

Entfaltung (Deconvolution)

- bekanntes Verfahren, Wiener 1949
- zunächst Bedeutung in Signalverarbeitung, Bildverarbeitung, künstliche neuronale Netze (Seeing)
- erlangte „Berühmtheit“ durch HST:
 - Nachträglich angebrachte Korrekturlinse.
 - Weitere Bildverbesserung durch Entfaltung.

Inhalt:

Motivation + Historie

Alltagsbeispiel

LTI-Systeme

Faltung + Beispiele

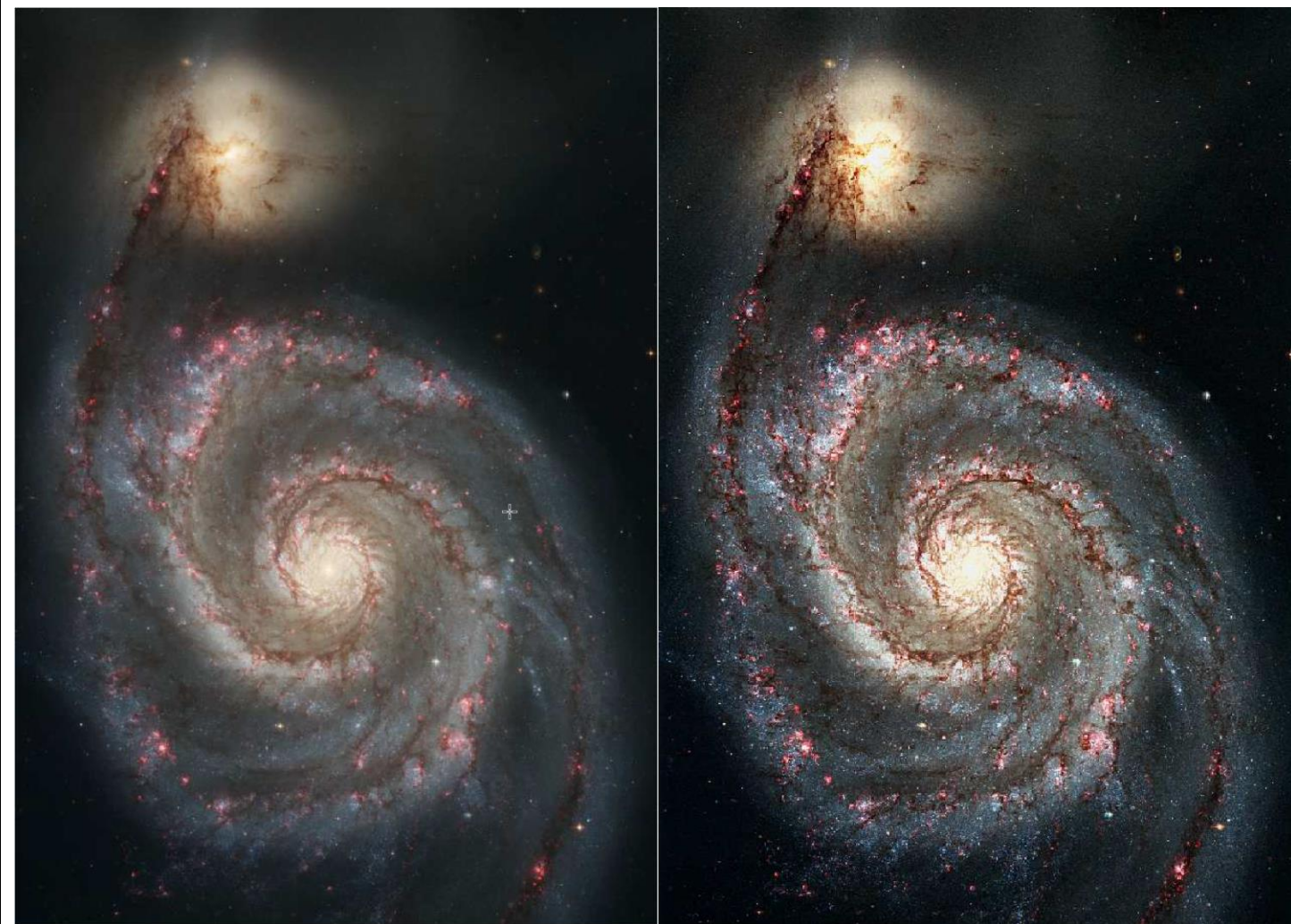
Entfaltung

Point Spread Function

Pixinsight-Beispiel

Beispiel

APEX Verfahren anhand einer HST M51 Aufnahme



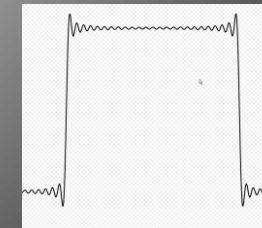
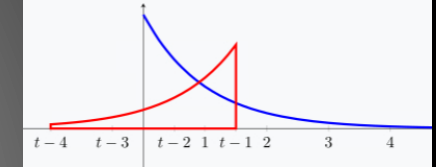
APEX blind deconvolution of color Hubble space telescope imagery and other astronomical data, Alfred S. Carasso, Optical Engineering, 45(10), 107004 (2006).

<https://doi.org/10.1117/1.2362579>

Entfaltung

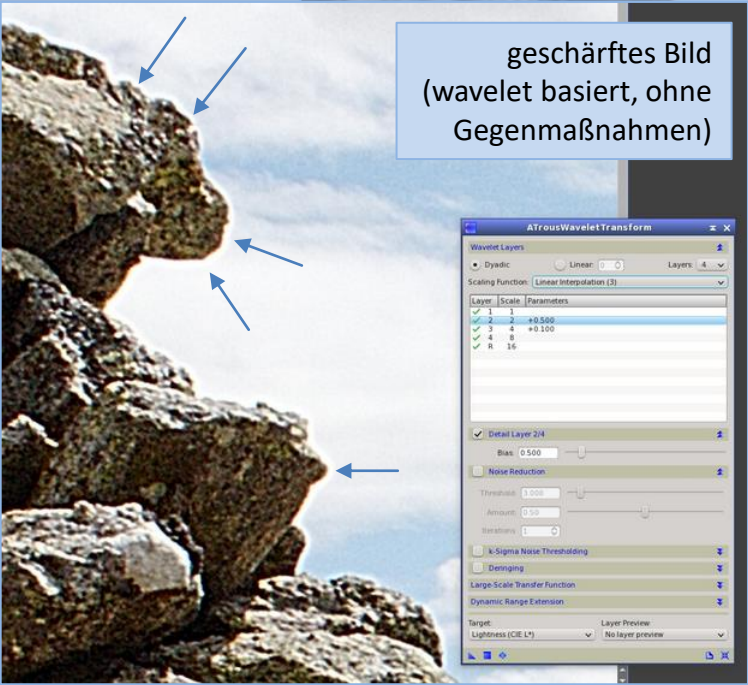
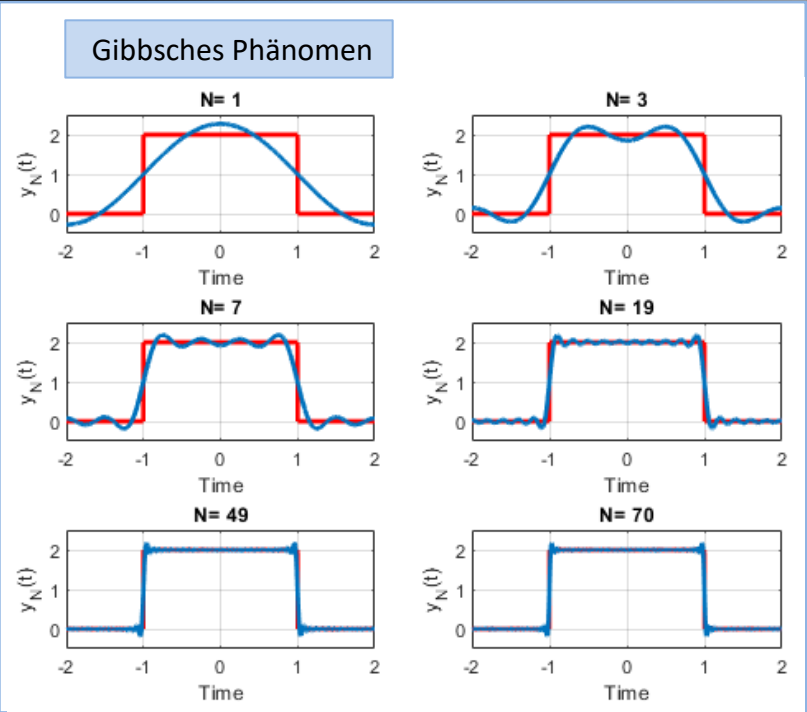
Allgemeines

- „Faltung“ (engl. Convolution) beschreibt eine mathematische Operation.
- „Entfaltung“ (engl. Deconvolution) ist die Umkehrung der Faltung. Diese Umkehrung ist nicht immer im mathematischen Sinne vollständig möglich.
- Erzeugt in der Praxis Artefakte. Sie sind mit geeigneten Mitteln handhabbar. Das ist aber auch erforderlich.
 - „Ringing“ (Gibbs-Phänomen)
 - sie bringt zusätzliche Rauschanteile ins Bild
- In der Praxis kein „Knalleffekt“.
Keine Zauberei!
- Keine „herkömmliche“ Bildschärfung wie bei gebräuchlichen Standardverfahren oder Wavelet-basierten Verfahren.
Entfaltung stellt einen grundsätzlich anderen Ansatz dar.



