

TONREPRODUKTIONSKURVOR för kameran Sony A7

Målsättningen med studien är dels att undersöka hur linjär responsen är för data som hämtas ut i RAW-format, dels att studera hur tonreproduktionen ser ut för jpeg-bilder som kommer från kameran. Linjär respons är ofta önskvärt i vetenskapliga sammanhang, särskilt om bilderna ska användas för kvantifiering av ljusnivåer. Ett exempel skulle kunna vara mätning av fluorescensintensiteten i mikroskopfotografier.

Sammanfattning av resultaten

Bilderna i RAW-format har en mycket god fotometrisk linearitet från de allra lägsta ljusnivåer som kunde mätas och ända upp till botteningsnivå. RAW-formatet ger dessutom 12 bitars djup i pixlarna, dvs ca. 4000 nivåer, vilket kan jämföras med jpeg-bildernas 8 bitar (256 nivåer). Som väntat uppvisar jpeg-bilderna en mycket kraftig icke-linearitet på grund av den gammakorrektion som görs. Det visar sig dock att gammavärdet inte är konstant, utan varierar med exponeringen. Vid låga exponeringar är gammavärdet nära ett, för att vid höga exponeringar sjunka till under 0.1. En undersökning som görs vid ISO-tal 50, dvs lägre än sensorns "base ISO" som är 100, visar att fotografering i denna "extended ISO range" ger RAW-bilder som är identiska med ISO 100 bilder. Däremot kommer jpeg-bilderna att skilja sig åt.

Inledning

Figur 1 visar principiella signalvägarna när man tar ut bilder i RAW-format respektive jpeg-format. Bilder som tas ut i RAW-format behandlas vanligtvis i en så kallad RAW-konverterare, för att slutligen sparas i jpeg- eller tiff-format. Men i denna studie ingår även att undersöka ursprungliga RAW-bilder som inte förvanskats genom någon sådan bildbehandling.

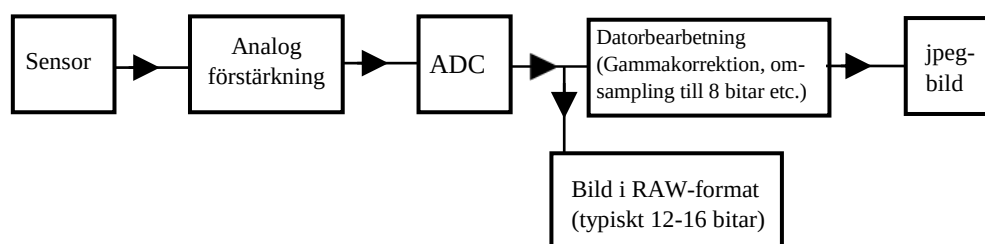


Fig. 1. Förenklad bild av signalens väg i en digitalkamera.

Undersökningen utfördes genom att fotografera en transparent gråskala monterad på en ljuslåda. Ljuslådan var försedd med kallkatodlysrör med en färgtemperatur på ca. 7000 K. En kontroll av stabiliteten på ljuset visade att det inte fanns några snabba variationer, typ "nätrippel", och att långsamma variationer (tidsskala några sekunder) låg under 3% peak-to-peak. Standardzoomen användes med brännvidden 52 mm, och bländartal 32. ISO-inställningen

var 100. Det höga bländartalet i kombination med tillräckligt stort fotograferingsavstånd gjorde att gråskalans rastrering inte gav några moiré-effekter. Mätningarna gjordes på det ljusaste fältet i gråskalan, och exponeringen varierades genom att ändra exponeringstiden i steg som motsvarade $1/3$ bländarsteg, dvs. en faktor $2^{\frac{1}{3}} = 1.26$ (tiderna räknades fram eftersom kameradisplayen inte angav tiderna med tillräcklig noggrannhet). Man kan ju inte veta hur noggrant kameraslutaren lever upp till de teoretiska tidsvärdena, men som vi ska se av resultaten så pekar allt på att slutaren håller tiderna mycket bra.

Bilderna fotograferades i moden RAW+JPEG, 24 Mpixlar, och analyserades med ImageJ. För fallet RAW-format utnyttjades en plug-in i ImageJ som heter "DCRaw Reader". RAW-formatbilderna öppnades i helt "rå" mod, dvs utan att någon intensitetsskalning, färginterpolation, gammakorrektion, vitbalans, etc. hade gjorts på bilderna. Det man då får är en bild med 12 bitars djup i varje pixel (medan jpeg endast ger 8 bitar). I Fig. 2 visas en uppförstorad detalj ur en sådan RAW-bild, visande ett homogent ljust område i motivet.

