

Versuch F36: Wellenfrontanalyse

Versuch durchgeführt:

von: Ronak Fatahian, Ronny Geisler
am: 12. und 14. 05.2003
im: MPI für Astronomie (Königstuhl)
Assistent: Oliver Schuetz

1. Einleitung

1.1. Versuchsbeschreibung

Im ersten Teil des Versuches haben wir einen Wellenfront-Sensor nach dem Prinzip von Shack-Hartmann aufgebaut, womit wir einige elementaren Phasenfehler der Wellenfront erzeugt und gemessen haben. Einen der Phasenfehler haben wir dann in der Auswertung mit Hilfe der Zernike-Polynome rekonstruiert.

Im zweiten Teil des Versuches haben wir dann die verschiedenen Eigenschaften der CCD-Kamera bestimmt: Linearität, Ausleserauschen, Bias-Level, Dunkelstrom und den System Gain.

Versuchsdurchführung: Wellenfrontanalyse

Die Funktionsweise des Shack-Hartmann-Sensors ist wie folgt:



Abbildung 1: Wellenfrontsensor

Vor dem Detektor (CCD-Kamera) befindet sich ein Linsenarray. Dieses Array bewirkt eine Fokussierung des auftreffenden Lichtes zu einem Punkt, welcher von der CCD-Kamera, die genau im Abstand der Brennweite aufgestellt ist, registriert wird.

Falls die Welle genau parallel zum Array einfällt wird der Fokuspunkt exakt auf der optischen Achse liegen, falls nicht, gibt es eine Verschiebung in x- oder/und in y-Richtung. Daraus lässt sich dann die Wellenfront rekonstruieren.

Wie haben dies nachgebaut (Abbildung 2), indem wir ein Linsenarray benutzten, welches aus 2 Linsenringen mit jeweils 17 bzw. 11 Linsen bestand. Als Detektor benutzten wir ebenfalls eine CCD-Kamera mit einem effektiven Bildfeld von 418 x 578 Pixel. Als Lichtquelle verwendeten wir einen Laser. Zwischen dem Laser und dem Linsenarray haben wir einen Kollimator gestellt, um einen parallelen Lichtstrahl zu erhalten. Zwischen diesem und dem Array wiederum bauten wir noch eine spezielle Linse zur Simulation des Astigmatismus hinzu.

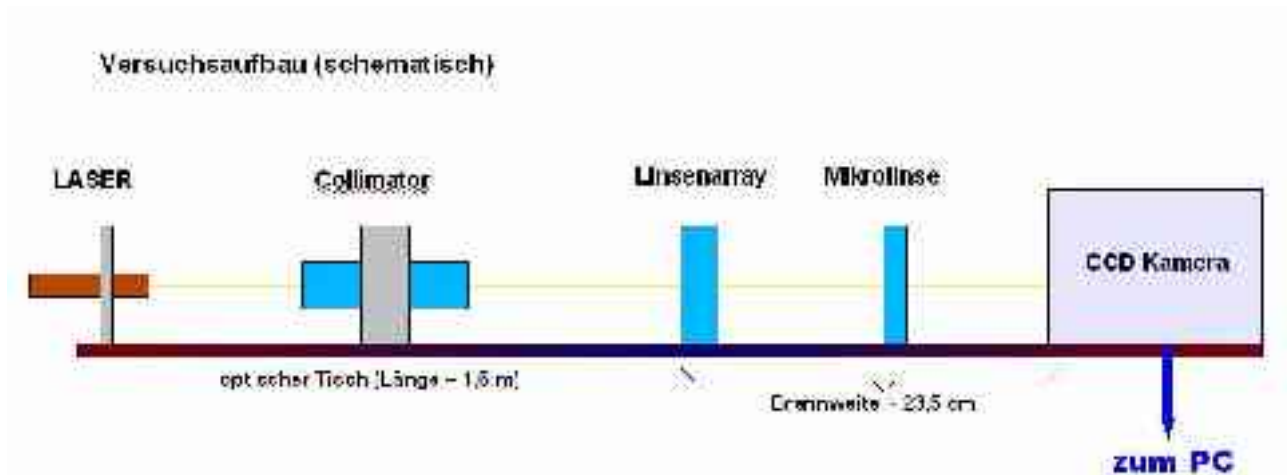


Abbildung 2: Versuchsaufbau

Damit haben wir nun den Astigmatismus gemessen und ohne die spezielle Linse, durch Verdrehen des Kollimators, auch den Defokus. Wir haben jeweils 2 Aufnahmen bei verschiedenen Einstellungen gemacht. Ein Vergleichsbild (ohne Abberationen) nahmen wir auch auf.

Astigmatismus ist ein Phänomen, bei dem die Brennpunkte der Meridionalebene und der Sagittalebene differieren. Die Folge davon ist eine unscharfe Abbildung der Punkte der Gegenstandsebene in der Bildebene – diese erscheinen als Striche oder Ovale.

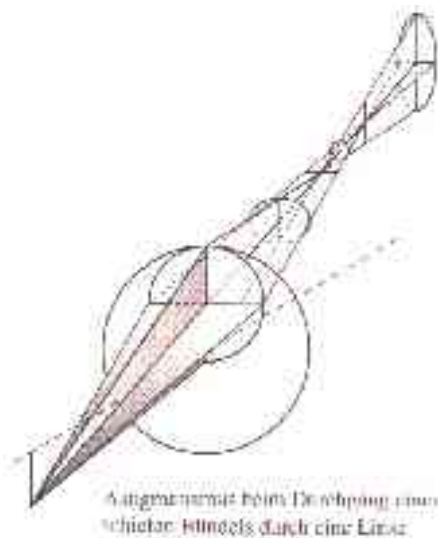


Abbildung 3: Astigmatismus

Versuchsdurchführung: CCD-Kamera-Eigenschaften

Zuerst haben wir die Linearität gemessen, wobei wir 20 Aufnahmen des Raumes bei verschiedenen Zeiten machten. Bei diesen Aufnahmen suchten wir jeweils einen Ausschnitt des Chips (50x50 Pixel) aus, in dem wir keinen Fehler entdecken konnten und berechneten über diesen Ausschnitt den Signalmittelwert $\langle S \rangle$.

Als nächstes machten wir 6 Darks mit minimaler Belichtungszeit (1ms), und subtrahierten 2 Aufnahmen voneinander, um den Effekt des Ausleserausens messen zu können, der, wie der Name schon sagt, durch Fluktuationen beim Auslesen des CCD-Chips entsteht. Außerdem erstellten wir daraus ein Histogramm und berechneten die Standardabweichung (genauerer siehe Auswertung).

Diese Messungen benutzten wir auch noch dazu, das Bias-Level zu messen, wozu wir das Mittel über alle freiliegenden Pixel der Aufnahmen ermittelten. (Bias-Level = eine konstante Zahl, die die Software auf jedes Pixel automatisch dazuaddiert, damit es bei späteren Rechnungen keine negativen Zahlen gibt)

Eine weitere wichtige Eigenschaft der CCD-Kamera, welche wir gemessen haben, ist der Dunkelstrom. Bei dieser Messung war es notwendig den Raum so weit wie möglich abzudunkeln, und die Kamera abzudecken, damit sicher gestellt werden kann, dass so gut wie keine Photonen von der Kamera detektiert werden können. (Dunkelstrom = Strom der durch die thermische Bewegung der Elektronen entsteht, diese sammeln sich dann in den Pixeln an, da dort ein elektrisches Feld anliegt)

Die letzte Eigenschaft, die wir in Bezug auf die CCD-Kamera gemessen haben, war das System Gain, wofür wir die Photonentransferkurve erstellen mussten. Zuerst ermittelten wir eine passende Belichtungszeit, so dass das Bild fast gesättigt war. Danach machten wir einige Aufnahmen (je 2 bei gleicher Belichtungszeit) bei immer schwächer werdender Lichtintensität.

Ein weiterer Effekt, der bei Aufnahmen mit einer CCD-Kamera mit beachtet werden muss, sind sogenannte Flatfield-Effekte, die wir hier nicht gemessen haben. Vor einer richtigen Aufnahme sollte ein Flatfield gemacht werden indem man das gesamte Aufnahmefeld gleichmäßig ausleuchtet, um zu sehen wie effizient jedes Pixel ist. Damit kann man dann alle Pixel auf gleiches Niveau bringen.

1.2. Anwendung der adaptiven Optik in der Astronomie

Neben dem beugungsbegrenzten Auflösungsvermögen: $\alpha = 1,22 \lambda / D$, welches durch den Durchmesser des Teleskopes und der beobachteten Wellenlänge abhängt, haben erdgebundenen Teleskope noch das Problem der turbulenten Atmosphäre (Seeing). Diese begrenzt das Auflösungsvermögen auf etwa eine Bogensekunde.

Alle Teleskope mit Spiegeln größer als 10 cm bringen also nicht mehr Auflösung sondern sammeln nur mehr Licht. Man kann jetzt die Auflösung aber trotzdem erhöhen, indem man eine adaptive Optik einbaut, welche die deformierten Wellenfronten, die von der Atmosphäre verursacht wurden, wieder zu undeformierten Wellenfronten korrigiert.

Dies kann erst seit relativ kurzer Zeit realisiert werden, da die technischen und rechnerischen (PC) Voraussetzungen erst jetzt gegeben sind, deswegen wird dies bis jetzt auch vorwiegend nur im Infraroten eingesetzt.