Gibbsches Phänomen

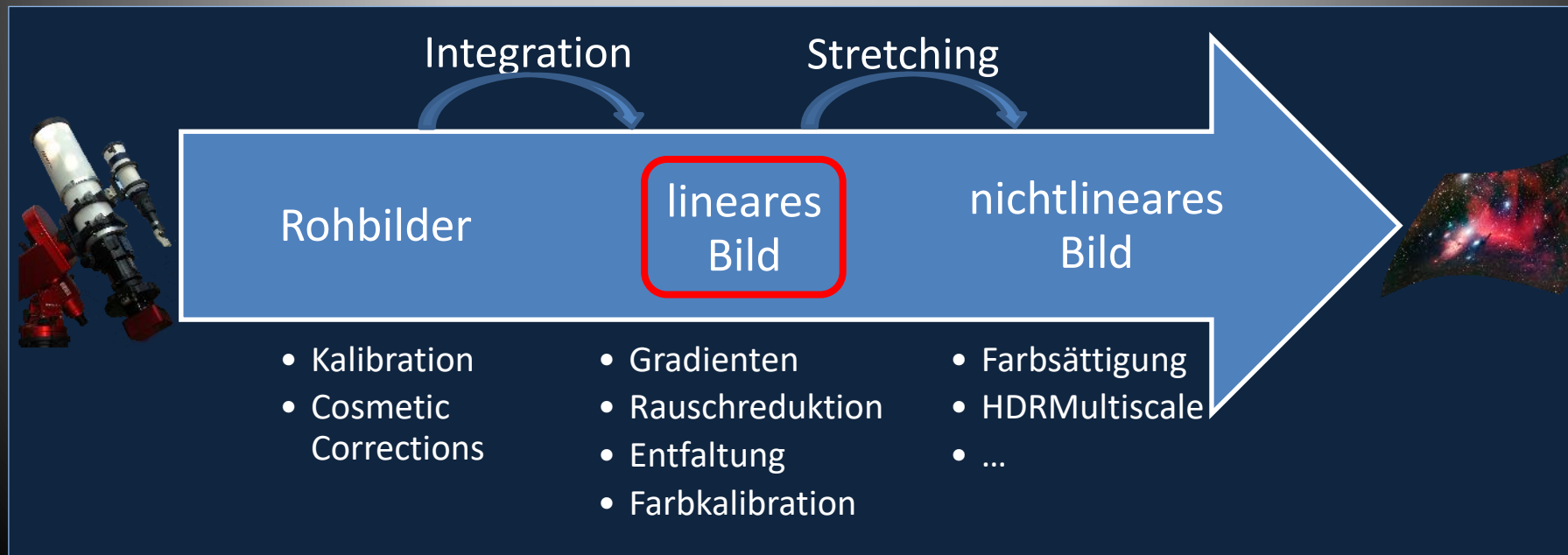
„Ringing“-Effekt beim Schärfen



Bildbearbeitung von Astroaufnahmen

Allgemeingültiger Ablauf

- Entfaltung findet im **ausschließlich** im linearen Bild statt.
- Zur Darstellung der einzelnen Bearbeitungsschritte wurden die jeweiligen Bilder möglichst vergleichbar und neutral gestreckt.



Systemtheorie

„Linear“

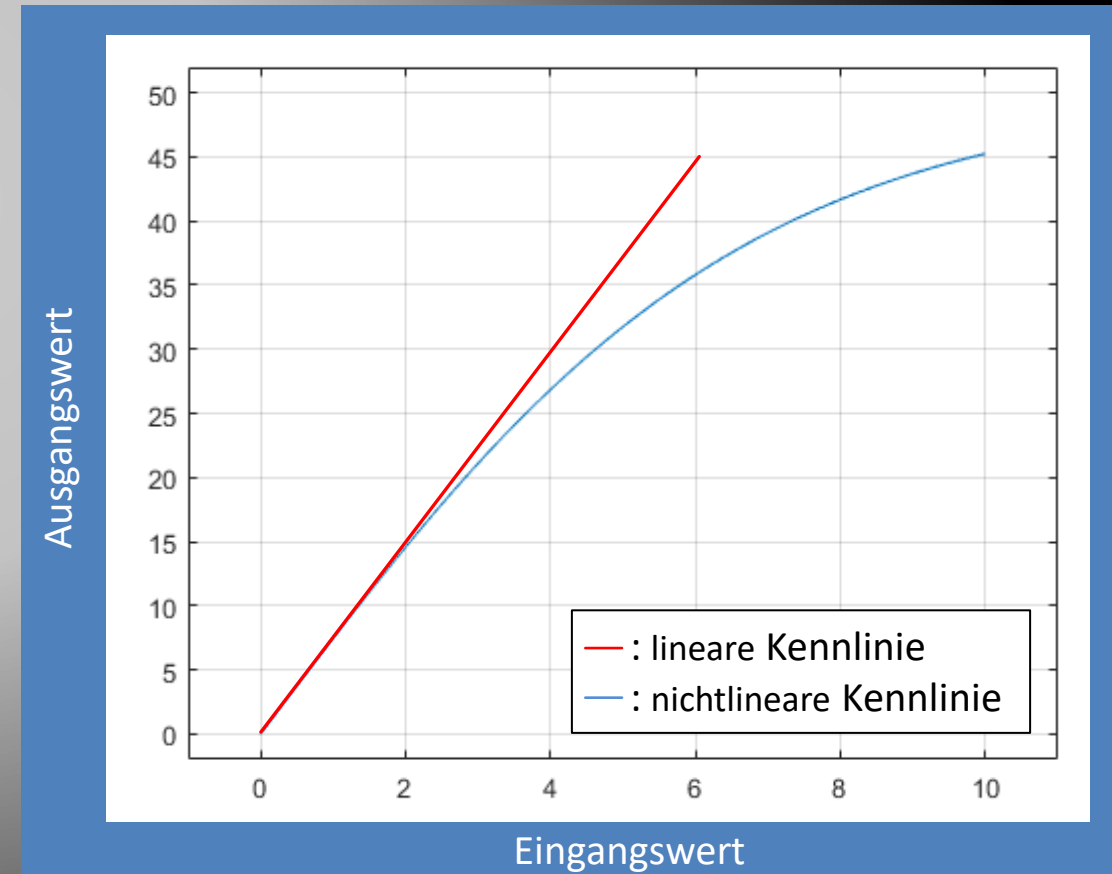
In einem linearen System sind alle auftretenden Funktionen lineare Abbildungen:

- homogen: $f(a x) = a f(x)$
- additiv: $f(x + y) = f(x) + f(y)$
- „doppelt soviel Photonen ergeben doppeltes Signal“

Bedeutung in der Astronomie:

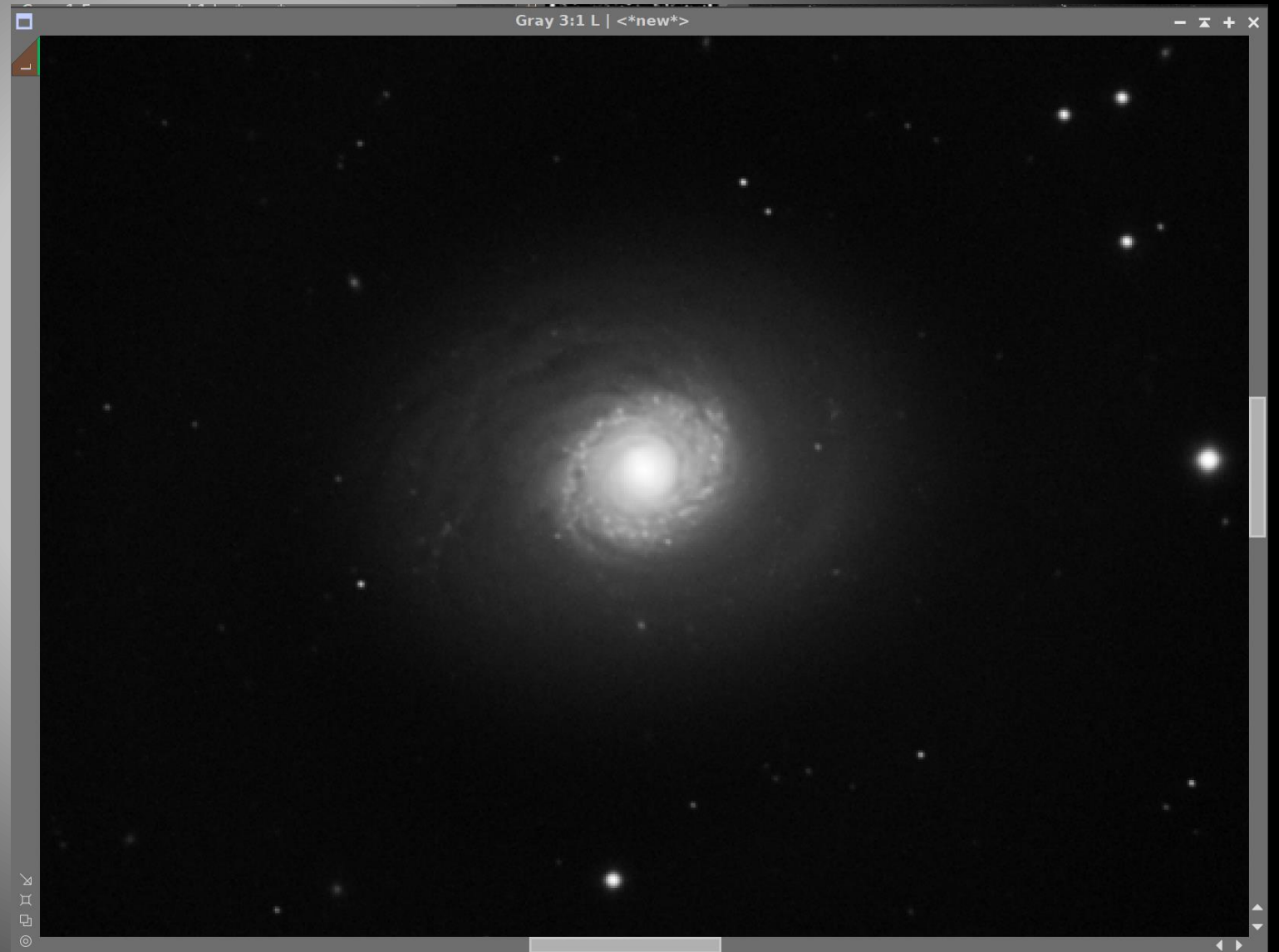
- Stacking von Einzelaufnahmen
- Astrometrie
- Farbkalibration
- Amateurlkameras in der Regel mit „anti-blooming gate“
=> Nichtlinearität!

