

9. Vorverarbeitung und Bildverbesserung

Ziele:

- visuell aufschlussreichere Bilder
- Vereinfachung nachfolgender Signalverarbeitung und Bildauswertung

9.1.1 Kontrasterhöhung durch Histogrammspreizung

- **Ziel:** gesamten Wertebereich ausschöpfen

- WDF der quantisierten Bildwerte:

$$f_g(g) = \sum_{i=0}^{K-1} P_i \delta(g - q_i)$$

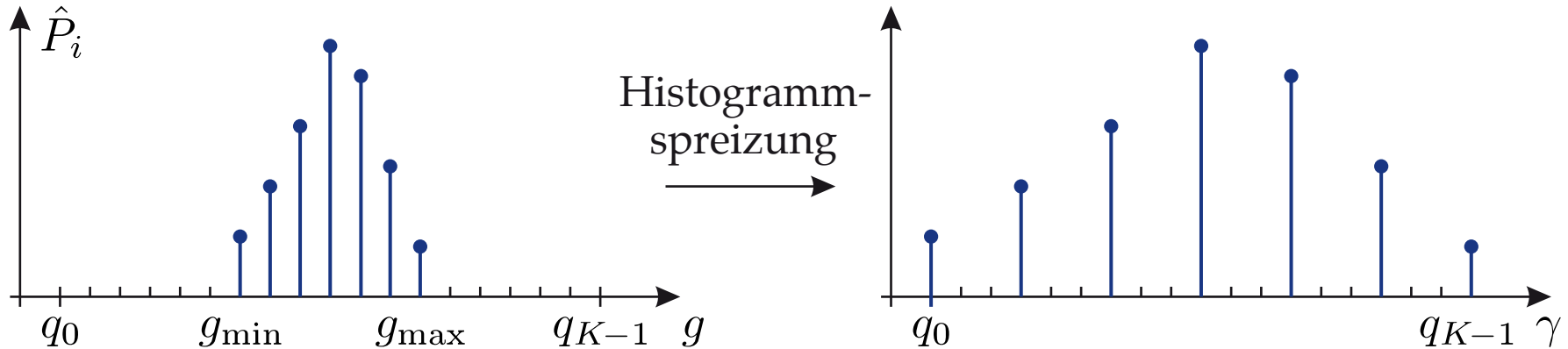
P_i : Wahrscheinlichkeiten der quantisierten Bildwerte

- Definition: **Histogramm**

$$\hat{P}_i = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \delta_{g_{mn}}^{q_i} \quad i = 0, \dots, K - 1$$

Kronecker-Delta: $\delta_a^b := \begin{cases} 1 & \text{für } a = b \\ 0 & \text{für } a \neq b \end{cases}$

$\hat{P}_i \approx P_i$ (Schätzwert für die Bildwertwahrscheinlichkeiten)



■ Grauwerttransformation:

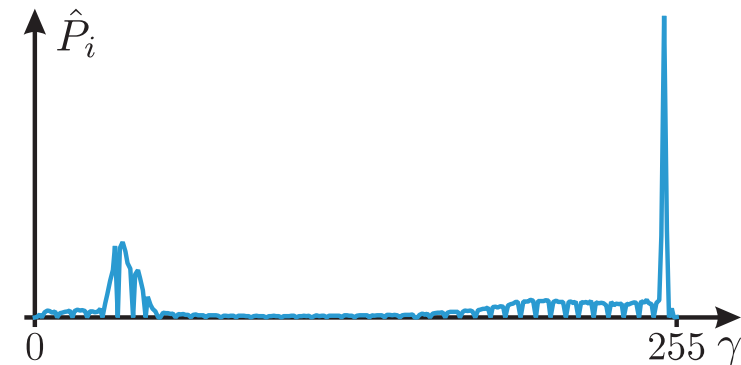
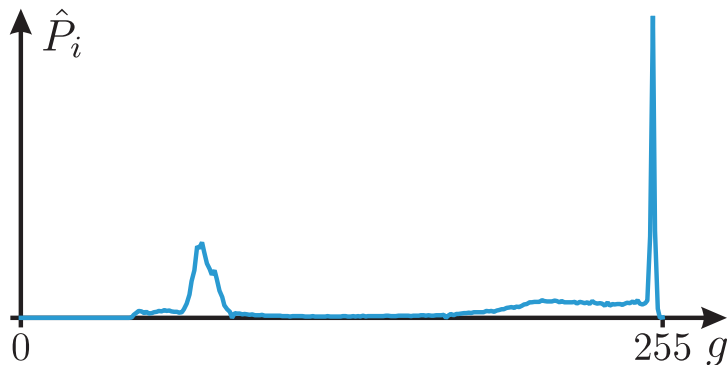
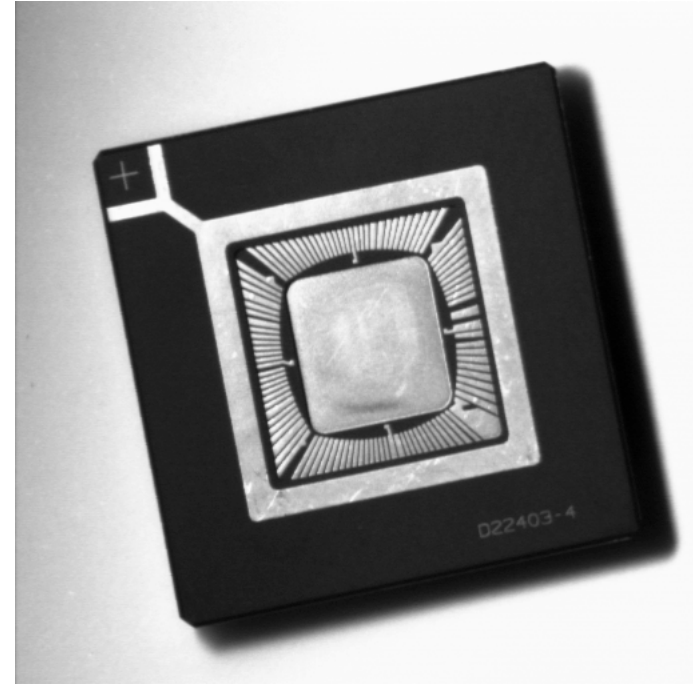
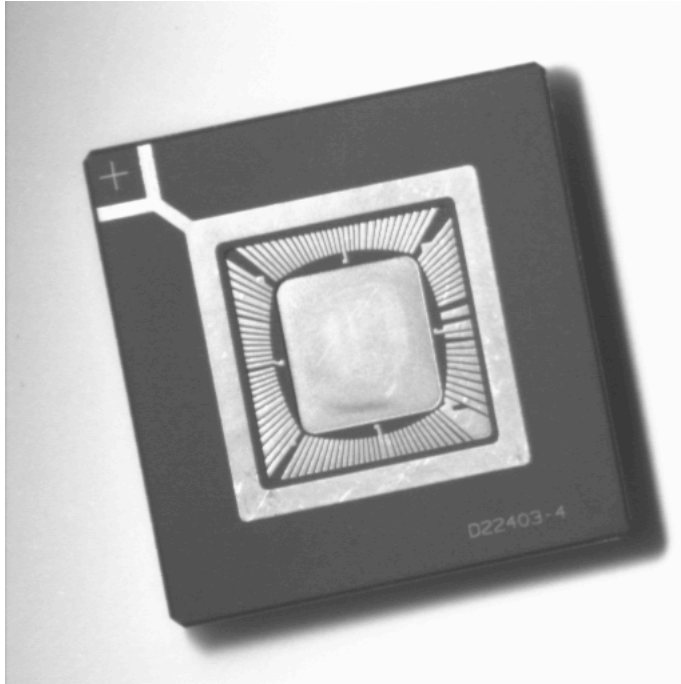
$$\gamma(g) = (g - g_{\min}) \frac{q_{K-1} - q_0}{g_{\max} - g_{\min}} + q_0$$

$$g, g_{\min}, g_{\max} \in \{q_0, \dots, q_{K-1}\}, \quad \gamma(g_{\min}) = q_0, \quad \gamma(g_{\max}) = q_{K-1}$$

■ I. Allg. gilt: $\gamma(g_i) \notin \{q_0, \dots, q_{K-1}\}$ Lösung: nächstgelegenes q_j zuweisen