Dies sieht dann am Teleskop wie folgt aus:

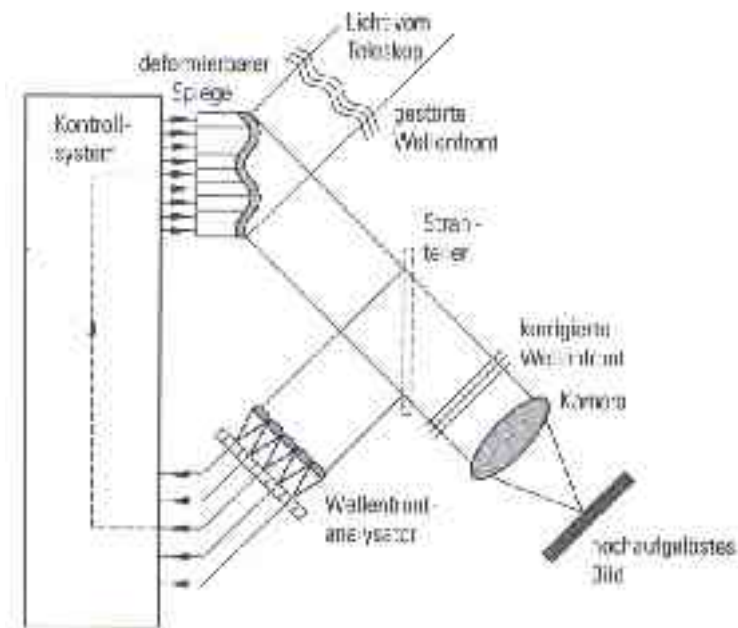


Abbildung 4: adaptive Optik

Das Licht vom Teleskop fällt auf einen deformierbaren Spiegel (Sekundärspiegel, gesteuert durch piezoelektronische Stempel). Ein Strahlteiler wirft einen Teil des Lichts auf einen Wellenfrontanalysator, der über einen Computer die Auflagepunkte des deformierbaren Spiegels verändert, das die einfallende Wellenfront wieder planparallel gemacht wird. Anschließend wird von einem Kamerasystem das korrigierte Bild aufgezeichnet.

Dies geschieht in Echtzeit, so dass der Wellenfrontsensor sofort wieder überprüfen kann, ob es richtig korrigiert wurde.

1.3. Funktionsprinzip der CCD-Kamera

Ein CCD-Detektor besteht aus zwei übereinanderliegenden Schichten eines p und n dotierten Halbleiters. Dadurch ergibt sich durch geeignete Wahl der Halbleiter ein Energielücke zwischen Leitungs- und Valenzbandes, welche der zu beobachtenden Wellenlänge entspricht. Die Oberfläche muss auch entsprechend durchlässig sein.

Wenn jetzt ein Elektron von einem ankommenden Photon die Energie aufnimmt, wechselt es in das Leitungsband, und damit es nicht wieder zurück ins Valenzband geht, muss ein elektrisches Feld angelegt werden.

Durch geschickte Kombination von elektrischen Leitern, die das elektrische Feld erzeugen und damit eine Potentialmulde, wo sich die Elektronen sammeln, und Abtrennung von Pixeln, kann dem Photon, nach dem Auslesen (was durch "Verschieben" des elektrischen Feldes zum Rand hin geschieht), der Ort des Auftreffens zugeordnet werden.

2. Auswertung

2.1. Shack-Hartmann-Sensor

Im ersten Teil des Versuches, wie oben schon erwähnt, haben wir einen Shack-Hartmann-Sensor aufgebaut (Aufbau: Abbildung 2). Mit diesem haben wir dann verschiedene optische Aberrationen ausgemessen: **Wertetabelle 1** und **Diagramme 1.1 bis 1.5**. Die Gradienten sind in den Diagrammen angedeutet. Bei allen Diagrammen tritt neben der Abberation noch eine überlagerte zusätzliche Verschiebung bzw. Verkippung auf, die vermutlich durch ein etwas schiefes Strahlenbündel des Lasers verursacht wurde.

Beim Astigmatismus (Diagramm 1.1 und 1.2) ist die Verformung des Originalkreises zu einer Ovale gut zu erkennen. Man erkennt auch den 90°-Unterschied zwischen dem Astigmatismus bei 30° und 120°. Beim Defokus haben wir auch 2 Aufnahmen gemacht, einmal für eine nach innen defokussiertes Strahlenbündel (Diagramm 1.3), welches aber nicht sehr gut zu erkennen ist, da die Verdrehung am Kollimator zu gering war, und dann für einen nach außen defokussierten Strahl (Diagramm 1.4). Hier erkennt man die Defokussierung dagegen sehr gut.

Als nächstes werden wir die Wellenfront für jeweils eine Abberation - wir wählen den Astigmatismus 30° und den Defokus 2 - mit Hilfe der Zernike Polynome rekonstruieren.

Die Wellenfront $W(x,y)$ ist als Summe der Produkte der Zernike Polynome Z_n und den Koeffizienten C_n gegeben, wobei die x und y die Koordinaten in CCD-Ebene sind:

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n Z_n(x, y)$$

Dabei ist das nullte Polynom eine Verschiebung in Ausbreitungsrichtung und konstant.

Es besteht nun eine Beziehung zwischen der Verkippung der Wellenfront dW/dx und der Verschiebung des Originalpunktes Δx wie folgt:

$$\frac{dW}{dx} = \frac{(\Delta x)}{f} = g \text{ bzw. } \frac{dW}{dy} = \frac{(\Delta y)}{f} = g$$

Oder allgemeiner:

$$\frac{(\Delta x_i)}{f} = g_{x_i} \quad \frac{(\Delta y_i)}{f} = g_{y_i}$$

Wir berechnen im folgenden die Polynome nur bis zur 6. Ordnung aus, da der Astigmatismus schon durch die 5. Ordnung bestimmt ist (Defokus: 4. Ordnung).

Dabei ist f unsere gemessene Brennweite: $f = (23,5 \pm 0,5) \text{ cm}$

Die Zernike-Polynome sind gegeben durch:

$$\begin{aligned} Z_0(x, y) &= \text{const.} \\ Z_1(x, y) &= y \\ Z_2(x, y) &= x \\ Z_3(x, y) &= -x^2 + y^2 \\ Z_4(x, y) &= 2xy \\ Z_5(x, y) &= -1 + 2x^2 + 2y^2 \\ Z_6(x, y) &= -3x^2y + y^3 \end{aligned}$$

Wir bilden davon nun die Ableitungen nach x und y (Z_0 kann damit weggelassen werden):

	$\frac{dZ_n(x, y)}{dx}$	$\frac{dZ_n(x, y)}{dy}$
$Z_1(x, y) = y$:	0	1
$Z_2(x, y) = x$:	1	0
$Z_3(x, y) = -x^2 + y^2$:	$-2x$	$2y$
$Z_4(x, y) = 2xy$:	$2y$	$2x$
$Z_5(x, y) = -1 + 2x^2 + 2y^2$:	$4x$	$4y$
$Z_6(x, y) = -3x^2y + y^3$:	$-6xy$	$-3x^2 + 3y^2$

bzw. die gesamte Ableitung: (1) $\frac{dW(x, y)}{dx} = \sum_{n=1}^6 C_n \frac{dZ_n(x, y)}{dx}$ $\frac{dW(x, y)}{dy} = \sum_{n=1}^6 C_n \frac{dZ_n(x, y)}{dy}$

Unsere rekonstruierte Wellenfront ist dann folgende Summe: $W(x, y) = \sum_{n=1}^6 C_n Z_n(x, y)$

Dazu müssen wir nun die Koeffizienten C_n bestimmen. Wir wählen uns dafür 3 Punkte der Aberration aus und vergleiche diese mit den Originalpunkten. Damit haben wir insgesamt 6 Verschiebungen (3 in x- und 3 in y-Richtung): Δx und Δy sowie die Koordinaten der Originalpunkte: x_i und y_i , welche wir für die x bzw. y in (1) einsetzen.

Astigmatismus (30°):

Originalpunkt x_i bzw. y_i	Astigmatismuspunkt	Verschiebung Δx bzw. Δy
$x_{10} = 208,244$	$x_1 = 211,938$	$\Delta x_1 = 3,694$
$x_{20} = 184,912$	$x_2 = 185,254$	$\Delta x_2 = 0,342$
$x_{30} = 70,340$	$x_3 = 71,313$	$\Delta x_3 = 0,973$
$y_{10} = 453,436$	$y_1 = 455,458$	$\Delta y_1 = 2,022$
$y_{20} = 215,499$	$y_2 = 214,231$	$\Delta y_2 = -1,268$
$y_{30} = 369,112$	$y_3 = 368,377$	$\Delta y_3 = -0,735$

Wenn man die x_i bzw. y_i jetzt in (1) einsetzt und jeweils die dazugehörigen g_{x_i} bzw. g_{y_i} berechnet, hat man dann 6 Gleichungen mit den 6 Unbekannten C_i , die man gleich als erweiterte Koeffizientenmatrix schreiben kann:

Beispiel für den Punkt 1 (x_{10} | y_{10}): $\sum_{n=1}^6 C_n \frac{dZ_n(x_{10}, y_{10})}{dx_{10}} = \frac{\Delta x_1}{f} = g_{x_1}$

$$C_2 - 2 * 208,244 C_3 + 2 * 453,711 C_4 + 4 * 208,244 C_5 - 6 * 208,244 * 453,711 C_6 = \frac{3,694}{23,5}$$

und:

$$\sum_{n=1}^6 C_n \frac{dZ_n(x_{10}, y_{10})}{dy_{10}} = \frac{\Delta y_1}{f} = g_{y_1}$$

$$C_1 \pm 2 * 453,711 C_3 + 2 * 208,244 C_4 + 4 * 453,711 C_5 - (3 * 208,244^2 + 3 * 453,711^2) C_6 = \frac{2,022}{23,5}$$