LTI = Linear Time Invariant
(linear und keine Veränderung mit Zeit)



M94
100 mm Refraktor f/D=5.5
Atik 490EXm
Luminanz 96 x 2^m = 3^h 12^m

entfaltete Version



M94

100 mm Refraktor f/D=5.5

Atik 490EXm

Luminanz 96 x 2^m = 3^h 12^m

RGB je 60 x 2^m = 6^h 00^m



M101
100 mm Refraktor f/D=5.5
Atik 490EXm
Luminanz 123 x 2^m = 4^h 06^m

entfaltete Version



M101

100 mm Refraktor f/D=5.5

Atik 490EXm

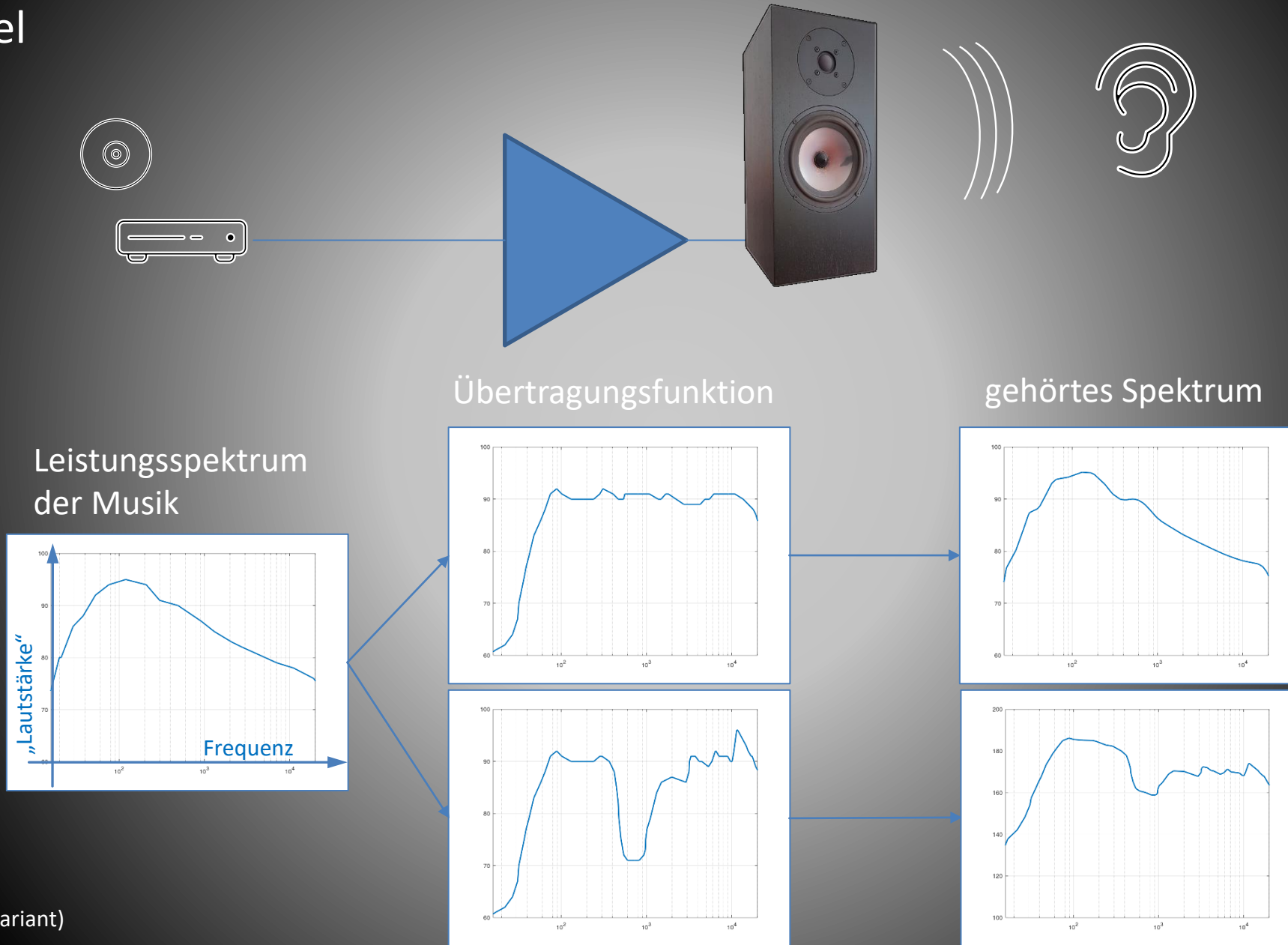
Luminanz $123 \times 2^m = 4^h 06^m$

RGB $45 \times 2^m = 4^h 30^m$



LTI Systeme

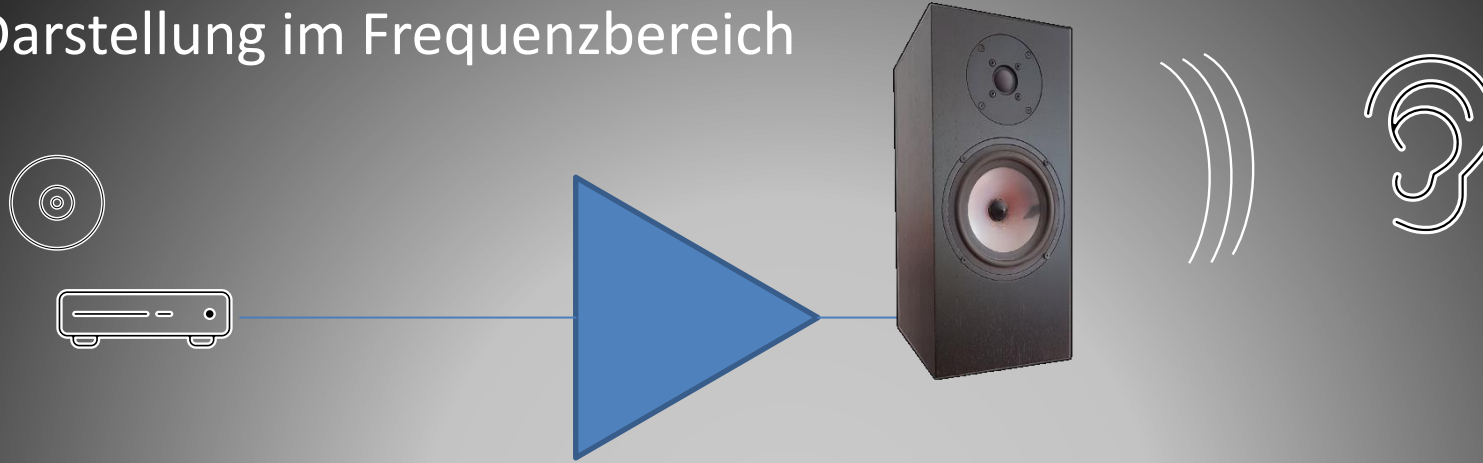
Ein Beispiel



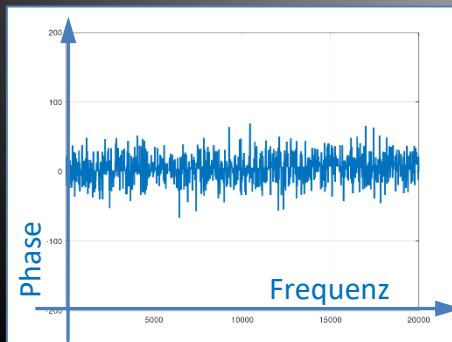
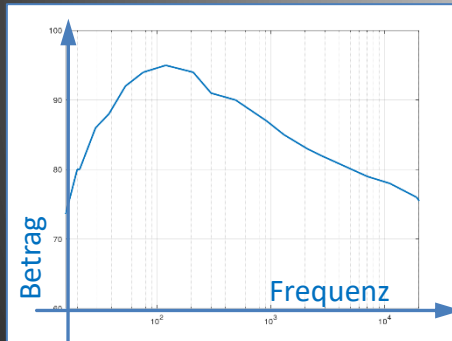
(LTI: Linear Time Invariant)

LTI Systeme

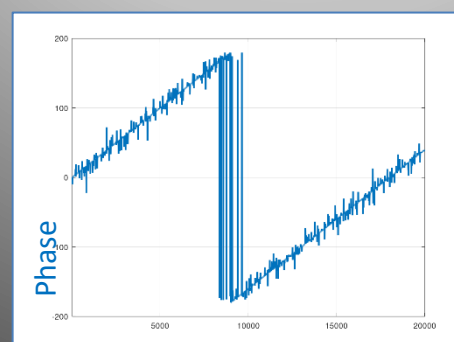
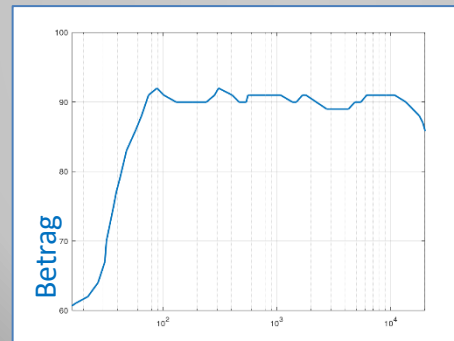
Vollständige Darstellung im Frequenzbereich



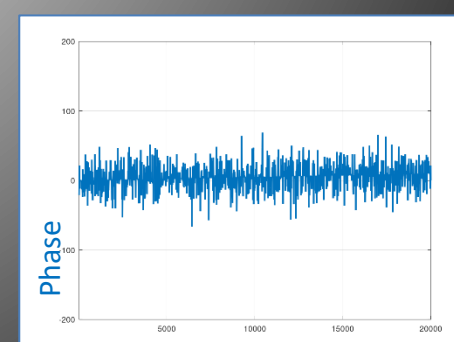
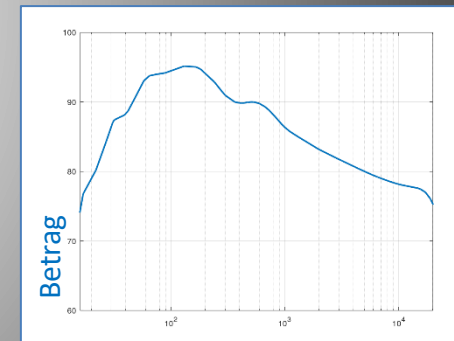
Spektrum



Übertragungsfunktion

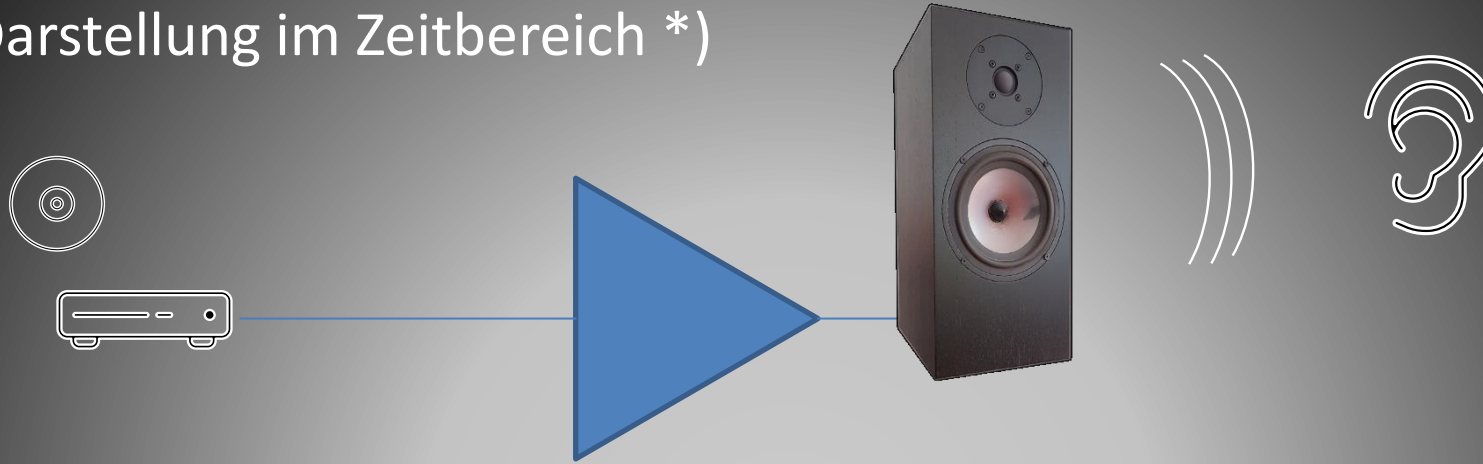


gehörtes Spektrum

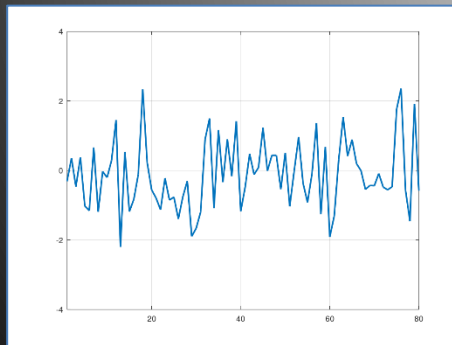


LTI Systeme

Äquivalente Darstellung im Zeitbereich *)