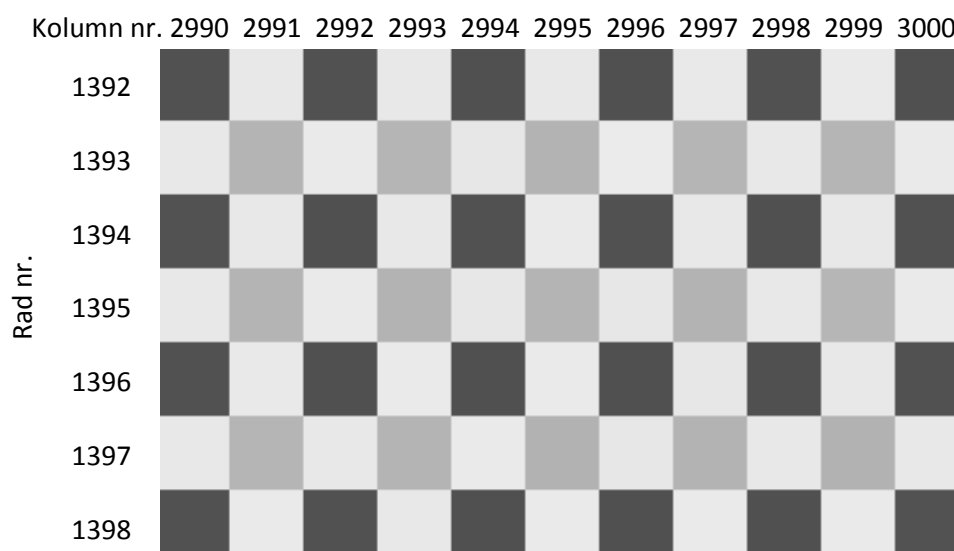


Fig. 2. Uppförstorad detalj ur en RAW-bild. Numreringen av pixlarna gäller för Sony A7, och innehåller information om vilken typ av färgfilter som täcker de enskilda pixlarna. Se texten för detaljer.

Bilden som visas i Fig. 2 är rent svartvit, eftersom varje pixel endast levererar ett ljusvärde svarande mot antalet detekterade fotoner. Genom att olika pixlar är belagda med olika färgfilter (RGB enligt Bayermask) kan man i efterföljande steg göra en färginterpolation för att approximativt återskapa motivets färger. I Fig. 2 har pixlarna med blåfilter udda rad- och kolumnnummer, medan rödpixlarna har jämna rad- och kolumnnummer. Grönpixlarna har udda rad- och jämna kolumnnummer, eller jämna rad- och udda kolumnnummer. Man ser tydligt 2x2-strukturen i Bayermasken, där hälften av pixlarna har grönsfilter medan en fjärdedel har blå- respektive rödfilter. I Fig. 2 ger grönpixlarna högst utsignal, blåpixlarna lite lägre och rödpixlarna lägst utsignal. (Motivet var ett "vitt" fält med färgtemperatur ca. 7000 K.)

Tonreproduktion i RAW-bilder

För att undersöka lineariteten i RAW-bilderna plottades utsignalerna från de tre typerna av pixlar som funktion av exponeringstiden. Motivdelen som studerades var ett delområde av ljusaste rutan i gråskalan. Resultatet visas i Fig. 3, där kurvornas färger motsvarar filtren på pixlarna. Lineariteten tycks vara mycket god. Observera att den lilla knycken strax före bottning för grön- och rödkurvorna beror på att bottning sker mellan mätpunkterna (enkel linjärinterpolation har gjorts mellan mätpunkterna). Den blå kurvan torde bäst visa det verkliga beteendet när bottning sker. Det verkar alltså som om sensorn är helt linjär ända upp till bottningsnivån. Detta kan tyckas lite förvånansvärt, eftersom flera källor anger att responsen för en sensor förväntas plana ut nära bottningsnivån. Den troligaste förklaringen är att analoga förstärkningen i A7:an är så pass hög vid ISO 100 att ADC:n bottnar innan sensorns respons planar ut.

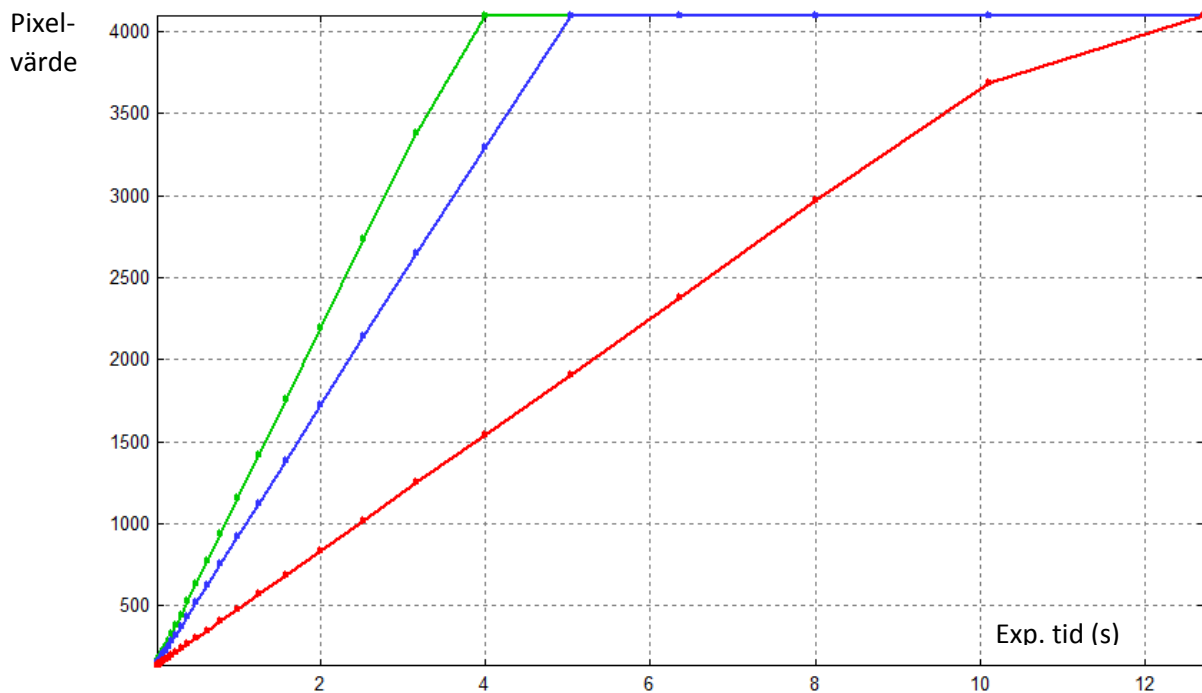


Fig. 3. Pixelvärden i RAW-bilden som funktion av exponeringstiden vid konstant bländartal (32). Kurvornas färger svarar mot filterfärgerna på respektive pixlar. Signalen bottnar på värdet 4093 (varför inte bottningsnivån hamnar på $2^{12} - 1 = 4095$ är oklart).