Die Gesamtmatrix ist dann (die Einheiten vernachlässigen wir, da wir nur an der relativen Größe der einzelnen Koeffizienten interessiert sind):

$$\Theta(C_i) = M_i$$

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	g
0	1	-416,488	906,872	832,976	-566522,000	0,157
1	0	906,872	416,488	1813,744	486715,900	0,086
0	1	-369,824	430,998	739,648	-239090,107	0,015
1	0	430,998	369,824	861,996	36742,110	-0,054
0	1	-140,680	738,224	281,360	-155780,029	0,041
1	0	738,224	140,680	1476,448	393887,859	-0,031

Diese könnte man jetzt auf Diagonalgestalt bringen um die Koeffizienten direkt abzulesen. Wir haben es gleich direkt per Taschenrechner berechnen lassen. Die C_1 bis C_6 ergeben sich dann folgendermaßen:

Koeffizient	Wert
C_1	-0,278180
C_2	-0,178214
C_3	0,000053
C_4	0,000249
C_5	0,000129
C_6	0,000000

Man erkennt das die Koeffizienten C_1 und C_2 betragsmäßig am Größten sind, was dann bedeuten würde, dass die Wellenfront nur verkippt war (Tip-Tilt), was aber durch den Laser schon hervorgerufen wurde. Man erkennt aber dennoch den Astigmatismusanteil bei C_5 , zusätzlich aber auch noch einen Defokusierungsanteil bei C_4 . C_3 und C_6 können wir vernachlässigen. Damit sieht also unsere Wellenfront (in Abhängigkeit von x und y) wie folgt aus (Z_0 setzen wir 0):

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^6 C_n Z_n(x, y) = -0,0001 - 0,278 y - 0,178 x + 0,0005 xy + 0,0002 x^2 + 0,0002 y^2$$

Für den Defokus folgt dies alles analog:

Defokus (2):

<i>Originalpunkt</i> x_i bzw. y_i	<i>Defokuspunkt</i>	<i>Verschiebung</i> Δx bzw. Δy
$x_{10} = 208,244$	$x_1 = 207,589$	$\Delta x_1 = -0,655$
$x_{20} = 184,912$	$x_2 = 183,571$	$\Delta x_2 = -1,341$
$x_{30} = 164,087$	$x_3 = 162,256$	$\Delta x_3 = -1,831$
$y_{10} = 453,436$	$y_1 = 455,553$	$\Delta y_1 = 2,117$
$y_{20} = 215,499$	$y_2 = 214,265$	$\Delta y_2 = -1,234$
$y_{30} = 453,711$	$y_3 = 455,786$	$\Delta y_3 = 2,075$

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	g
0	1	-416,488	906,870	832,976	-566551,958	-0,028
1	0	906,872	416,490	1813,744	486715,928	0,090
0	1	-369,820	431,000	739,648	-239090,107	-0,057
1	0	431,000	369,820	861,996	36742,114	-0,053
0	1	-328,174	907,420	656,348	-446688,411	-0,078
1	0	907,422	328,170	1814,844	536787,384	0,088

<i>Koeffizient</i>	<i>Wert</i>
C_1	-0,785500
C_2	1,331100
C_3	0,003620
C_4	-0,000176
C_5	-0,000702
C_6	-0,000003

$$W(x, y) = \sum_{n=1}^6 C_n Z_n(x, y) = -0,0007 - 0,786 y - 1,33 x - 0,00036 xy - 0,0022 x^2 + 0,0050 y^2$$

Hier sind ebenfalls die C_1 und C_2 betragsmäßig am Größten. C_4 für den Defokus ist hier zu klein. Es ist der Astigmatismus ausgeprägter, was eigentlich nicht sein sollte.

Durch den Großen Fehler des Lasers sind die Effekte zwar gering aber noch erkennbar. Ein weiterer Fehler steckt schon in der Aufgabenstellung, dort ist die Zuordnung der Koeffizienten zu den Abberationen nicht richtig, was die merkwürdigen Werte beim Defokus erklären würde. Es müsste C_3 der Defokus und C_4 und C_5 der Astigmatismus sein. Damit passt es auch besser zum Astigmatismus.

2.2. Messung der Eigenschaften der CCD-Kamera

Im zweiten Teil haben wir nun die verschiedenen Eigenschaften dieser CCD-Kamera bestimmt. Das Signal wird im Computer als ADU ausgegeben. Mit dem Gain, welchen wir während den Eigenschaftsmessungen auch bestimmen sollten, kann man dann die absolute Photoelektronenzahl berechnen. Um die Photonenzahl zu berechnen bräuchte man noch die (Quanten-) Effizienz der Pixel.

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte am Computer mit dem Programm IDL.

2.2.1. Linearität

Mit Linearität ist gemeint, dass bei konstanter Beleuchtung das Auslesesignal linear mit der Belichtungszeit zunimmt. Die aufgetragenen Messwerte (**Wertetabelle 2**) bestätigen dies sehr gut: **Diagramm 2**. Der Fehler der Regressionsgerade im linearen Teil hat einen sehr geringen Fehler. Da das Bias-Level konstant ist und der Dunkelstrom sich auch linear verhält braucht dieser nicht beachtet werden. Aus dem 50 x 50 großen Bildfeld wurde dann der Signalmittelwert $\langle S \rangle$ berechnet.

Bei einem Signal von rund 65500 ADU tritt dann die Sättigung (maximale Aufnahmefähigkeit eines Pixels) ein. Eine Abweichung der Linearität ist bei kurzen Belichtungszeiten nicht zu beobachten. Im allgemeinen kann man aber sagen, dass bei kurzen Belichtungszeiten das Signal zu Rausch Verhältnis (S/N) schlechter ist als bei längeren Belichtungszeiten, weswegen ein Bild länger zu belichten besser ist als mehrere kurz belichtete Aufnahmen zu addieren.

2.2.2. Ausleserauschen und Null-Niveau (Bias-Level)

Um das Ausleserauschen zu bestimmen haben wir jeweils 2 Dunkelaufnahmen (Darks, Belichtungszeit: 1 ms) voneinander subtrahiert um den Dunkelstrom und die Flat-Field-Effekte auszurechnen. Wir haben wieder ein 50 x 50 großes Bildfeld gewählt und für die ersten beiden Darks (**Wertetabelle 3**) ein Histogramm gezeichnet. Es beschreibt wie häufig ein Pixel mit einem bestimmten Signal vorhanden war: **Diagramm 3.1** und **3.2**. Aus **Diagramm 3.2** erkennt man, dass die Verteilung sehr gut zu einer Gaußverteilung passt.

Die Standardabweichungen der 3 Differenzbilder sind ebenfalls in **Wertetabelle 3** angegeben. Der Mittelwert der Standardabweichung σ ergibt sich damit zu (14,08 +/- 1,70) ADU. Dieser ist mit Wurzel 2 dividiert worden, um die Normierung beim Abziehen von jeweils 2 Darks zu gewährleisten.

Aus den 6 Darks lässt sich nun auch noch durch die Mittelung des Signals über alle Pixel der Bias bestimmen. Dieser ergibt sich dadurch zu (1023 +/- 3) ADU.

2.2.3. Dunkelstrom

Zur Messung des Dunkelstroms haben wir wieder die Kamera komplett abgedunkelt und dann Aufnahmen mit Belichtungszeiten zwischen 1 ms und 250 s gemacht: **Wertetabelle 4**. Die Werte sind dann in **Diagramm 4** aufgetragen nachdem der Bias abgezogen wurde.

Man erkennt, dass es bei kürzeren Belichtungszeiten noch keinen linearen Anstieg gibt. Hier macht sich noch das Systemrauschen (Ausleserauschen und Photonenrauschen) bemerkbar, weswegen hier auch bei Aufnahmen der Dunkelstrom vernachlässigt werden kann.

Bei längeren Belichtungszeiten ist dann der Dunkelstrom linear mit der Zeit, weswegen wir hier den Geradenfit angelegt haben. Wir haben auch zusätzlich die Regressionsgerade über alle Messwerte eingezeichnet. Da der Dunkelstrom bei diesen längeren Belichtungszeiten linear ist kann darauf gut korrigiert werden.

2.2.4. Verstärkung (Gain)

Um die Verstärkung zu berechnen, müssen wir zuerst die Phototransferkurve erstellen, indem wir bei konstanter Belichtungszeit die Lichtstärke variieren und mit dem Computer die Varianz σ^2 im Bild bestimmen. Dazu wird auch wieder ein 50 x 50 großer Bildausschnitt gewählt. Die Varianz wird über das mittlere Signal $\langle S \rangle$ aufgetragen. Die reziproke Steigung ergibt dann die Verstärkung g .

Die Messwerte sind in **Wertetabelle 5** für 10 verschiedene Lichtstärken eingetragen. Pro Lichtstärke haben wir 2 Aufnahmen gemacht. Da der mittlere Signalunterschied sehr gering war benutzten wir nur jeweils die Daten von Bild A. Die Auftragung von der Varianz über das Signal ergibt dann **Diagramm 5**.