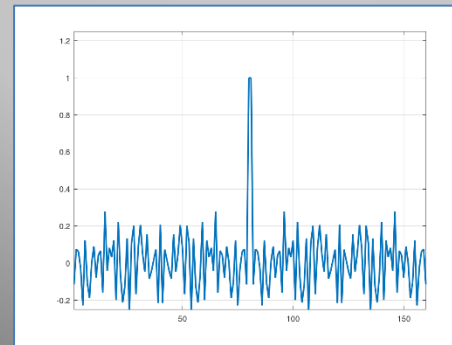


Eingangssignal



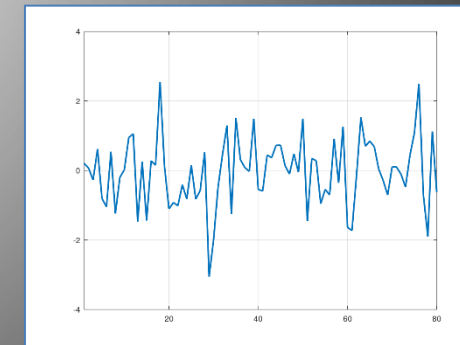
$e(t)$

Impulsantwort



$h(t)$

Ausgangssignal



$a(t) = e(t) * h(t)$

„Faltung“

*) „auf dem Oszilloskop“

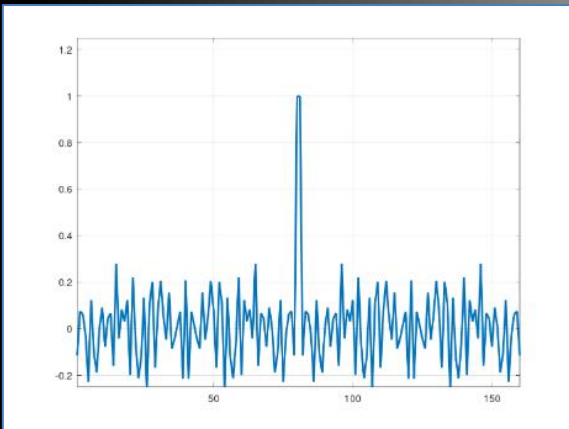
„Airy Disc“ und „Airy Pattern“

Fraunhofer Beugungsmuster der Lochblende

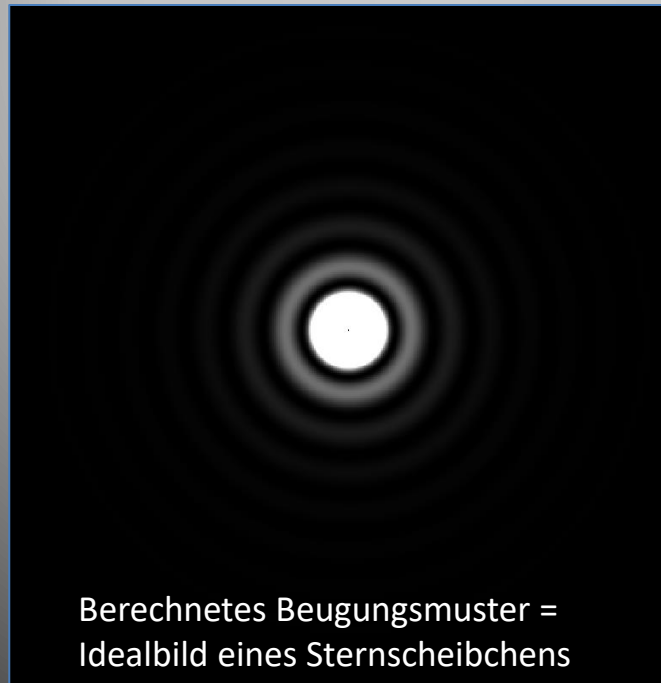
Die „Airy Disc“ ist der – lediglich durch Beugung begrenzte – am besten fokussierte Lichtpunkt, den eine perfekte runde Linse erzeugen kann.

(frei nach Wikipedia)

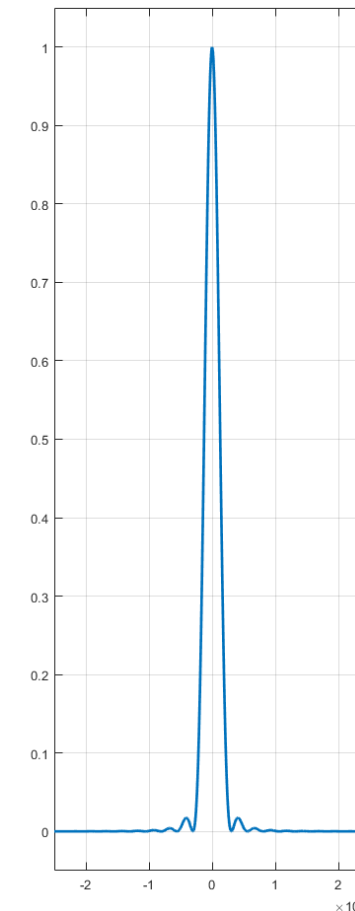
Airy, G. B. (1835). "On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture". Transactions of the Cambridge Philosophical Society. pp. 283–91.



Vergleich: Die Impulsantwort aus dem LTI-Beispiel der vorigen Folie.

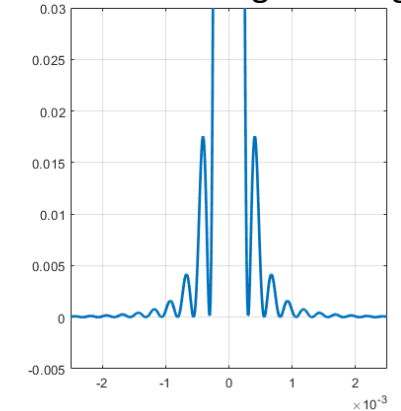


Berechnetes Beugungsmuster = Idealbild eines Sternscheibchens

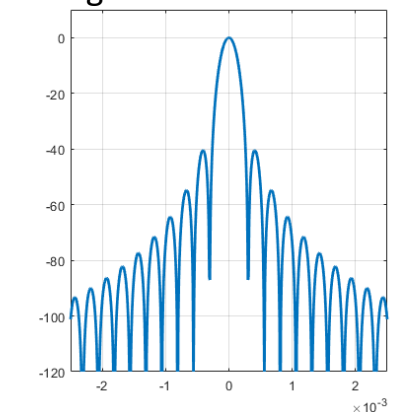


Intensität entlang der X-Achse

Ausschnittsvergrößerung



logarithmische Darst.



Faltung

Der kontinuierliche eindimensionale Fall.

Für zwei Funktionen f, g wird die Faltung von f mit g als $f * g$ notiert. Sie ist als das Integral über dem Produkt von f mit einer am Ursprung gespiegelten und verschobenen Version von g definiert:

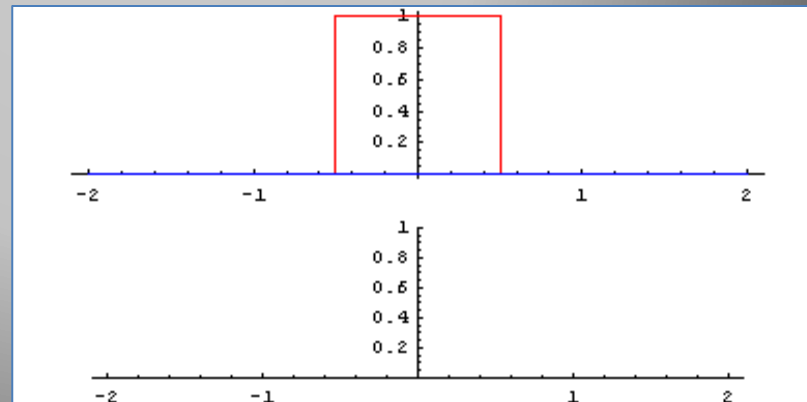
$$(f * g)(\tau) = \int f(t) g(\tau - t) dt$$

Animationsbeispiel: Faltung einer Rechteckfunktion mit sich selbst.

Rot: f

Grün: g (Kernel)