Det kan vara intressant att studera lite mer i detalj vad som händer också vid låga exponeringar, och därför har denna del av kurvorna plottats i högre förstoring i Fig. 4. Som synes är lineariteten mycket god även nere vid extremt låga exponeringar. Om man drar ut kurvornas förlängningar ner mot exponeringen noll, så kommer de alla att skära vertikala axeln vid ett pixelvärde strax under 130. Detta stämmer mycket bra med värdet som uppmätts i mörkerbilder (med linslocket på), vilket gav pixelvärde 128 (mätningar gjorda i intervallet 1/8000 till 1/10 s gav samma resultat). I dessa mörkerbilder var standardavvikelsen 0.32, vilket ger en dynamisk vidd av $\frac{4093-128}{0.32} \approx 12\,000$, ett typiskt värde för en kamera av denna typ.

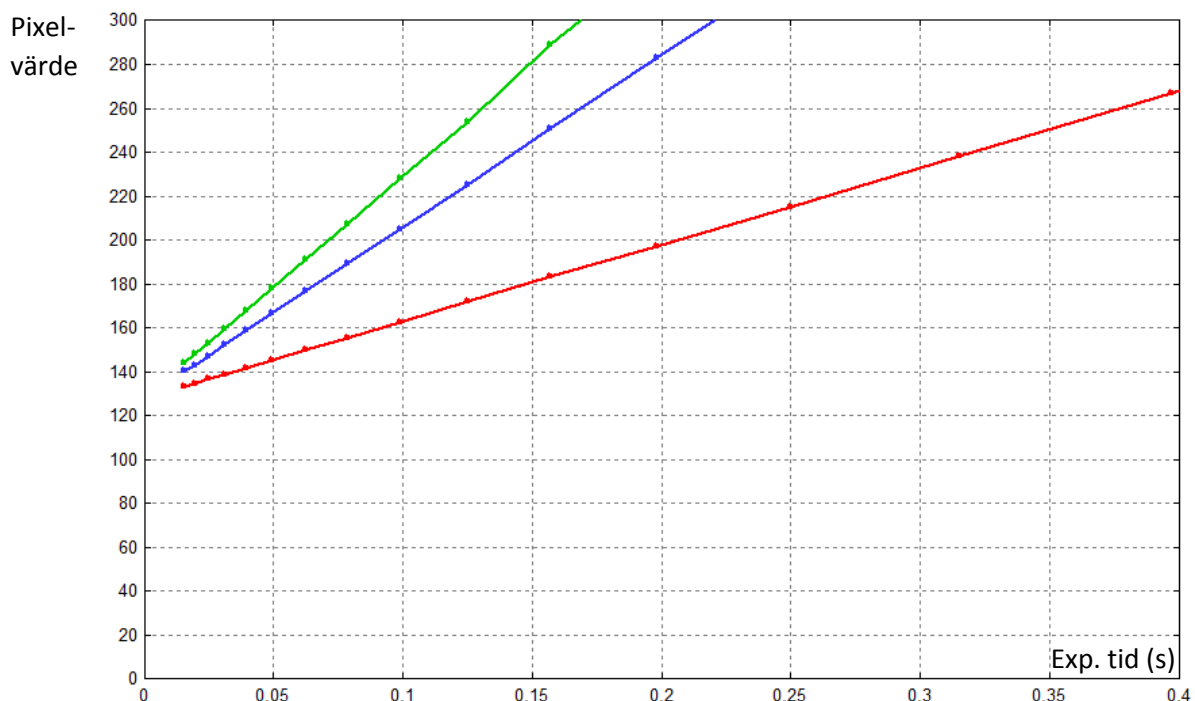


Fig. 4. Uppförstorad detalj av området närmast origo i Fig. 3. Vid låga exponeringar konvergerar kurvorna mot pixelvärdet 128 (mörkervärdet).

Sammanfattningsvis kan alltså sägas att bilder i RAW-format uppvisar en mycket god linearitet från allra lägsta exponering ända upp till bottningsnivå. Men innan vi går vidare ska vi titta lite på ett alternativt sätt att redovisa data, nämligen med logaritmiska axlar, Fig. 5. Detta används ofta i fotografiska sammanhang av flera skäl. Ett skäl är att exponeringsaxeln då blir linjär i bländarsteg, vilket också bättre stämmer överens med ögats uppfattning av ljusnivåer. Ett annat skäl är att man i ett och samma diagram kan detaljerat illustrera beteendet både vid mycket låga och mycket höga exponeringar. Ett tredje skäl är att mätpunkterna hamnar ekvidistant längs horisontella axeln.