Die bestimmte Steigung aus der Regressionsgeraden für den linearen Teil ist $(1,6725 \pm 0,0307)$ ADU, der Gain g somit $(0,600 \pm 0,011)$ ADU⁻¹. Dies bedeutet also, dass 1 ADU 0,600 Photoelektronen entsprechen. Den Gain haben wir nun benutzt, um für alle gemessenen Werte die wirkliche Elektronenzahl zu bestimmen.

Aus dem Skript geht hervor, dass der Wert für g eigentlich 1 bzw. nahe bei 1 liegen sollte. Unser bestimmter Wert liegt auch mit den bekannten Messfehlern weit außerhalb von eins. Es muss also ein großer systematischer Fehler vorliegen, denn die Linearität ist schließlich noch erhalten.

Der Fehler wurde mit sehr großer Wahrscheinlichkeit dadurch verursacht, dass die Monitore zuviel Streulicht bzw. zusätzliches Licht auf die CCD-Kamera strahlten. Da dieses Licht ungleichmäßig auf die CCD-Kamera fiel, ist womöglich die zu große Varianz bei den einzelnen Messwerten erklärbar, denn die Varianz beschreibt ja gerade die quadratische Abweichung um den Mittelwert. Ein weitere Ursache wird die unterschiedliche Empfindlichkeit der einzelnen Pixel sein, da diese die Varianz zusätzlich proportional erhöhen. Eine Flatfieldaufnahme haben wir ja nicht gemacht um die Abweichungen der Pixel festzustellen.

Im Diagramm ist neben dem linearen Teil des Poissonrauschen auch die Sättigung zu erkennen (der Punkt bei 65000 ADU).

3. Schlussdiskussion

Bei diesem Versuch lagen fast alle Messwerte, außer bei der Aufstellung der Transferkurve, im erwarteten Bereich. Es wäre hier wichtig gewesen den Raum stärker zu verdunkeln bzw. darauf zu achten, dass kein unnötiges Licht von den Computerbildschirmen kommt.

Die einzige Schwierigkeit hatten wir am Anfang bei der Auffindung des richtigen Fokusses für das Linsenarray, da es nicht so einfach war die Brennpunkte auf den (fortlaufenden) Aufnahmen der CCD-Kamera zu identifizieren. Dies lag u.a. auch daran, dass die Intensität des Lasers zu hoch eingestellt war, obwohl man andererseits die höhere Intensität benötigte um überhaupt den Strahlengang zu verfolgen.

Als weitere Fehlerquelle sei hier nochmal das leicht schiefe Strahlenbündel des Lasers erwähnt, was zu einer ungleichmäßigen Ausleuchtung führte. Zusätzlich trat noch eine Mitte-Rand-Verdunkelung auf, die durch die Bündelung des Strahls bedingt war.

Den Versuch i.a. fanden wir sehr gut, im besonderen dass die CCD-Kamera ohne Probleme funktioniert hat. Wir finden, dass die Funktionsweise und Anwendung eines Shack-Hartmann-Sensors bei diesem Versuch gut verständlich wird.

Als einzig Negatives ist hier anzumerken, dass das Skript nicht vollständig war und die Versuchsbeschreibung etwas detaillierter sein könnte. Z.B. könnten die wichtigsten Computerbefehle und etwas mehr zu den Zernike-Polynomen drin stehen.

Wertetabelle 1: Abbildungsfehler

(Bildfeld: 418 x 578 Pixel)

Original

Astigmatismus (30°)

Astigmatismus (120°)

Defokus (1)

Defokus (2)

		x-Achse [Pixel]	y-Achse [Pixel]	x-Achse [Pixel]	y-Achse [Pixel]	x-Achse [Pixel]	y-Achse [Pixel]	x-Achse [Pixel]	y-Achse [Pixel]	x-Achse [Pixel]	y-Achse [Pixel]
1	äußerer Ring	208,244	453,436	211,938	455,458	205,921	457,017	208,753	452,531	207,589	455,553
2		249,111	437,204	252,939	439,543	247,524	440,091	249,526	436,300	249,449	438,790
3		281,800	407,583	285,673	409,964	281,020	409,772	282,135	406,730	283,190	408,456
4		301,179	367,895	304,809	369,983	301,201	369,459	301,548	367,098	302,986	367,754
5		305,046	323,946	308,147	325,620	305,593	324,996	305,352	323,224	306,890	322,699
6		292,825	281,471	295,269	282,327	293,748	282,115	293,153	280,807	294,418	278,984
7		265,834	246,632	267,541	246,778	266,886	247,234	266,195	246,043	266,585	243,255
8		228,166	223,460	229,135	222,882	229,007	224,299	228,605	222,913	228,003	219,549
9		184,912	215,499	185,254	214,231	185,290	216,767	185,398	214,928	183,571	211,265
10		141,596	224,019	141,587	222,344	141,291	225,905	142,169	223,480	139,137	220,101
11		104,153	247,551	104,077	245,721	103,067	250,151	104,829	246,938	100,712	244,205
12		77,828	282,802	77,899	281,098	76,009	286,129	78,563	282,125	73,717	280,412
13		66,131	325,277	66,568	323,971	63,855	329,353	66,850	324,576	61,694	323,955
14		70,340	369,112	71,313	368,377	67,344	373,492	71,035	368,332	65,994	369,004
15		90,195	408,424	91,902	408,563	86,952	413,000	90,898	407,593	86,381	409,344
16		122,967	437,899	125,394	438,717	119,776	442,384	123,580	436,998	120,015	439,635
17		164,087	453,711	167,078	455,207	161,223	457,841	164,642	452,779	162,256	455,786
1	innerer Ring	189,801	412,137	192,635	413,440	187,835	415,551	190,305	411,274	188,611	413,080
2		230,550	397,807	233,726	399,309	229,237	400,574	230,991	396,951	230,419	398,404
3		256,842	363,672	259,922	365,147	256,245	365,736	257,246	362,874	257,322	363,343
4		260,625	320,618	263,137	321,620	260,640	322,135	261,017	319,888	261,281	319,171
5		240,499	282,215	242,359	282,493	240,757	283,635	240,944	281,548	240,665	279,855
6		202,941	261,021	204,136	260,545	202,926	262,629	203,431	260,392	202,085	258,061
7		159,830	263,440	160,548	262,524	159,276	265,521	160,373	262,807	157,842	260,553
8		124,851	288,813	125,542	287,725	123,638	291,465	125,516	288,125	122,008	286,612
9		109,112	329,022	110,052	328,287	107,010	332,495	109,770	328,310	105,883	327,853
10		117,702	371,280	119,184	371,158	115,278	375,148	118,312	370,492	114,693	371,242
11		147,730	402,450	149,989	403,105	145,325	406,225	148,277	401,617	145,484	403,216

Wertetabelle 2: Linearität

(Bildfeld: 418 x 578 Pixel; Teilfeld: 140:190,300:350)

Gain: 0,600 Photoelektronen/ADU

Nummer	Bild	Belichtungszeit [ms]	mittleres Signal <S> (50x50)	
	Datei		[ADU]	[Elektronenanzahl]
1	0000	1	2686,04	4476,73
2	0018	15	3687,32	6145,53
3	0001	30	4691,89	7819,82
4	0019	55	6468,52	10780,87
5	0002	80	8185,06	13641,77
6	0017	110	10248,60	17081,00
7	0003	150	13075,80	21793,00
8	0020	210	17075,40	28459,00
9	0004	280	22074,50	36790,83
10	0005	400	30530,00	50883,33
11	0006	500	37508,50	62514,17
12	0007	600	44779,30	74632,17
13	0008	700	51879,30	86465,50
14	0009	800	58482,60	97471,00
15	0011	850	62151,60	103586,00
16	0016	880	64585,70	107642,83
17	0010	900	65114,10	108523,50
18	0015	910	65519,60	109199,33
19	0013	920	65503,00	109171,67
20	0012	950	65534,90	109224,83

(Bildfeld: 418 x 578 Pixel)

Gain: 0,600 Photoelektronen/ADU

Bild Datei	Bias mittleres Signal <S>		Bild Datei	Ausleserauschen Mittelwerte nach Abzug von dki-dkj <S>					
	[ADU]	[Elektronenanzahl]		[ADU]	[Elektronenanzahl]	Standardabweichung			
						sqrt(2)*sigma [ADU]	sigma [ADU]	[Elektronenanzahl]	
dk1	1010,89	1684,8	diff1min	-4,52018	-7,534	20,5483	14,5298	24,22	
dk2	1014,90	1691,5							
dk3	1023,76	1706,3	diff2min	3,23491	5,392	15,4587	10,9310	18,22	
dk4	1027,56	1712,6							
dk5	1029,34	1715,6	diff3min	-1,20684	-2,011	23,7250	16,7761	27,96	
dk6	1031,18	1718,6							
Summe:	6137,63	10229,4				Summe:	42,2369	70,39	
Mittelwert:	1022,94	1704,9				Mittelwert:	14,0790	23,46	
Fehler:	3,37	5,62	(vernachlässigbar)	$Fehler: \Delta x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$			Fehler:	1,7023	2,84

Wertetabelle 4: Dunkelstrom

(Bildfeld: 418 x 578 Pixel)