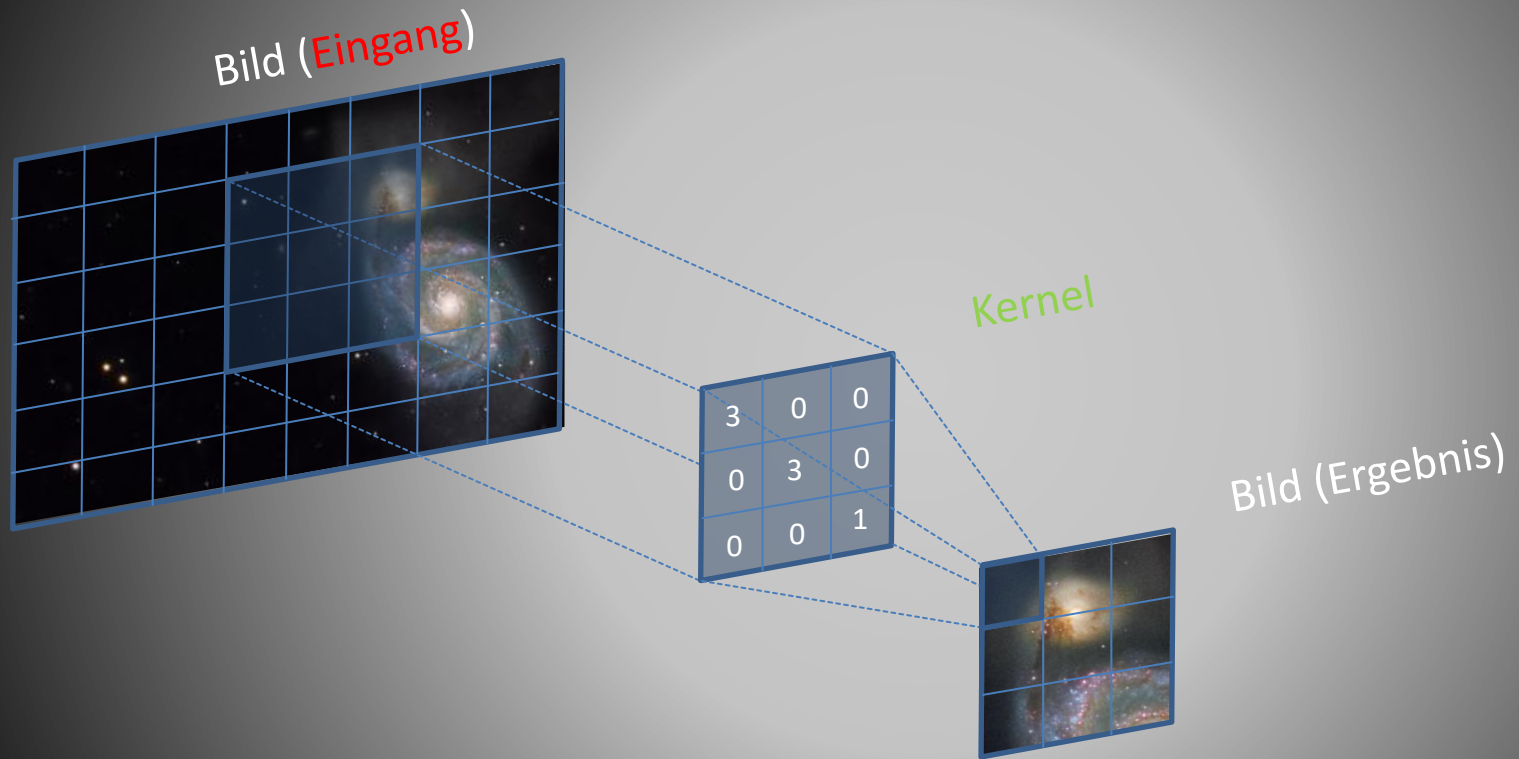
Schwarz: Ergebnis
der Faltung



deacademic.com/dic.nsf/dewiki/428474

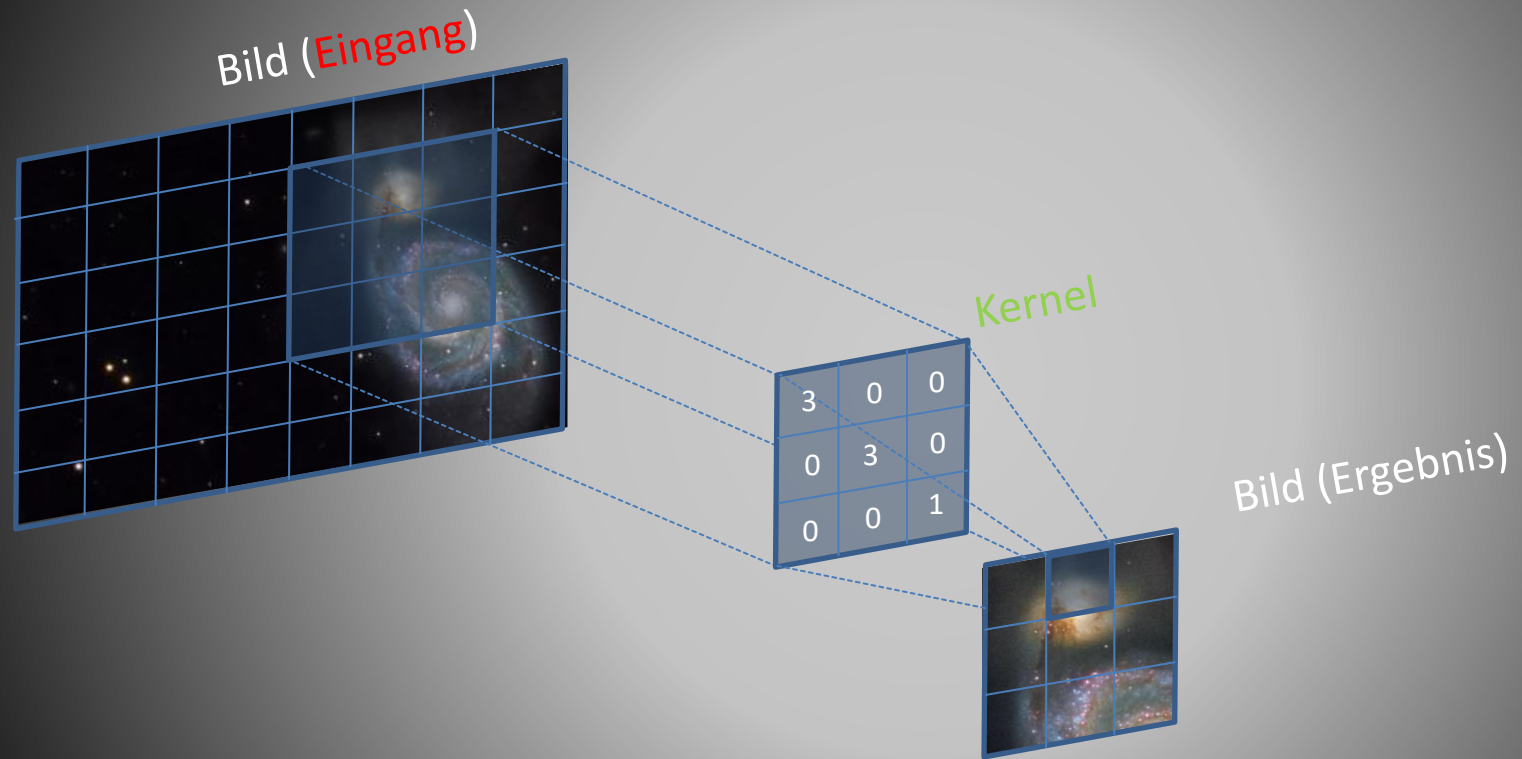
Faltung

Der diskrete zweidimensionale Fall: 1 / 3



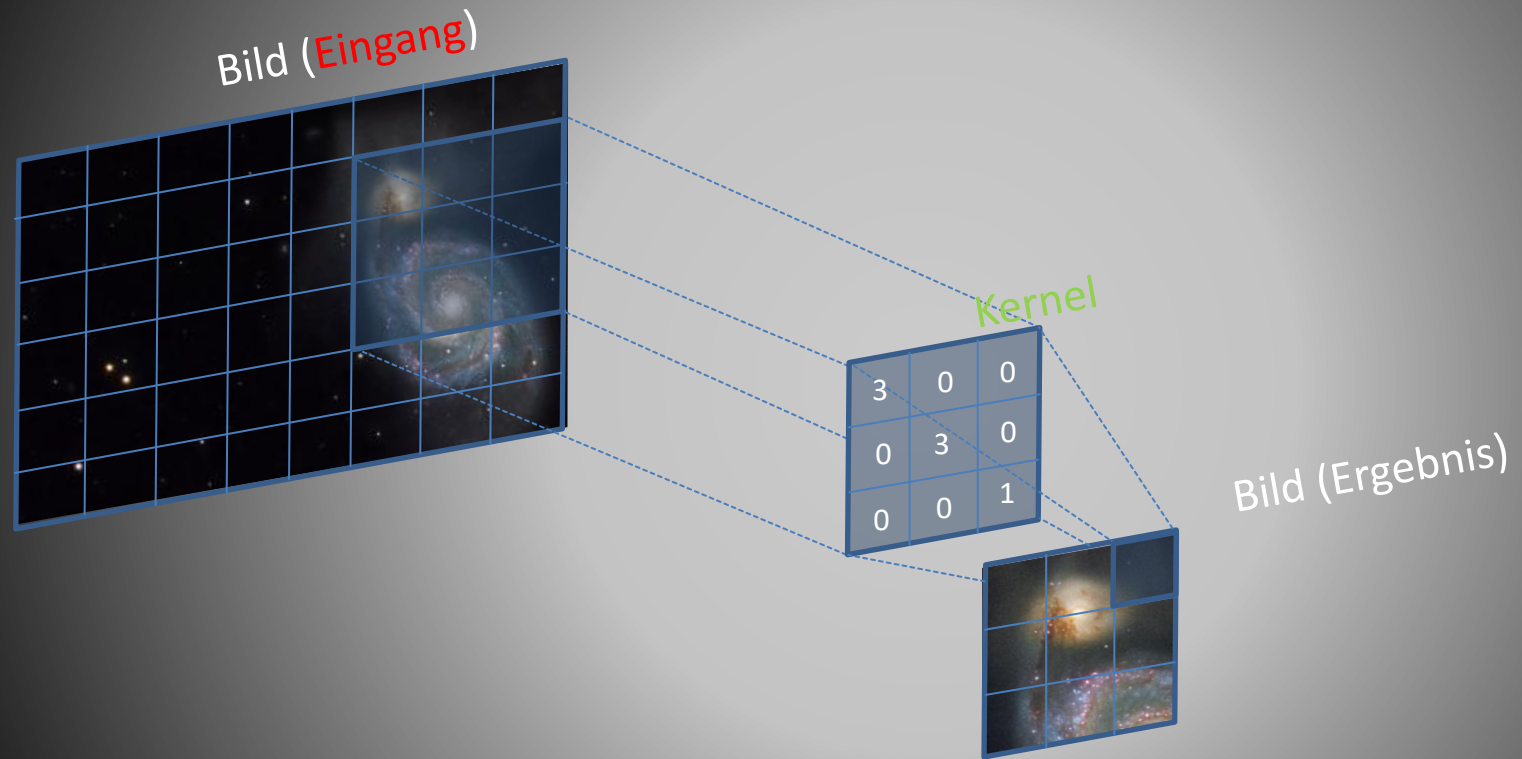
Faltung

Der diskrete zweidimensionale Fall: 2 / 3



Faltung

Der diskrete zweidimensionale Fall: 3 / 3



Observatorium Roque de los Muchachos, La Palma

