = 10*log10(double(255^2/mse));
20
21 disp(psnr)
22 disp(mse)
23 disp(mean)
```

Tillegg E

C-sharp-program

E.1 Program

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5
6 namespace ConsoleApplication1
7 {
8     class Program
9     {
10         static void Main(string[] args)
11         {
12             Client klient = new Client();
13             klient.Connect("192.168.1.234", 30);
14             klient.Send();
15             klient.Receive();
16             klient.WriteToFile("C:\\Users\\Rune\\Documents\\resultat.
                   txt");
17             Console.ReadLine();
18             klient.Close();
19         }
20     }
21 }
```

E.2 Klient

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5
6 using System.IO;
7 using System.Net;
8 using System.Net.Sockets;
9
10 namespace ConsoleApplication1
11 {
```

```
12      class Client
13      {
14          Socket soc;
15          byte[] buffer;
16
17          const int buffersize = 2073600;
18          const int readstep = 480;
19
20          int index;
21
22
23          public Client()
24          {
25              buffer = new byte[buffersize];
26              index = 0;
27              Console.WriteLine("Start");
28              soc = new Socket(AddressFamily.InterNetwork, SocketType.
                    Stream, ProtocolType.Tcp);
29              soc.ReceiveTimeout = 30000;
30          }
31
32          public void Connect(string ip, int port)
33          {
34              IPAddress ipadresse = IPAddress.Parse(ip);
35              IPEndPoint ipe = new IPEndPoint(ipadresse, port);
36              Console.WriteLine("Starting to connect...");
37              soc.Connect(ipe);
38          }
39
40          public void Send()
41          {
42              Console.WriteLine("Send method");
43              byte[] buf = new byte[] { 49, 0 };
44              if (soc.Connected)
45              {
46                  soc.Send(buf);
47              }
48              else Console.WriteLine("Not connected");
49          }
50
51
52          public void Receive()
53          {
54              Console.WriteLine("Receive method");
55              while (index < buffersize)
56              {
57                  try
58                  {
59                      index += soc.Receive(buffer, index, readstep,
                            SocketFlags.None);
60
61                      if (index % 10000 == 0)
62                      {
63                          Console.WriteLine("Received 10000 byte");
64                      }
```

```
65                  }
66                  catch (Exception)
67                  {
68
69                      Console.WriteLine("Receive FAIL");
70                      System.Environment.Exit(0);
71                  }
72              }
73          }
74
75          public void WriteToFile(string navn)
76          {
77              Console.WriteLine("WriteToFile method");
78
79              FileStream stream = new FileStream(navn, FileMode.Create);
80              BinaryWriter w = new BinaryWriter(stream);
81              try
82              {
83                  w.Write(buffer, 0, index);
84                  w.Close();
85              }
86              catch (Exception)
87              {
88                  Console.WriteLine("Write to file fail");
89                  System.Environment.Exit(0);
90              }
91              Console.WriteLine("Done writing to file");
92          }
93
94          public void Close()
95          {
96              Console.WriteLine("The end");
97              try
98              {
99                  soc.Close();
100             }
101             catch (Exception)
102             {
103                 Console.WriteLine("Close fail");
104                 System.Environment.Exit(0);
105             }
106             Console.ReadLine();
107         }
108     }
109 }
```

Tillegg F

Generering av mif-fil

```
1 a = zeros(255,1);
2 temp = zeros(255, 1);
3 komma = zeros(255,1);
4 file = fopen('lookup.mif', 'w');
5 tall = sprintf('DEPTH = 256;\n\nWIDTH = 16;\n\nADDRESS_RADIX = BIN;\
      nDATA_RADIX\n\nCONTENT\nBEGIN\n');
6 fprintf(file, tall);
7 for i=1:255
8     a(i) = sqrt(i);
9     temp(i) = round(a(i));
10    if (temp(i) > a(i))
11        temp(i)=temp(i)-1;
12    end
13
14    komma(i) = a(i)-temp(i);
15    bin = '';
16    for j=1:12
17        komma(i) = komma(i)*2;
18        if (komma(i) > 1)
19            komma(i) = komma(i)-1;
20            bin = sprintf('%s1', bin);
21        else
22            bin = sprintf('%s0', bin);
23        end
24    end
25    tall = sprintf('%s: %s%s;\n', dec2bin(i, 8), dec2bin(temp(i), 4),
          bin);
26    fprintf(file, tall);
27 end
28 tall = sprintf('--\nEND;');
29 fprintf(file, tall);
30 fclose(file);
```