Nummer	Bild Datei	Belichtungszeit [ms]	mittleres Signal <S>		Dunkelstrom = <S> - Bias	
			[ADU]	[Elektronenanzahl]	[ADU]	[Elektronenanzahl]
1	0200	1	1033,94	1723,23	11,00	18,33
(2	0201	30	1036,65	-	13,71	-)
(3	0202	60	1038,80	-	15,86	-)
(4	0203	90	1040,18	-	17,24	-)
(5	0204	120	1040,86	-	17,92	-)
(6	0205	150	1041,34	-	18,40	-)
(7	0206	180	1040,55	-	17,61	-)
(8	0207	210	1042,42	-	19,48	-)
(9	0208	240	1043,54	-	20,60	-)
(10	0209	270	1044,37	-	21,43	-)
11	0210	300	1044,87	1741,45	21,93	36,55
12	0400	1000	1032,35	1720,58	9,41	15,68
14	0401	10000	1087,83	1813,05	64,89	108,15
15	0402	50000	1308,46	2180,77	285,52	475,87
16	0403	100000	1650,99	2751,65	628,05	1046,75
17	0405	150000	2085,78	3476,30	1062,84	1771,40
18	0406	200000	2511,37	4185,62	1488,43	2480,72
19	0407	250000	2964,96	4941,60	1942,02	3236,70

Wertetabelle 5: Verstärkung/Gain

(Bildfeld: 418 x 578 Pixel; Teilfeld: 140:190,300:350)

Gain: 0,600 Photoelektronen/ADU

Belichtungszeit: 525 ms

Aufnahme- paar	Lichtstärke (selbstgewählt)	Bild A Datei	Bild B Datei	mittleres Signal <S> von A (50x50)		mittleres Signal <S> von B (50x50)		Variance von A [ADU ²]
				[ADU]	[Elektronenanzahl]	[ADU]	[Elektronenanzahl]	
1	1 (maximal)	0301	0302	65052,0	108420,00	64979,30	108298,83	60592,7
2	2	0303	0304	36871,6	61452,67	36753,00	61255,00	60078,5
3	3	0305	0306	28031,6	46719,33	27999,40	46665,67	44492,0
4	4	0307	0308	24818,5	41364,17	25588,10	42646,83	41059,1
5	5	0309	0310	18242,7	30404,50	19179,50	31965,83	30217,0
6	6	0311	0312	19659,2	32765,33	19841,80	33069,67	30889,9
7	7	0313	0314	15410,4	25684,00	15637,90	26063,17	24388,1
8	8	0315	0316	11522,4	19204,00	11394,70	18991,17	17056,6
9	9	0317	0318	10732,4	17887,33	10831,00	18051,67	16065,1
10	10(minimal)	0319	0320	10439,7	17399,50	10151,00	16918,33	15727,0

Diagramm 1.5: Alles

- + Originalbild
- + Astigmatismus (30°)
- + Astigmatismus (120°)
- + Defokus (1)
- + Defokus (2)

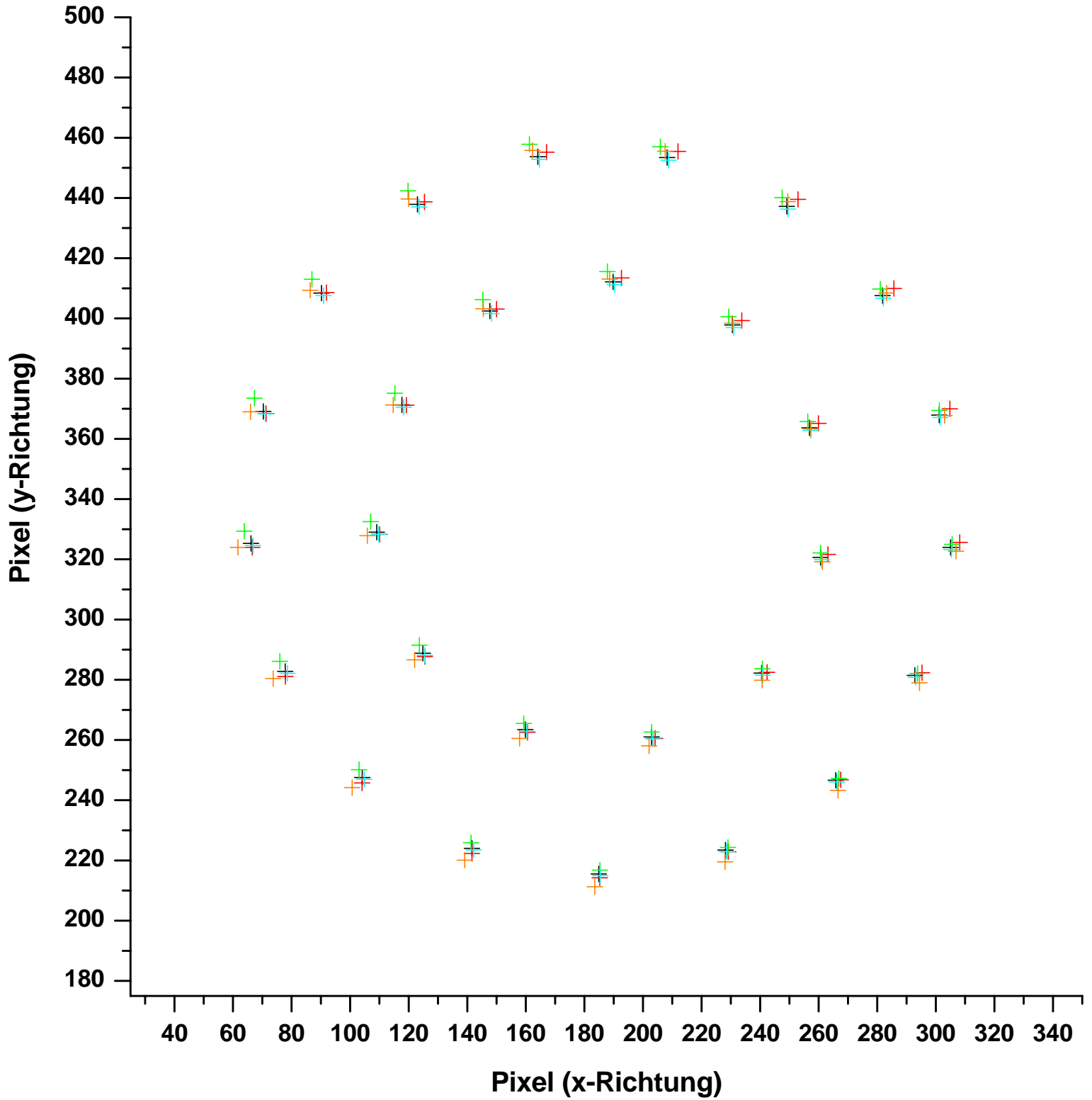


Diagramm 1.3: Defokus (1)

+ Originalbild
+ Defokus (1)

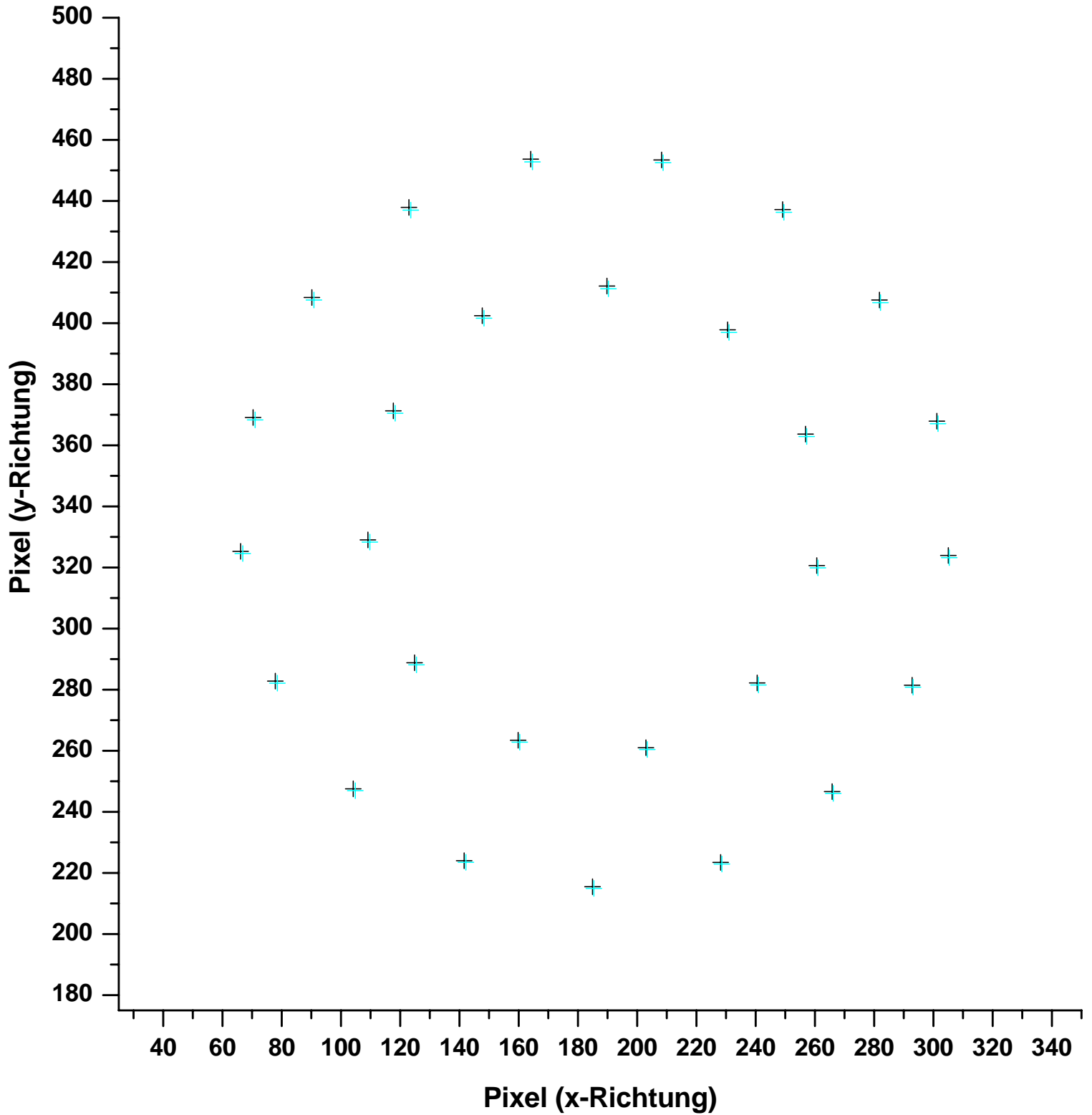


Diagramm 1.4: Defokus (2)