GTC – Gran Telescopio Canarias

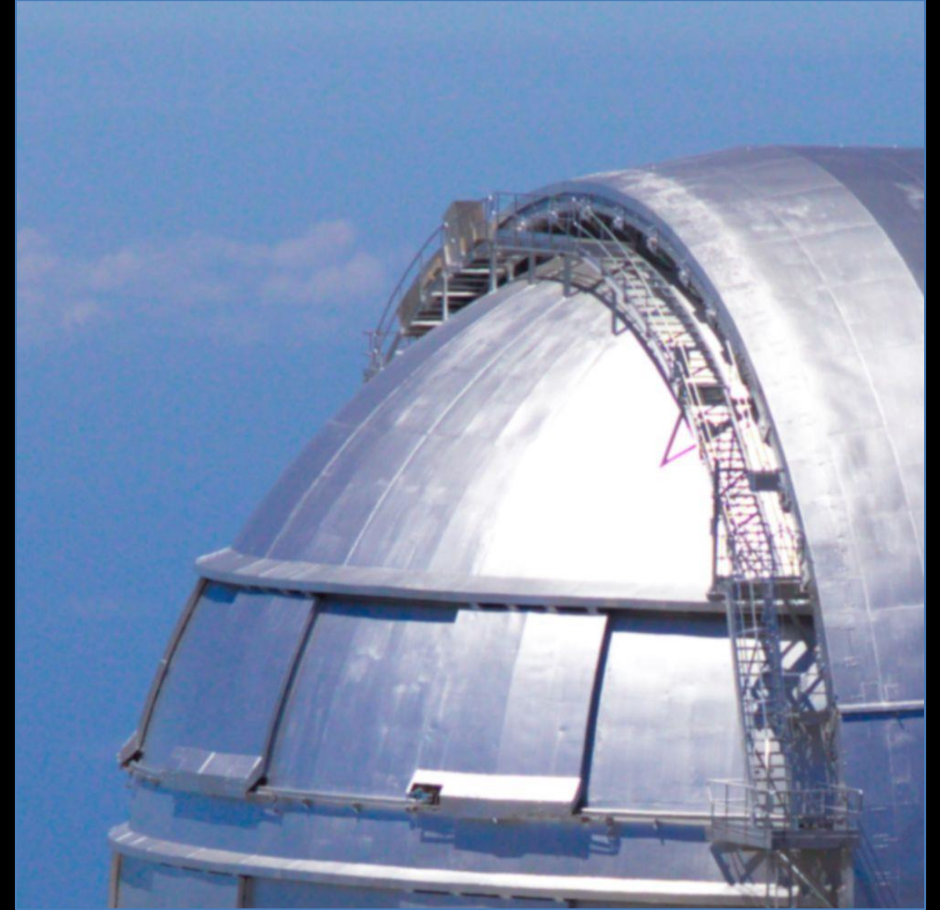
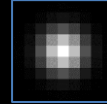


10,4 m Ritchey-Chretien System. Aktive Optik aus 36 Zerodur-Elementen.

Foto: Torsten Lietz, AVL, 2018

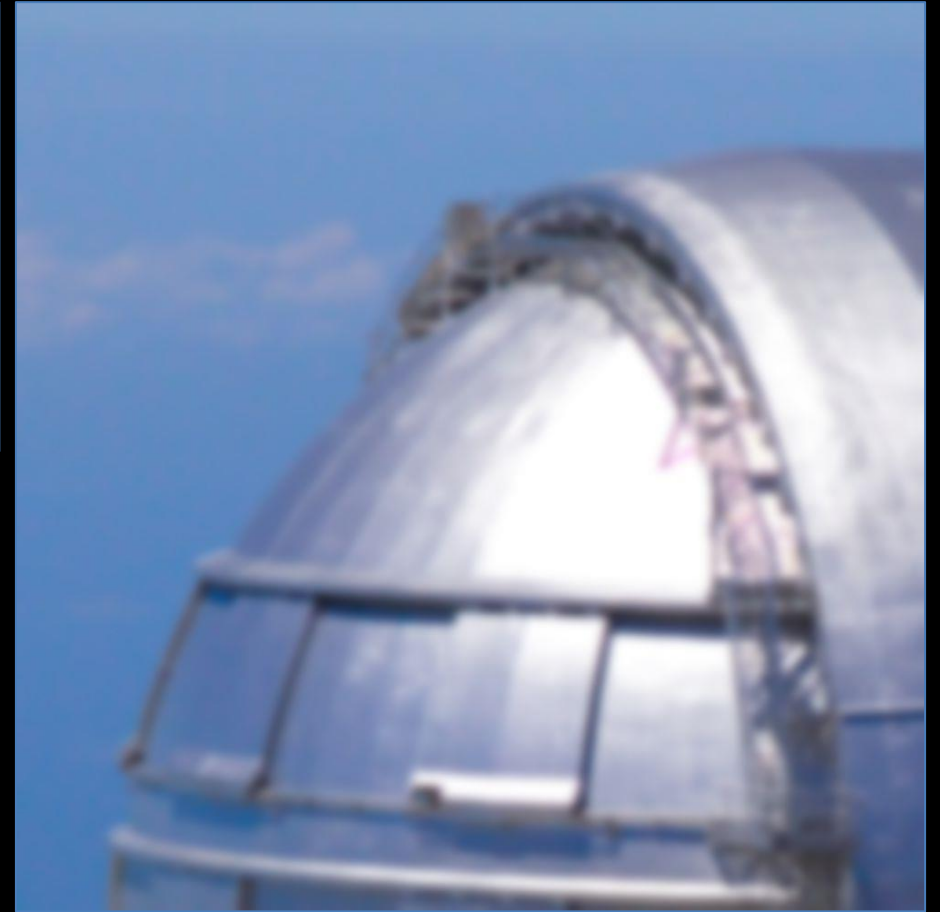
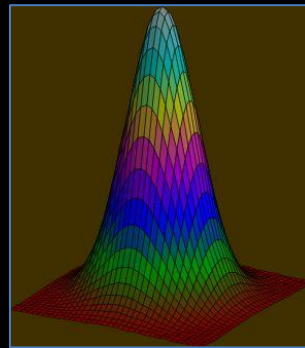
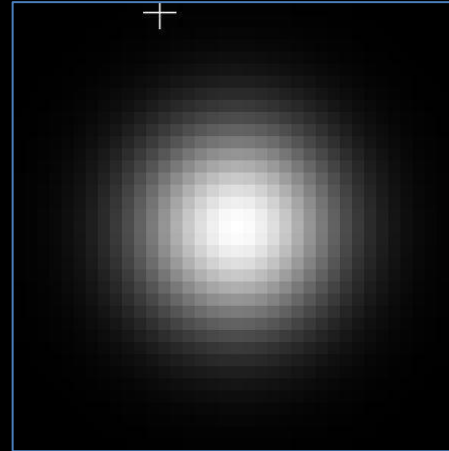
Faltung in der Praxis