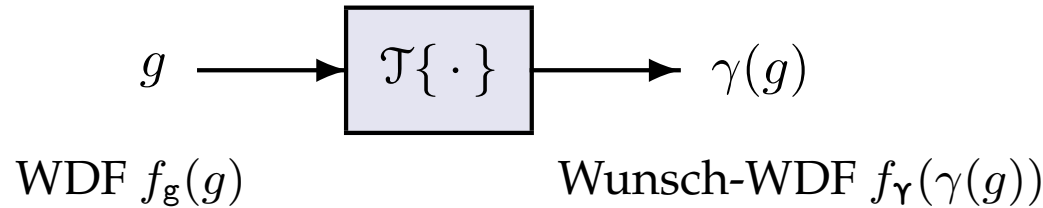
■ **Bemerkung:** Histogrammspreizung manipuliert Mittelwert und Streuung der Bildwertverteilung; **Form der WDF bleibt unverändert**

Beispiel 9.1: Histogrammspreizung



9.1.2 Histogrammanipulation

Ziel: Kontrasterhöhung durch Transformation auf „**Wunschhistogramm**“

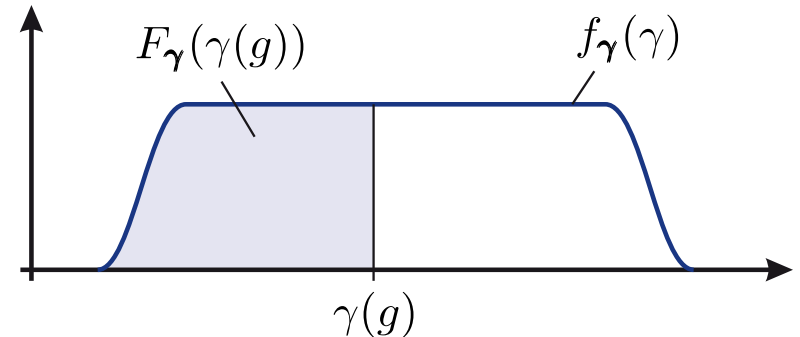
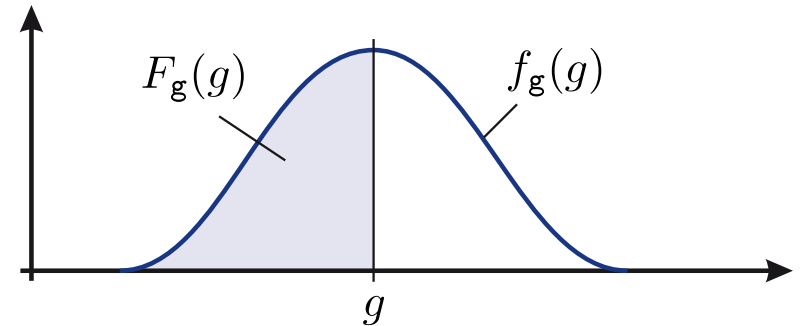


$\mathcal{T}\{\cdot\}$: gedächtnislos, verschiebungsinvariant, nichtlinear

■ Kumulative Wahrscheinlichkeiten:

$$F_g(g) = \int_{-\infty}^g f_g(\alpha) d\alpha$$

$$F_\gamma(\gamma(g)) = \int_{-\infty}^{\gamma(g)} f_\gamma(\beta) d\beta$$



9.1.2 Histogrammm Manipulation

- Zunächst kontinuierliche Betrachtung:
 - $F_\gamma(\gamma)$ sei streng monoton
 - $F_g(g)$: Wahrscheinlichkeit, dass Grauwert der Eingangsgröße $\leq g$
 - $F_\gamma(\gamma(g))$: Wahrscheinlichkeit, dass Grauwert der Ausgangsgröße $\leq \gamma(g)$

■ Es soll gelten: $F_g(g) \stackrel{!}{=} F_\gamma(\gamma(g)) \iff \gamma(g) = F_\gamma^{-1}(F_g(g))$