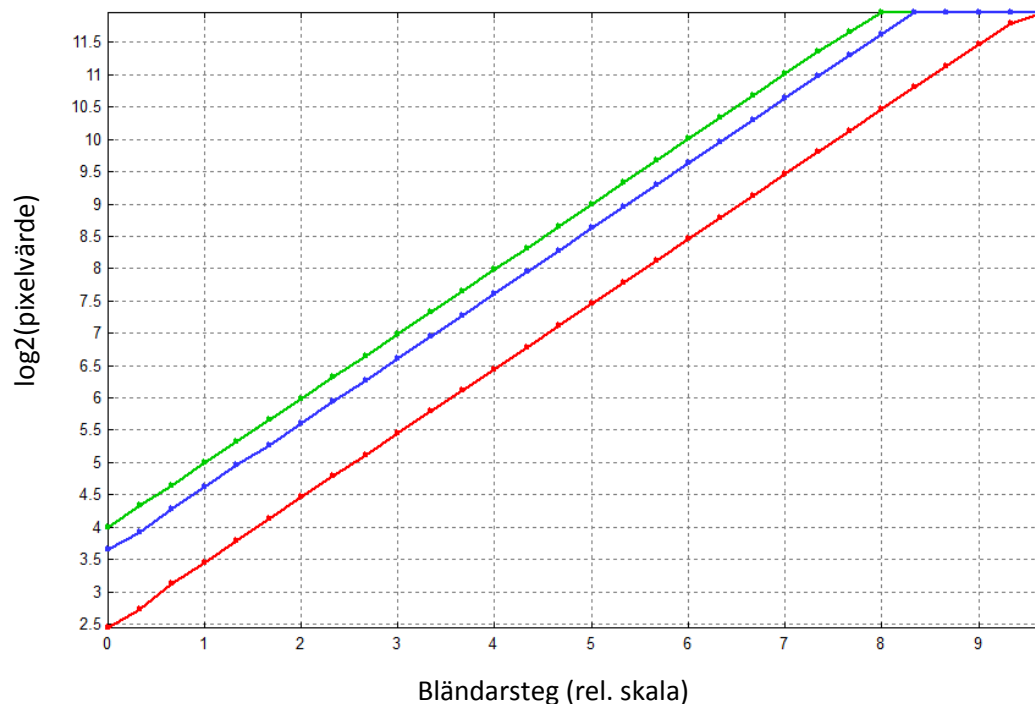


Fig. 5. Samma mätvärden som i Fig. 3, men med logaritmiska axlar (2-logaritmer har använts eftersom det svarar mot bländarsteg). Mörkervärdet, 127.9, subtraherades från pixelvärdena innan logaritmeringen.

Eftersom vi nu har log-skala på bägge axlarna, så innebär det att kurvorna ska vara linjära och ha lutningskoefficienten ett för att vi ska ha ett linjärt samband mellan pixelvärde och exponering. Om man tittar på kurvorna ser man att detta är uppfyllt med god noggrannhet från lägsta till högsta exponering*. De olika lutningarna vi har på kurvorna i Fig. 3 och 4 med linjärskala, återspeglas i Fig. 5 i de olika höjdförkjutningarna för de parallella kurvorna.

Innan vi lämnar RAW-formatet för att titta på jpeg, kan det vara värt att nämna att RAW-filer kan vara lite mer datorbehandlade än vad som antyds i Fig. 1. Sony med flera kamerafabrikanter komprimerar ofta RAW-filerna så att de tar mindre plats. Exempelvis så borde RAW-filerna från Sony A7 vara på minst $24 \times 1.5 = 36$ Mbyte (24 Mpixlar med 12 bitars djup), medan de i verkligheten ligger på knappt 24 Mbyte. Det skulle föra för långt att här gå in på komprimeringsmetoderna, men det kan nämnas att en del i komprimeringen består i att göra stegningen mellan grånivåerna tätare vid låga nivåer än vid höga - ungefär som man gör vid gammakorrigerings (som vi återkommer till vid genomgången av jpeg). Men vid "uppackningen" av RAW-bilderna korrigeras för denna komprimering så att resultatet blir god linearitet precis som vi har sett.

* Nära origo ser kurvorna något "svajiga" ut, vilket torde bero på att pixelvärdena där är extremt låga (bara någon enstaka digital nivå).

Tonreproduktion i JPEG-bilder

Låt oss nu titta på hur pixelvärdena beror på exponeringen i en jpeg-bild. Som tidigare nämnts gjordes testexponeringarna i moden RAW + JPEG, vilket gör att samma bilder som tidigare analyserats i RAW-format även kan undersökas i det jpeg-format som direkt levereras från kameran. Mätningarna gjordes som tidigare med ImageJ, och blåkanalens värden användes*. Resultatet visas i Fig. 6. Responsen är nu kraftigt icke-linjär på grund av gammakorrektionen, vilken införs för att man med 8 bitar ska kunna återge grå- och färgtoner samt bilddynamiken på ett hyggligt sätt.