Unschärfe mit kleinem „Gauss-Kernel“



Faltung in der Praxis

Mehr Unschärfe mit großem „Gauss-Kernel“

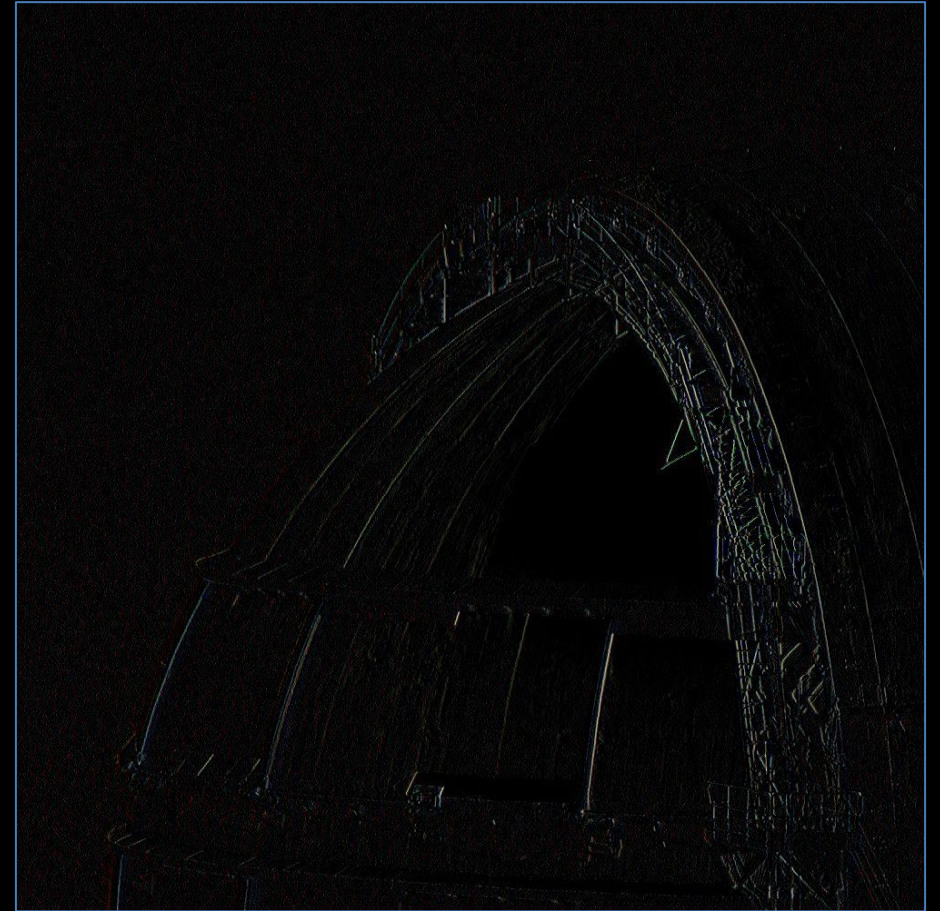


Faltung in der Praxis

Anwendung zur Detektion vertikaler Kanten



0	0	0
-1	1	0
0	0	0

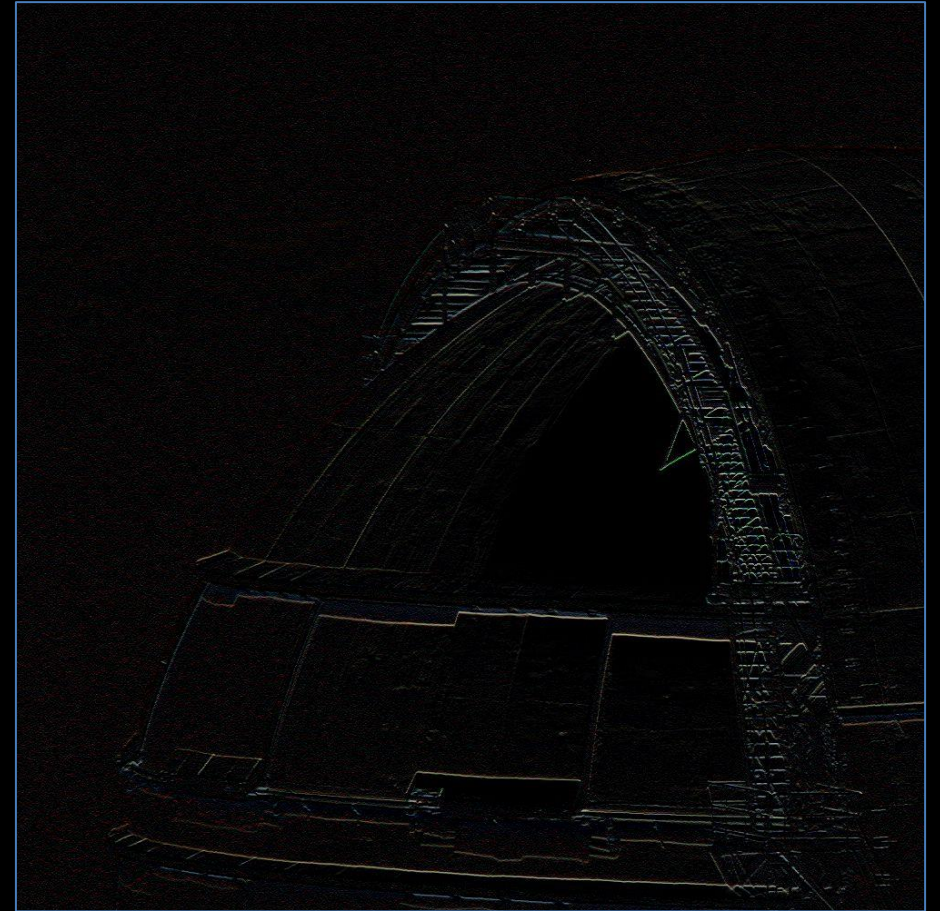


Faltung in der Praxis

Anwendung zur Detektion horizontaler Kanten



0	-1	0
0	1	0
0	0	0

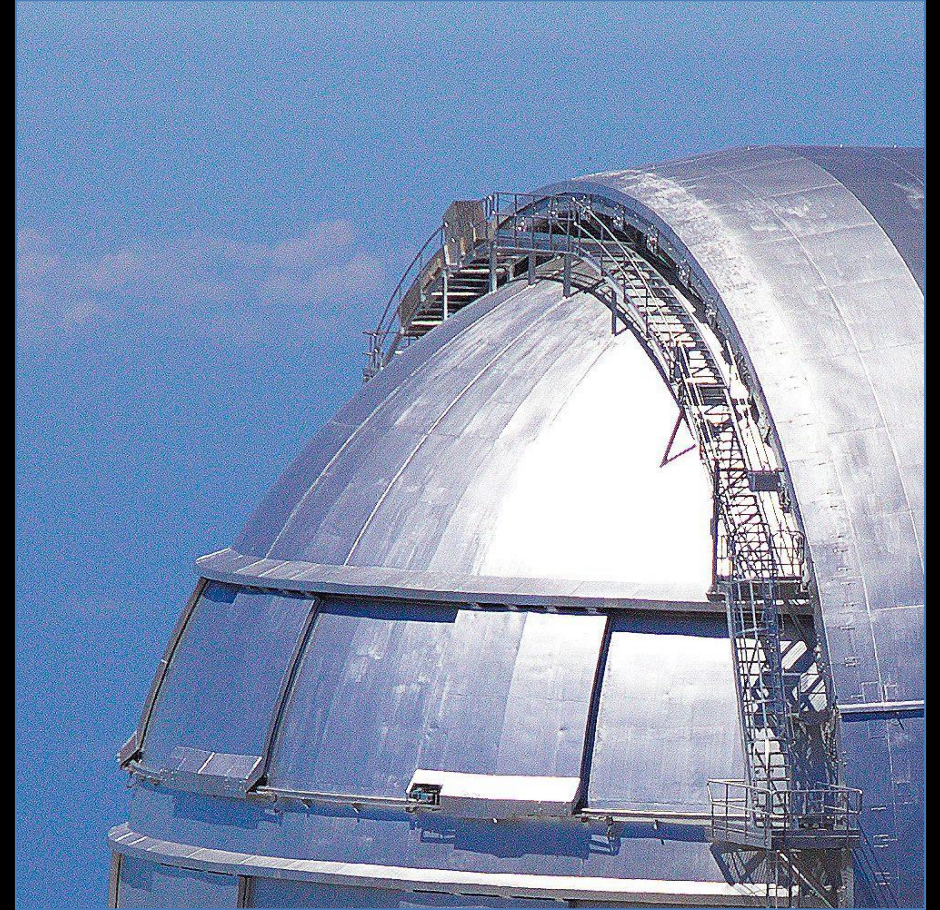


Faltung in der Praxis

Anwendung als „herkömmliche Schärfung“

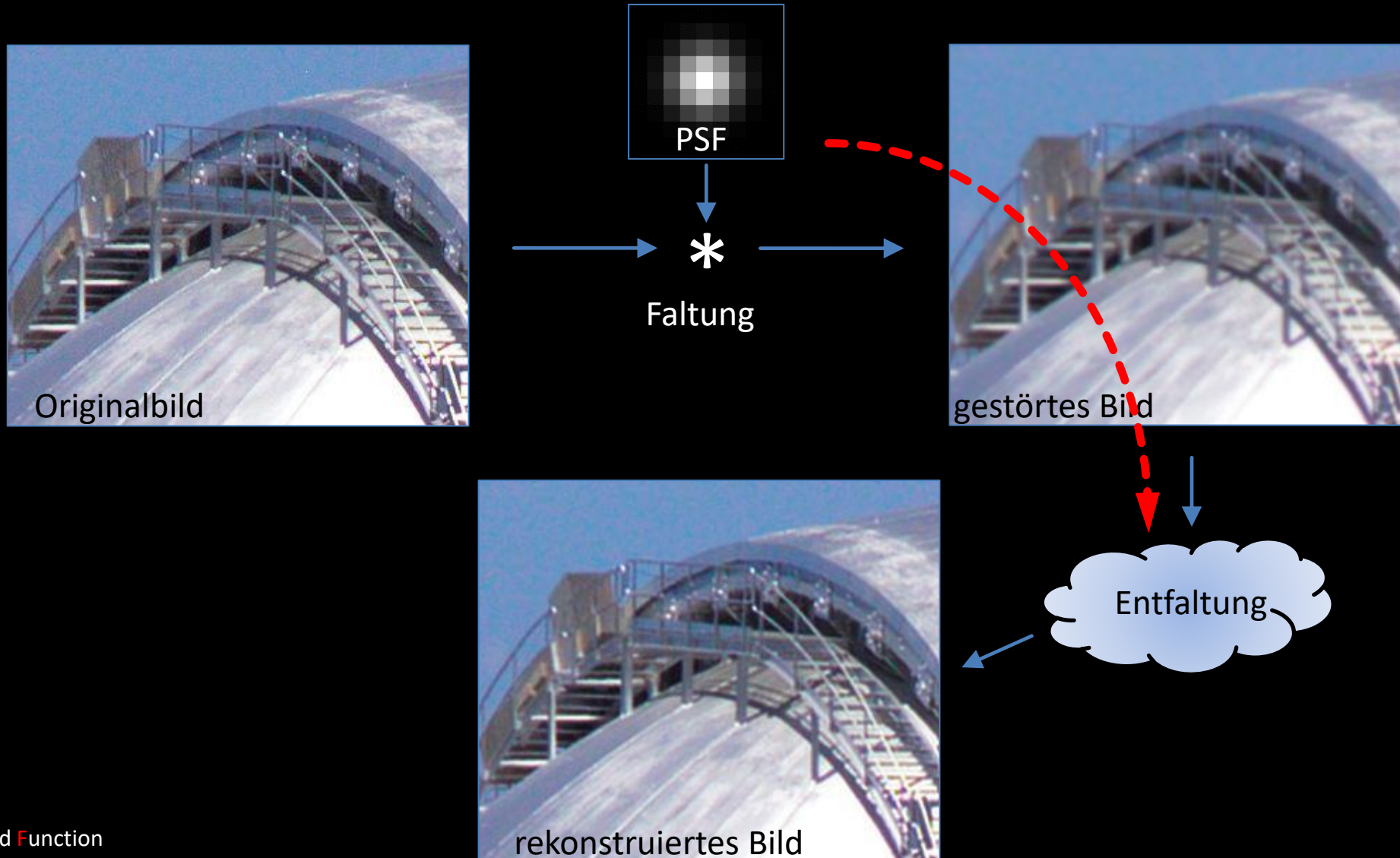


0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0



Entfaltung

Die „Umkehrung“ der Faltungsoperation



Point Spread Function

Summe aller Störungen des Lichtweges auf das Abbild des Sternes

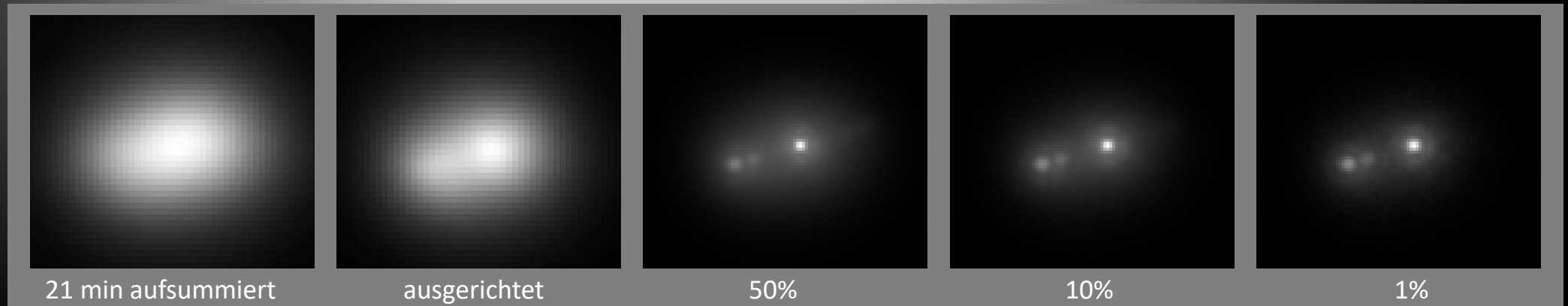
- „Punktspreizfunktion“, „Punktantwort“, „Punktverteilungsfunktion“, oder „Punktbildverwaschungsfunktion“.
- Beschreibt die Wirkung bandbegrenzender Faktoren wie z.B. Blenden, Abbildungsfehlern und Apertur.
- Bei der Astroaufnahme des Amateurs schlägt sich aber auch die zeitliche Aufsummierung des Seeings darin nieder.



Bilder unten:

2.2 m Calar Alto Teleskop, 921 nm, 50.000 Bilder bei etwa 40 Bildern pro Sekunde.