- + Originalbild
- + Defokus (2)

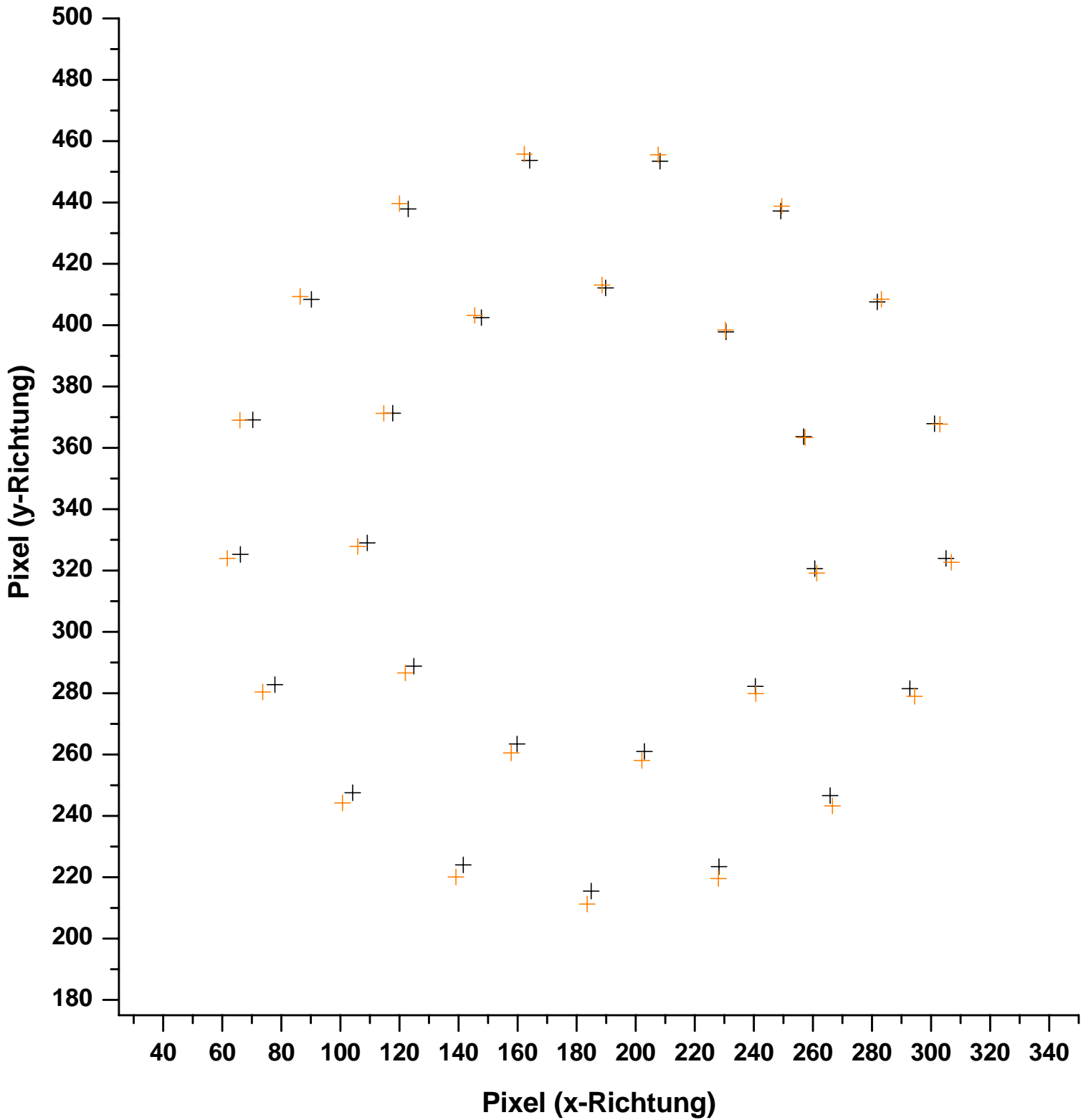


Diagramm 1.2: Astigmatismus (30°)

- + Originalbild
- + Astigmatismus (30°)

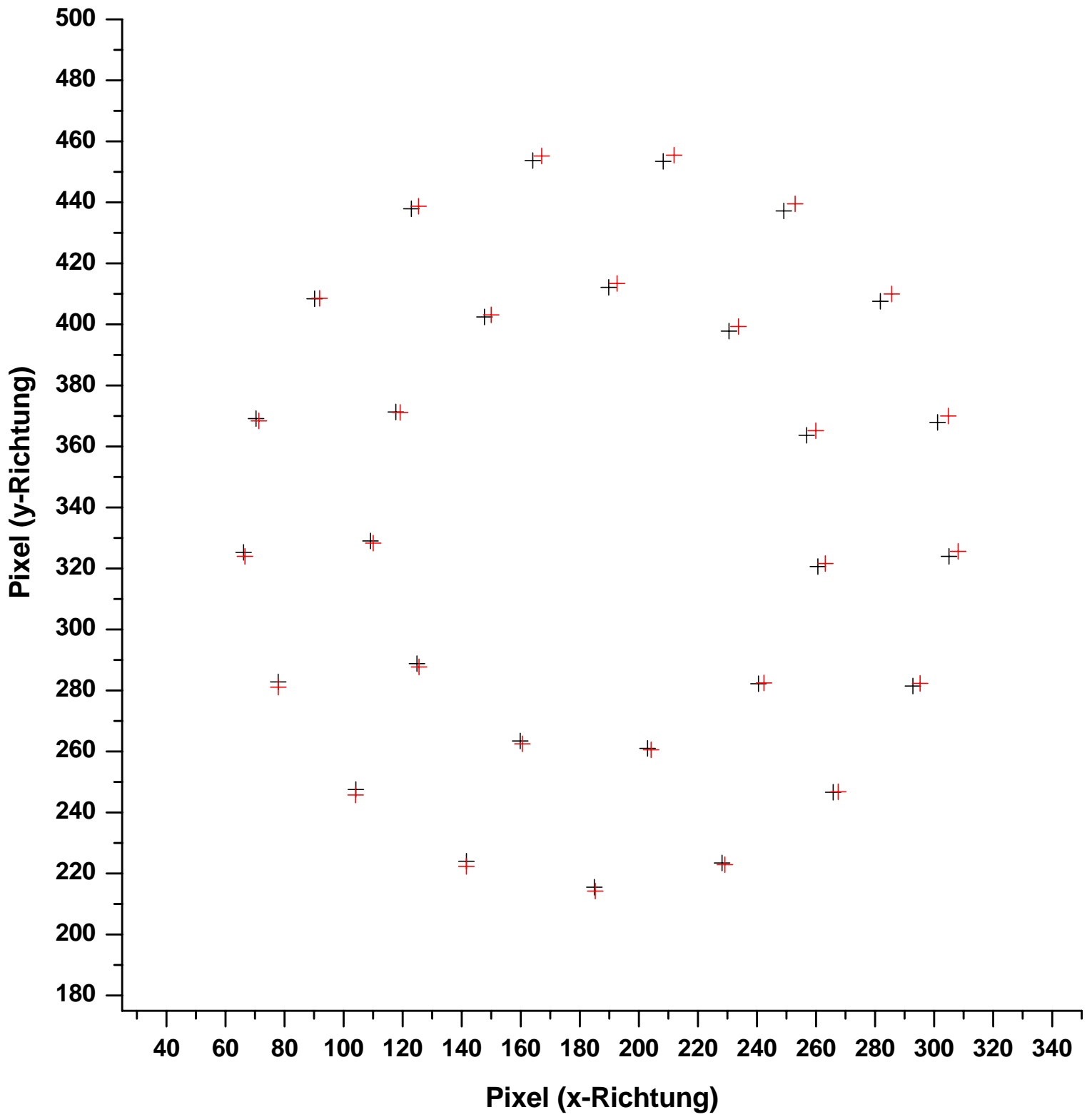


Diagramm 1.1: Astigmatismus (120°)

- + Originalbild
- + Astigmatismus (120°)