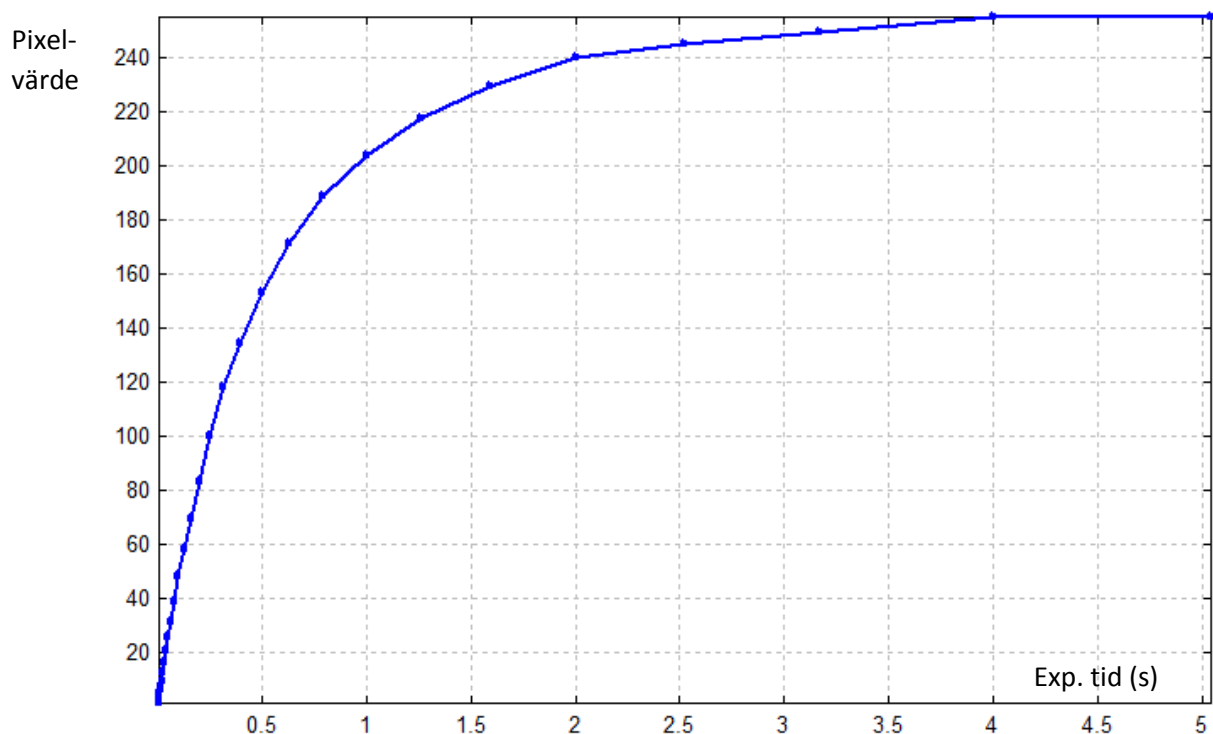


Fig. 6. Pixelvärden i JPEG-bilden som funktion av exponeringstiden vid konstant bländartal (32). Värdena hämtades från den blå färgkanalen. Signalen bottenar vid nivån 255 eftersom jpeg-bilder innehåller endast 8 bitar.

Det kan vara intressant att jämföra kurvan i Fig. 6 med en teoretisk gammakurva, vilken har utseendet $y = kx^\gamma$, där k är en skalningskonstant och γ är gammavärdet som typiskt ligger runt 0.45 (ibland anges inverterade värdet, dvs. ca. 2.2 beroende på vilken del av signalbehandlingskedjan man betraktar). I Fig. 7 visas jpeg-kurvan från Fig. 6 tillsammans med en teoretisk gammakurva med $\gamma = 0.45$. Som synes avviker jpeg-kurvan en hel del från den teoretiska kurvan. Jpeg-kurvans lutning är klart lägre både vid låga och höga pixelvärden. Även i detta fall kan det vara intressant att plotta med logaritmiska axlar. Fig. 8 visar utseendet för jpeg-kurvan i detta fall.

* Jag ville undvika att blanda kanalerna eftersom de bottenar på olika nivå, och vilken av kanalerna som väljs borde sakna betydelse.