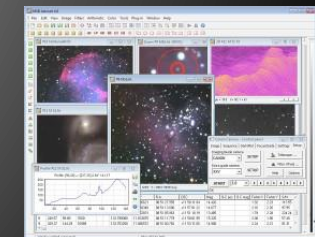
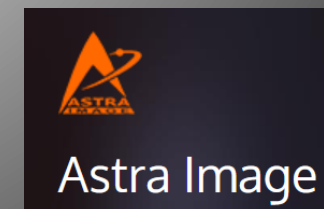
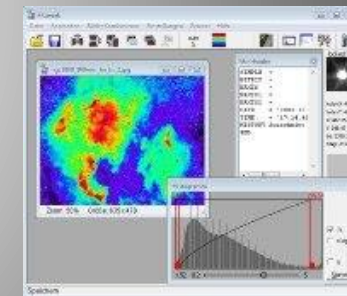
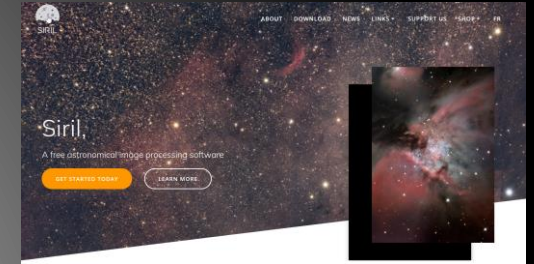
Hippler et al., The AstraLux Sur Lucky Imaging Instrument at the NTT, The ESO Messenger 137 (2009). Bibcode: 2009Msngr.137...14H



Astronomische Bildbearbeitungs-Software

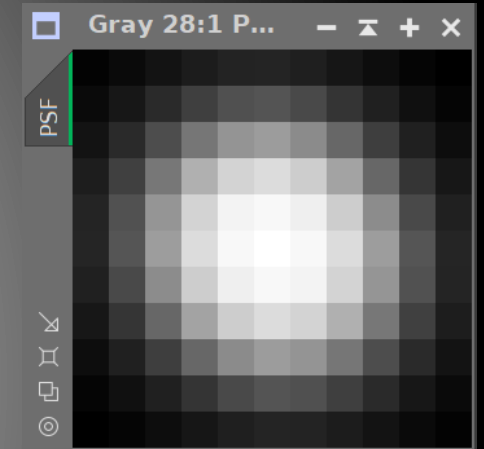
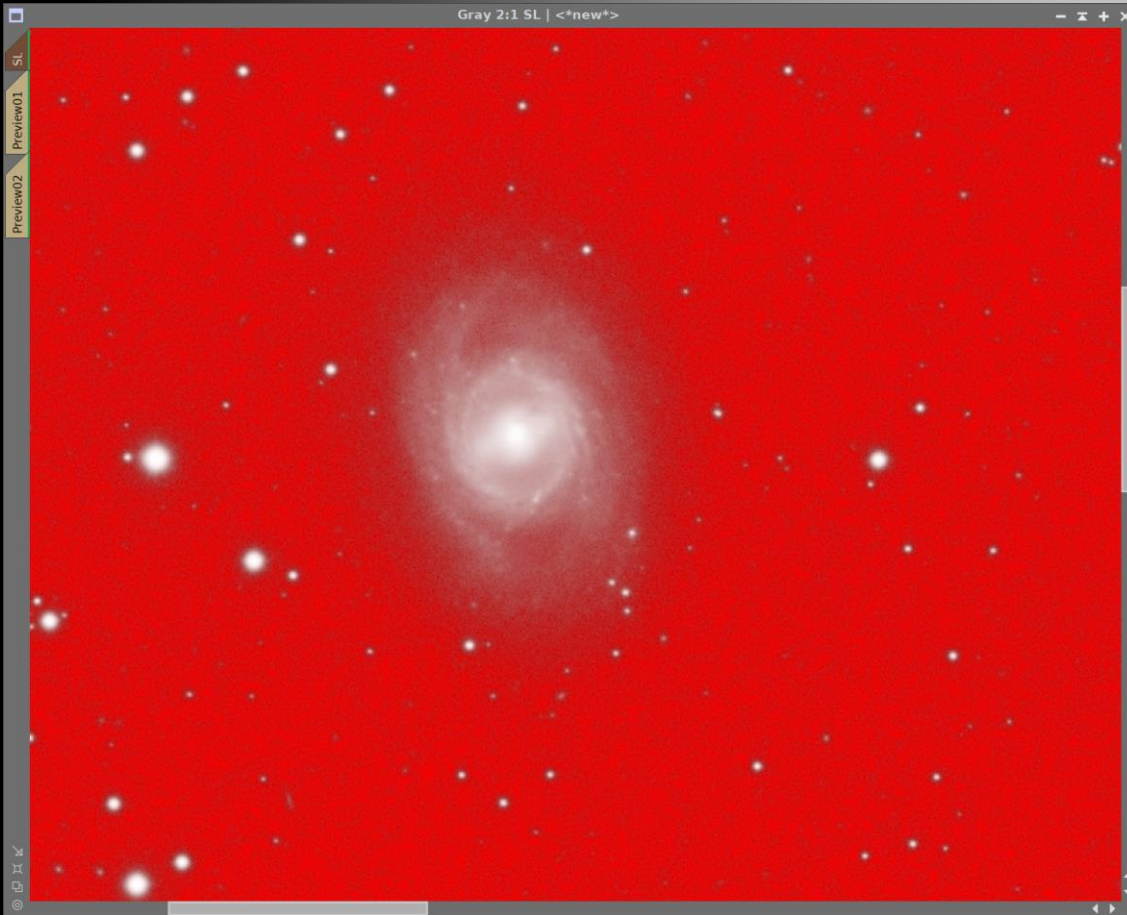
einige Produkte „mit Deconvolution“

- Iris: www.astrosurf.com/buil/iris-software.html
- Siril: free-astro.org/index.php/Siril
- StarTools: www.startools.org
- Registax: www.astronomie.be/registax
- Fitswork: www.fitswork.de/software
- Image Post Processor: greatattractor.github.io/impppg
- Dstation: github.com/blackhaz/DStation
- MaximDL: diffractionlimited.com/product/maxim-dl
- Astra Image: www.phasespace.com.au
- Astroart: www.msb-astroart.com
- Pixinsight: pixinsight.com



M95

„Superluminanz“ Rohbild



PSF über 10 Sterne
gemittelt.

Average Moffat PSF

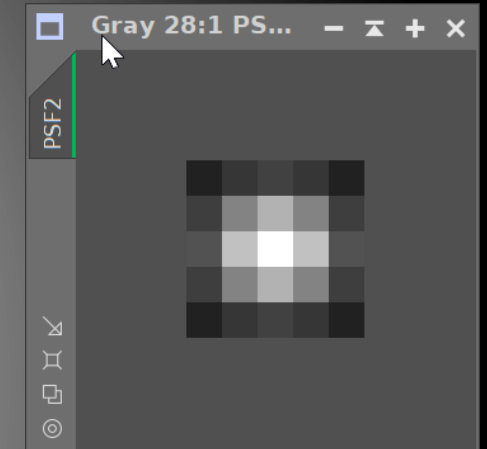
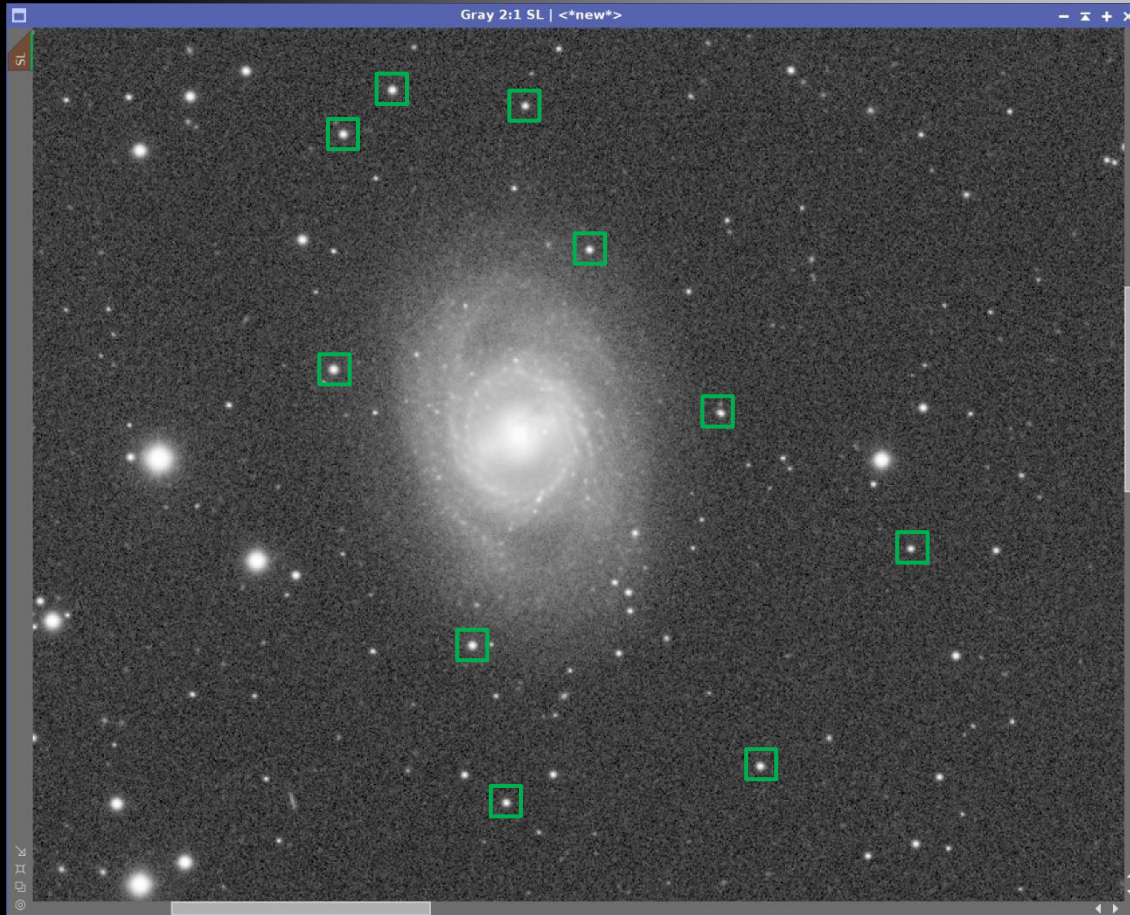
N 10 stars

FWHMx ... 2.37 px = 3.3"

FWHMy ... 2.12 px = 2.9"

M95

„Superluminanz“ Rohbild nach Entfaltung



“Neue PSF” über 10
Sterne gemittelt.

Average Moffat PSF

N 10 stars

FWHMx ... 0.82 px = 1.1"

FWHMy ... 0.75 px = 1.0"

M95 + M96

100 mm Refraktor f/D=5.5

Atik 490EXm

Luminanz 98 x 4^m = 6^h 32^m

RGB 28/32/31 x 4^m = 6^h 04^m



Entfaltung

Schluss und Zusammenfassung

- einfaches aber rechenaufwändiges numerisches Verfahren
- benötigt Schätzung der PSF
- kann LTI Faktoren erfassen und kompensieren (Abbildungsfehler, Blenden)
- kann nicht LTI Faktoren nur sehr begrenzt kompensieren (Seeing)
- ist in nahezu jeder Software für Astro-EBV integriert