Strenge Monotonie von $F_\gamma(\gamma)$ erhält Ordnung der Grauwerte

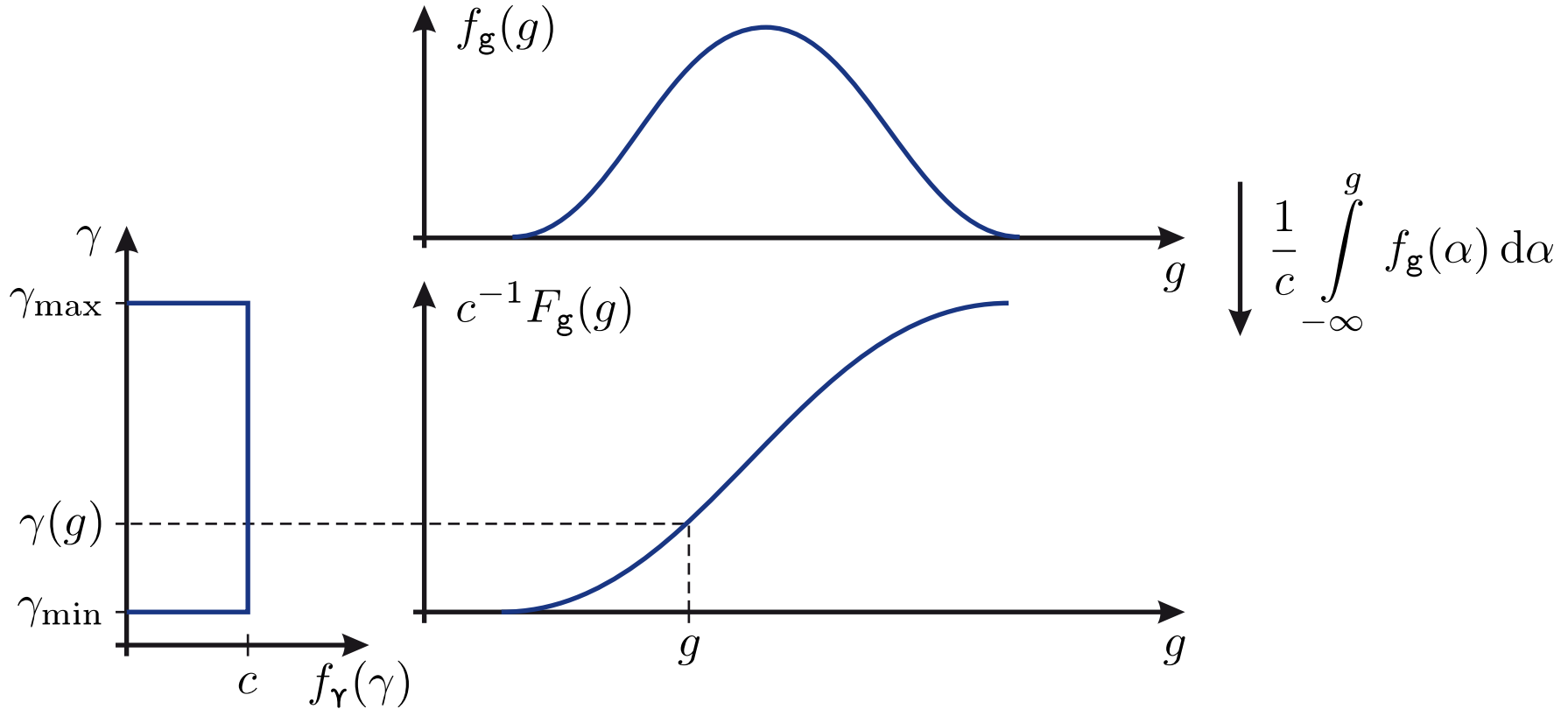
Beispiel 9.2: Histogrammegalierung

- Wunsch-WDF: $f_\gamma(\gamma) = c \cdot (\sigma(\gamma - \gamma_{\min}) - \sigma(\gamma - \gamma_{\max}))$

$$F_\gamma(\gamma(g)) = \int_{-\infty}^{\gamma(g)} f_\gamma(\beta) d\beta = c \cdot (\gamma(g) - \gamma_{\min}) \stackrel{!}{=} F_g(g) \quad \text{für } \gamma \in [\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$$