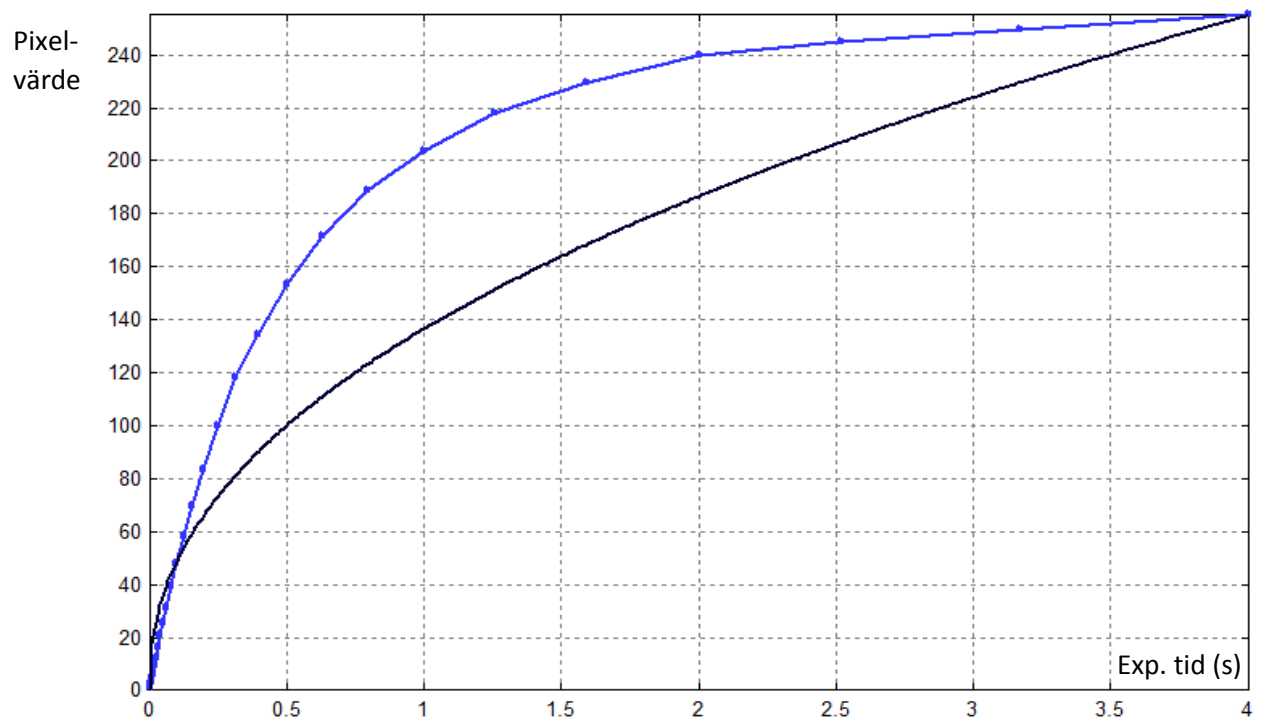


Fig. 7. jpeg-kurvan (blå) jämförd med teoretisk gammakurva med $\gamma = 0.45$ (svart).

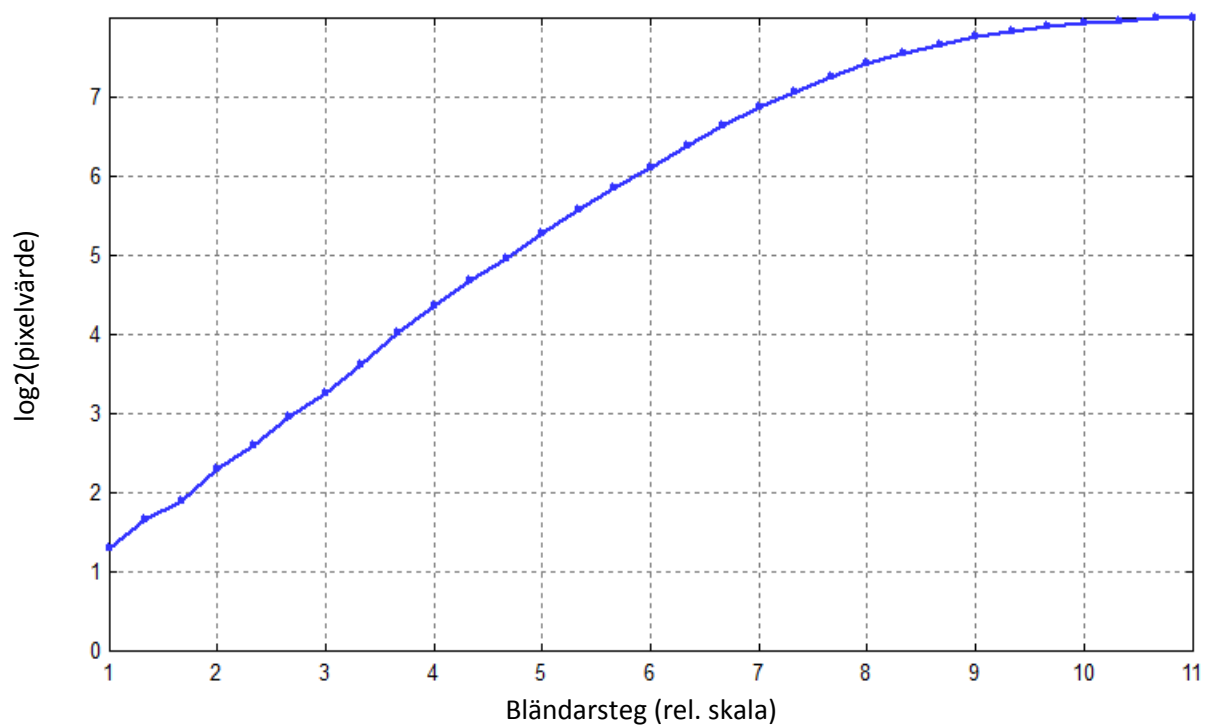


Fig. 8. jpeg-kurvan uppritad i log-log diagram.

Om man studerar kurvan i Fig. 8, ser man att upp till pixelvärde ca. 30 ($\log_2$ -värde ca. 5) är kurvan i stort sett linjär och med lutningen ett. Detta skulle, enligt vad som tidigare sagts, betyda att sambandet mellan pixelvärde och exponering är linjärt upp till denna nivå. För högre exponeringar däremot så minskar kurvans lutning kontinuerligt ända upp till botten. Eftersom kurvans lutning kan tolkas som gammavärdet, så innebär det att för låga exponeringar är gamma ungefär lika med 1.0 för att därefter monotont avta för högre exponeringar. Nära botten ligger gammavärdet så lågt som strax under 0.1.