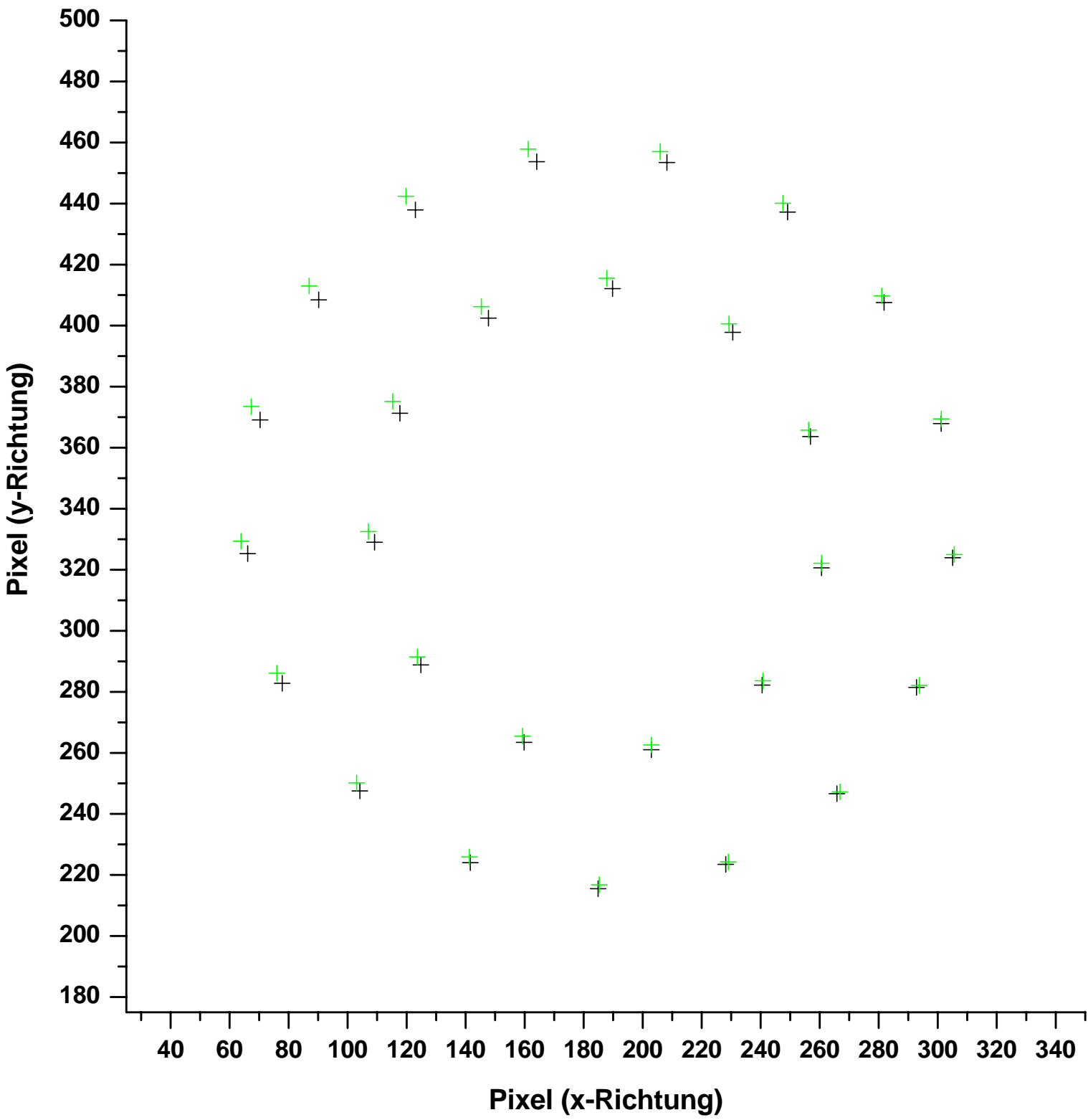
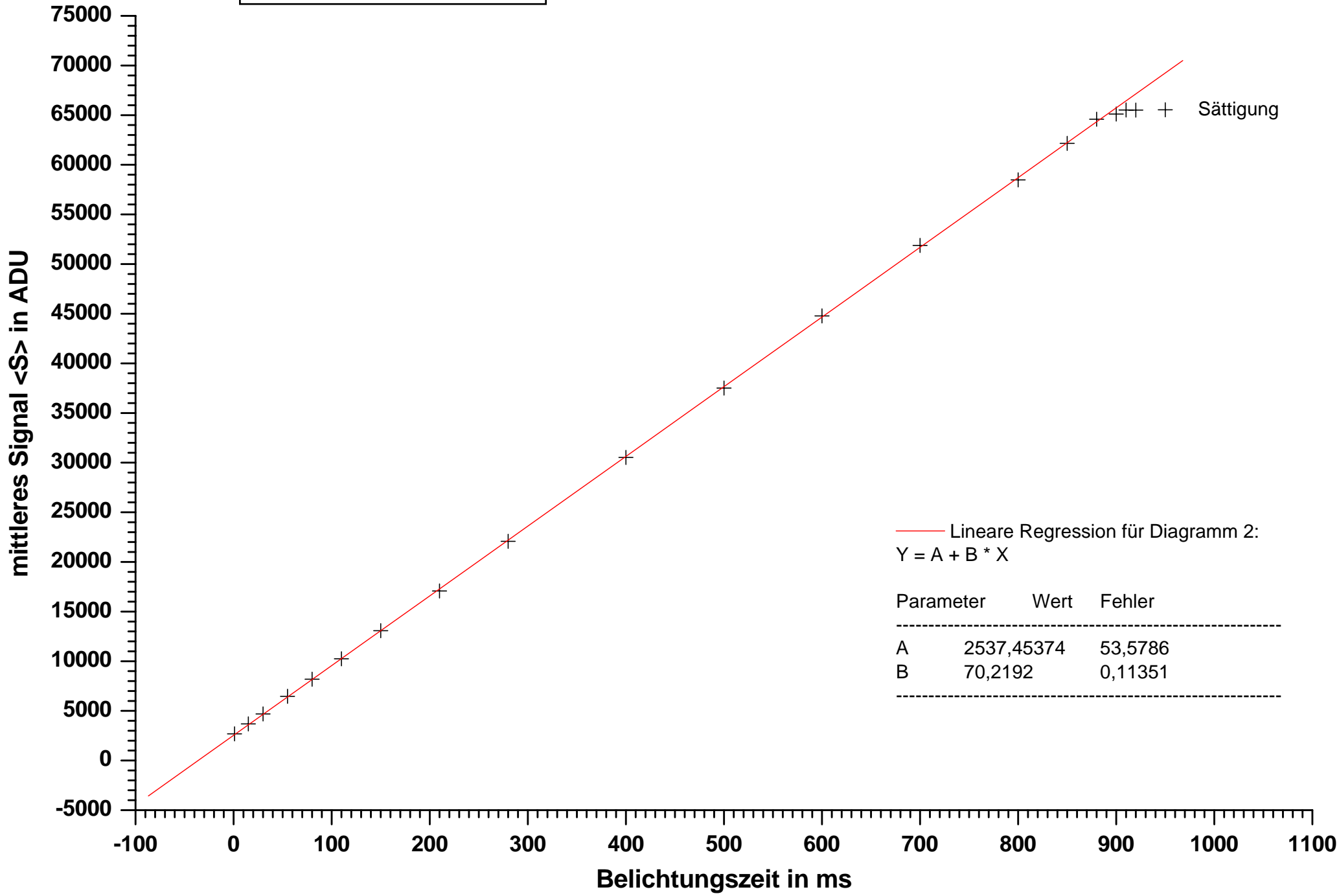


Diagramm 2: Linearität



— Lineare Regression für Diagramm 2:
 $Y = A + B * X$

Parameter	Wert	Fehler
A	2537,45374	53,5786
B	70,2192	0,11351

Diagramm 3.1: Histogramm (Ausleserauschen)