$$\Rightarrow \gamma(g) = c^{-1} \cdot F_g(g) + \gamma_{\min}$$

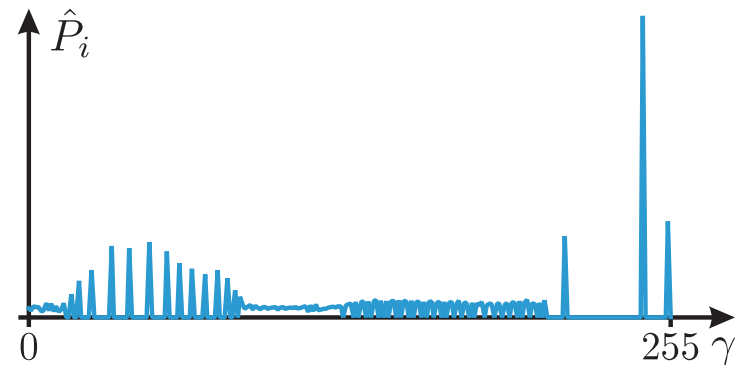
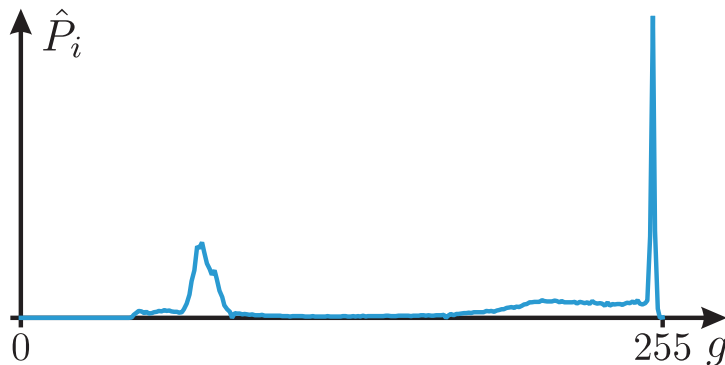
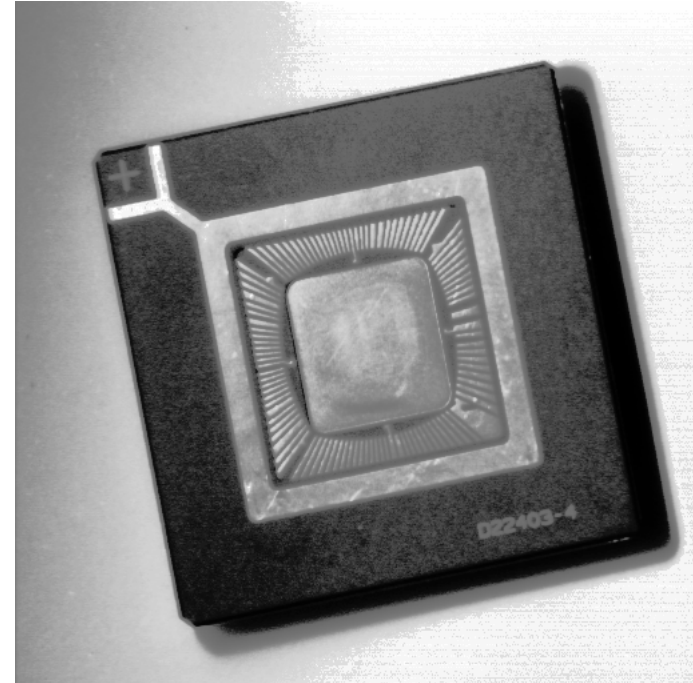
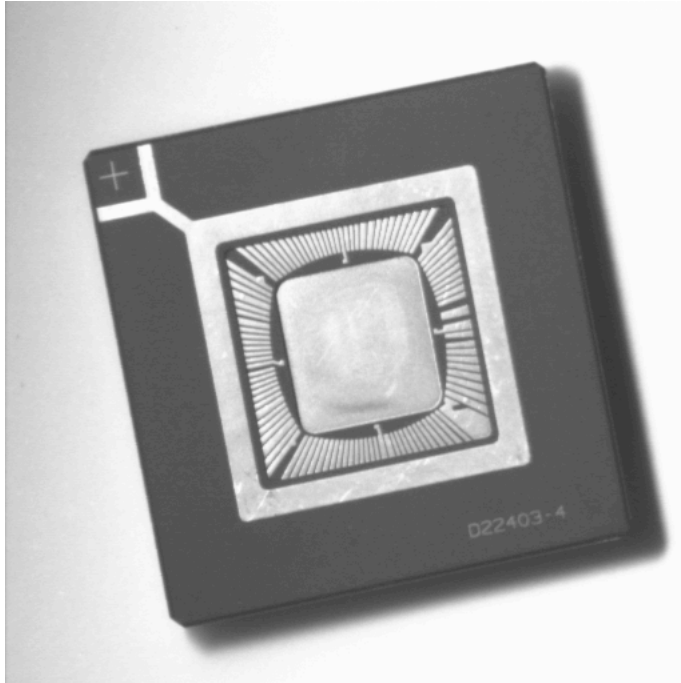
9.1.2 Histogrammanipulation