Utseendet på Fig. 8 påminner ganska mycket om svärtningskurvan för fotografisk film (utom vid mycket låga exponeringar). Och faktum är att det som avsätts längs koordinataxlarna är närbesläktat. I bägge fallen avsätts logaritmen för exponering på horisontella axeln. För film avsätts svärtningen på vertikala axeln, och svärtningen beror logaritmiskt på transmissionen i den framkallade filmen. Likheten mellan kurvorna skulle kunna antyda att tonreproduktionen i en jpeg-bild skulle likna den man får från fotografisk film – en inte orimlig tanke. Men det finns dock skillnader. En skillnad är att svärtningskurvan planar ut för låga exponeringar, vilket inte jpeg-kurvan gör. En annan skillnad är att svärtningskurvan för film har en rät del vars lutning är klart mindre än ett, men detta kompenseras av att fotopapper har en brantare svärtningskurva så att slutbildens gamma hamnar i närheten av ett. Diafilm som direkt ger en positiv slutbild har en svärtningskurva med lutning i närheten av ett. Nåväl, låt oss lämna film, och fortsätta med digitalbilder.

Utvidgat ISO-område (extended ISO range)

Nästa steg i undersökningen var att titta på vad som händer när man utnyttjar “Extended ISO”. Lägsta “normala” ISO-talet på Sony A7 är 100, något som brukar betecknas “base ISO”, men man kan ställa in också ISO-talen 80, 64 och 50. Dessa ISO-tal har dock en särskild markering som visar att kameran arbetar utanför sitt normala område. För att undersöka vad som händer i detta fall så fotograferades samma ljuslåda som tidigare, och under precis samma förhållanden, och med ISO-talen inställda på 100 och 50. Om man tittar på RAW-data, så visar det sig att dessa bilder är helt identiska för ISO 50 och 100 när man använder samma exponeringstid och bländartal. Analog förstärkningen är alltså precis densamma vid ISO 50 och 100. Jpeg-bilderna skiljer sig däremot, se Fig. 9. Det betyder att databehandlingen av RAW-bilderna skiljer sig åt beroende på om ISO-talet är inställt på 100 eller 50. Men för att få en rättvisande bild av tonöverföringen måste man beakta att när man i praktiken fotograferar vid ISO 50, så får sensorn en dubbelt så hög exponering som vid ISO 100. Därför bör vi förskjuta ISO 50-kurvan ett bländarsteg åt vänster. Resultatet visas i Fig. 10.

Från Fig. 10 kan vi se att tonreproduktionen vid ISO 50 och 100 är identisk upp till en pixelnivå av ca. 220. Detta under förutsättning att man exponerar bilderna dubbelt så mycket vid ISO 50 som vid ISO 100, dvs. att man följer exponeringsmätarens värden. Vid pixelvärden mellan 220 och botten stiger dock ISO 50-kurvan brantare än ISO 100-kurvan. Detta är en nödvändighet, eftersom sensorn kommer att bottna tidigare (vid lägre motivluminanser) vid ISO 50. Vad vinner man då på att använda ISO 50 snarare än ISO 100? Jo, det handlar om brus i mörka motivdelar. Även om tonreproduktionen är mycket likartad i Fig. 10, så får man inte glömma att sensorn detekterar dubbelt så många fotoner vid ISO 50. Detta innebär ett högre signal/brus-förhållande, vilket är särskilt viktigt i mörka partier.