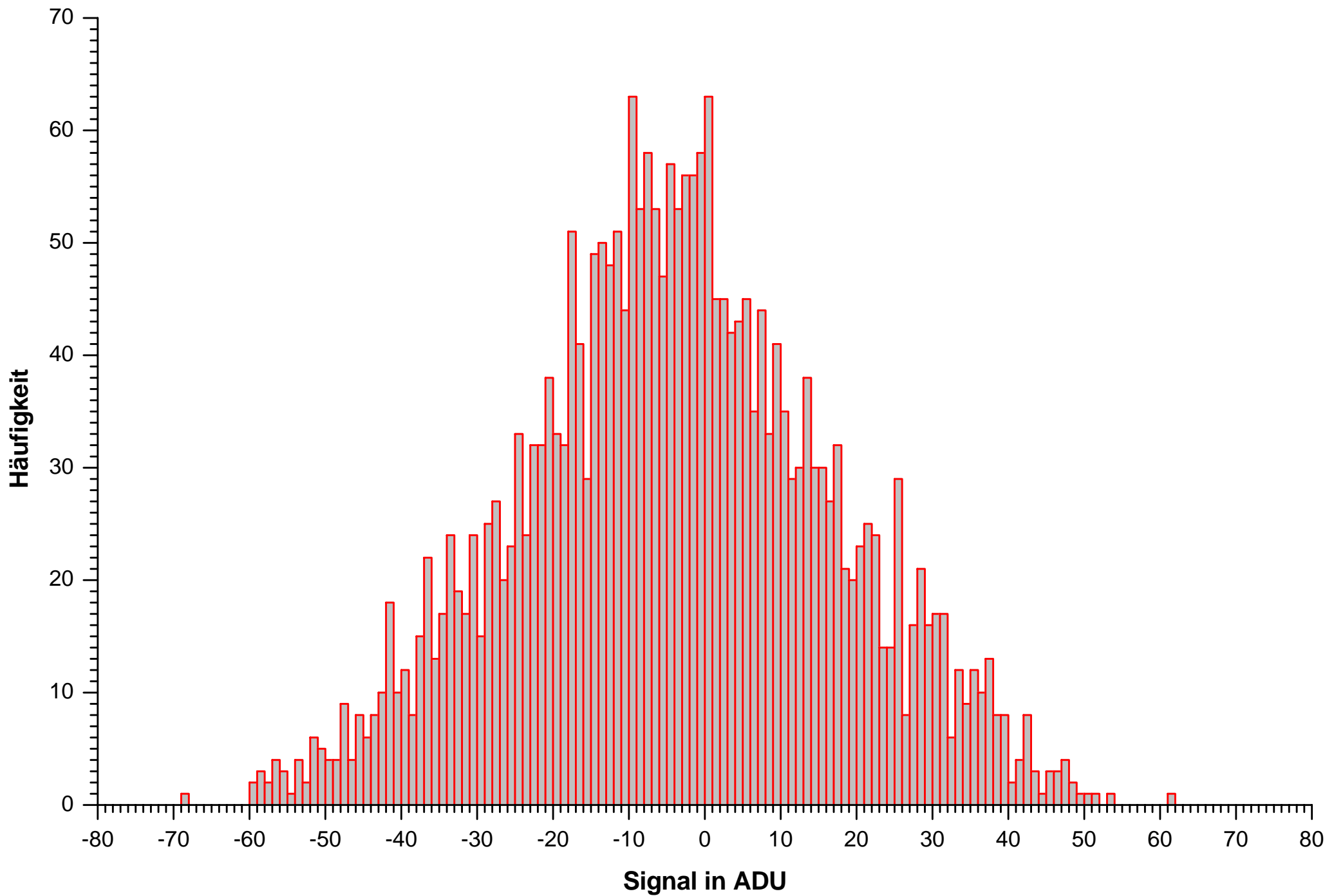


Diagramm 3.2: Histogramm (Ausleserauschen)

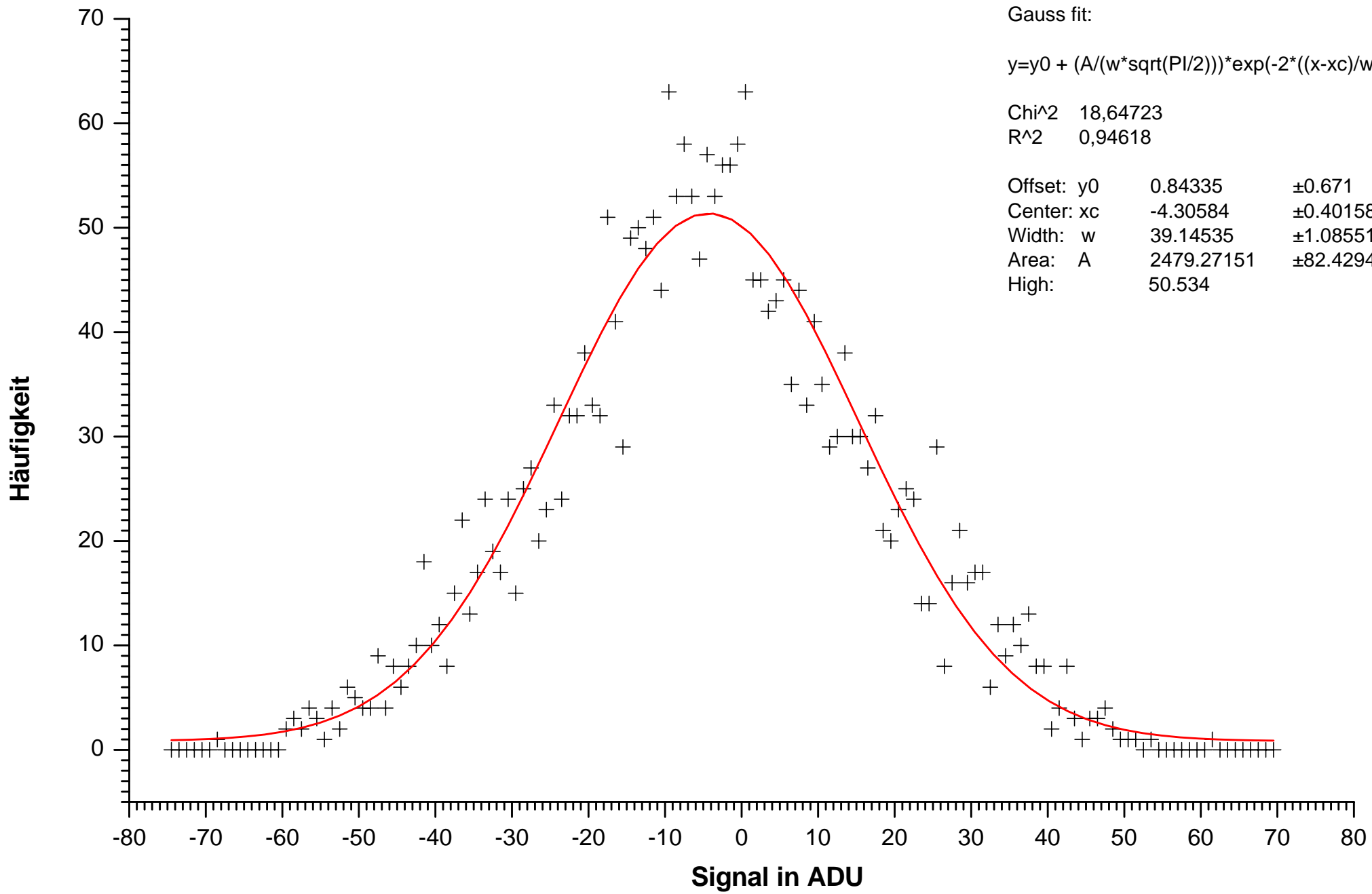


Diagramm 4: Dunkelstrom

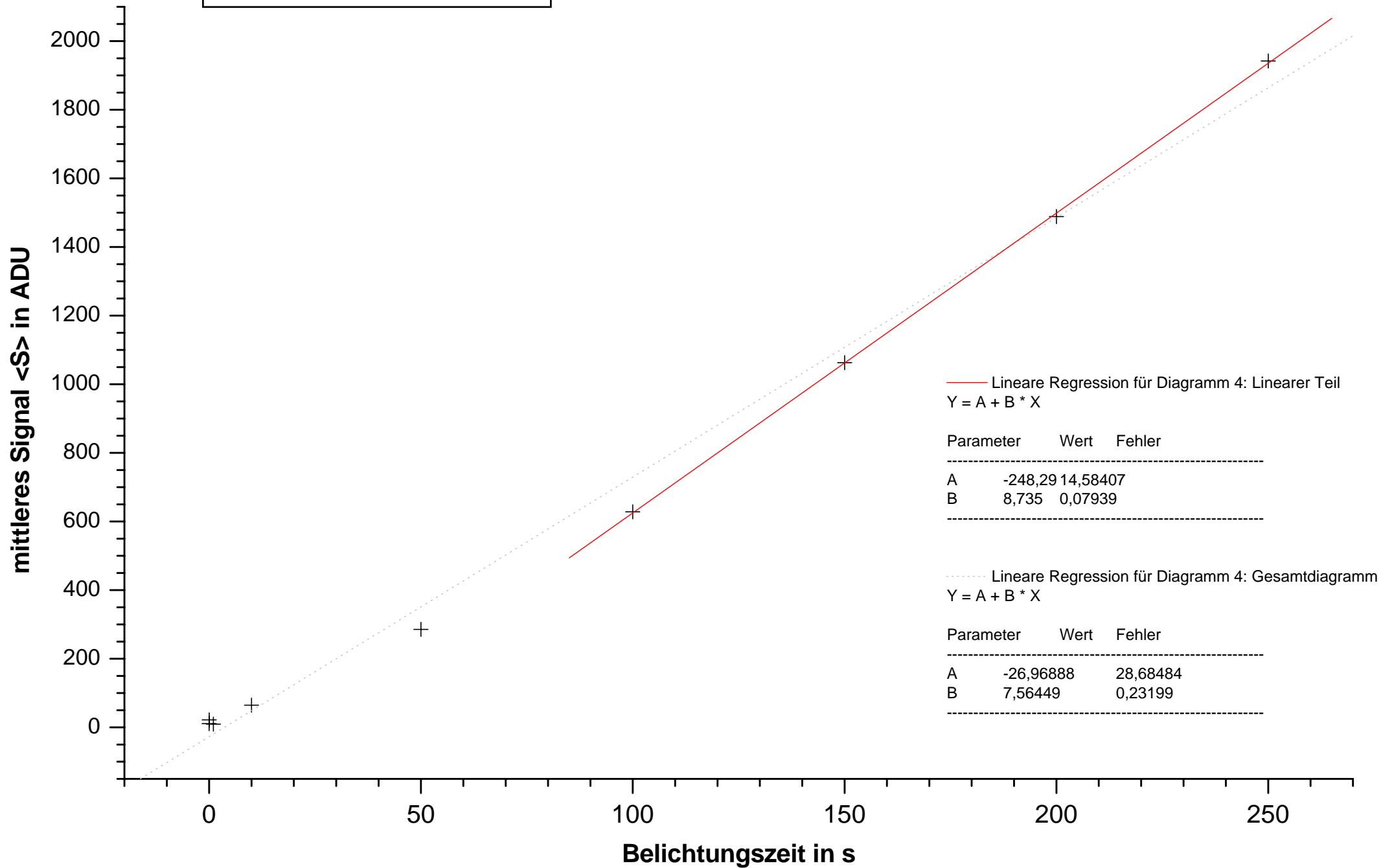


Diagramm 5: Verstärkung (Gain)