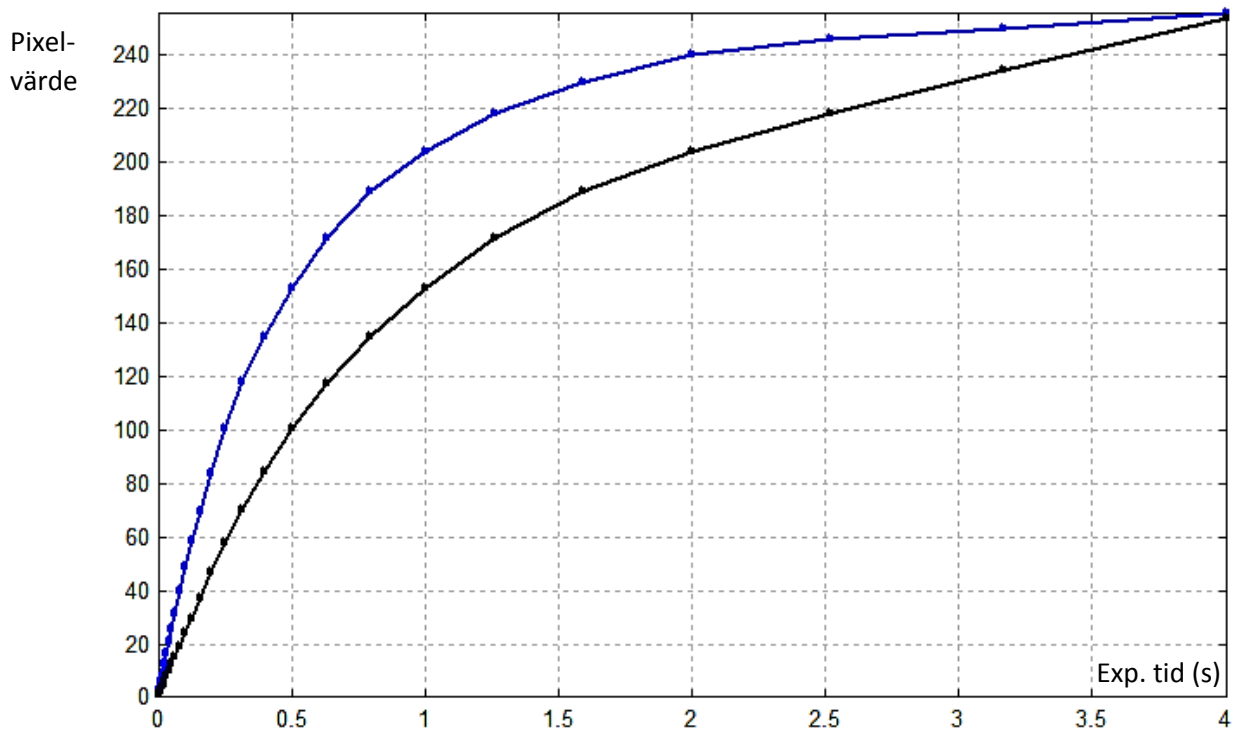


Fig. 9. jpeg-kurvor vid ISO 100 (blå) respektive 50 (svart) som funktion av exponeringstiden vid konstant bländartal (32).

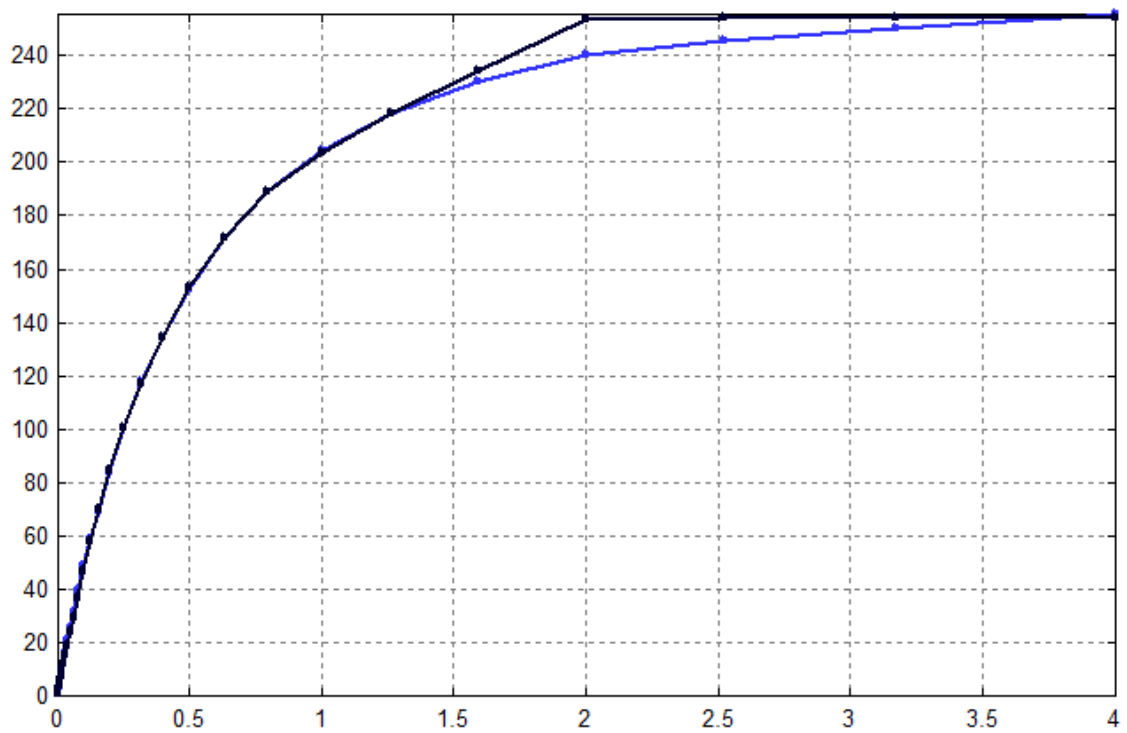


Fig. 10. Samma som Fig. 9, men kurvan för ISO 50 är förskjuten ett bländarsteg åt vänster. Detta återspeglar att sensorn exponeras dubbelt så mycket vid ISO 50.

Nackdelen med ISO 50 är att det är större risk att mycket ljusa motivdelar blir bottnade och förlorar detaljer. Det är dock intressant att notera att RAW-bilden för ISO 50 inte är bottnad vid 4 s, vilket jpeg-bilden är (jfr. Fig. 9). Bottningen har alltså skett vid jpeg-konverteringen, och genom att använda en RAW-konverterare finns möjlighet att få ut mera detaljer i ljusa partier än man får i jpeg-bilden direkt ur kameran.

Att analoga förstärkningen i kameran är densamma vid ISO 50 och ISO 100 kan tyckas lite förvånande, eftersom allt tyder på att ADC:n bottnar innan sensorns respons planar ut. Det borde därför kunna löna sig att minska analoga förstärkningen för att fullt ut utnyttja sensorns well capacity. Men även andra källor rapporterar samma resultat, se t.ex. <https://blog.kasson.com/the-last-word/sony-a7rii-fake-isos/> <http://www.photonstopphotos.net/>

I dessa källor kan man även se att ISO 64 ger samma analoga förstärkning som ISO 125, och ISO 80 ger samma analoga förstärkning som 160. I samtliga fall innebär alltså "extended ISO" att man överexponerar sin bild med ett bländarsteg. Men det är på sin plats att utfärda en varning för att använda ISO 64 och 80, eftersom dessa inställningar innebär att man jobbar med en högre analog förstärkning än vid ISO 100. Man kommer då att utnyttja en lägre well capacity, vilket resulterar i mera brus.

Author: Kjell Carlsson, kjellc@kth.se