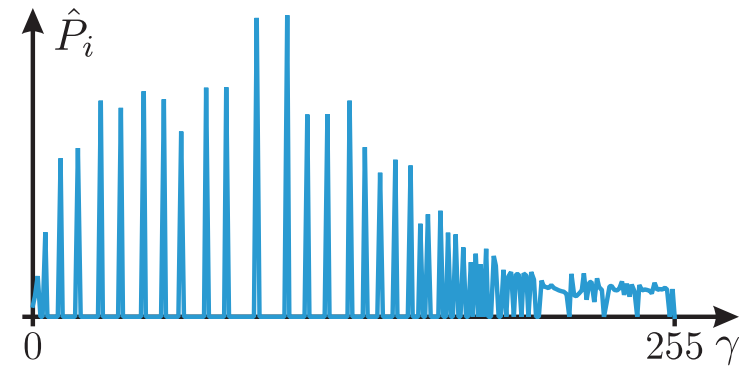
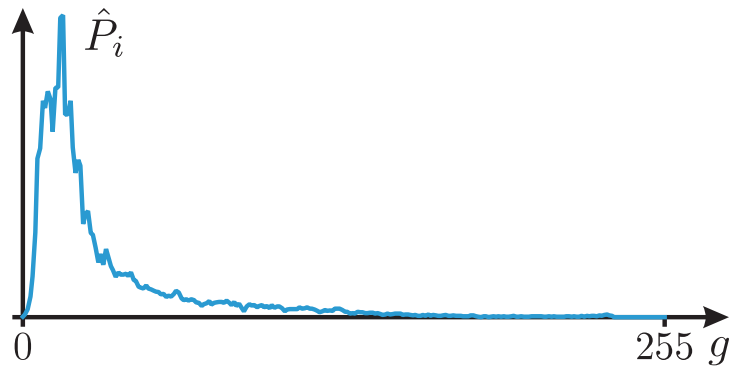
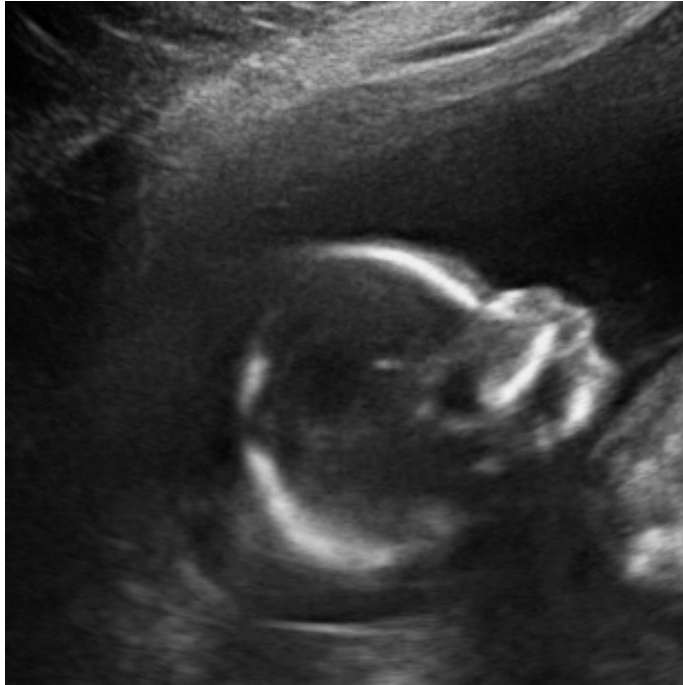
- I. Allg. $F_\gamma^{-1}(\cdot)$ nicht explizit berechenbar
- Rechentauglicher Ansatz:

$$\gamma(g) = q_i, \text{ sodass } |F_\gamma(q_i) - \hat{F}_g(g)| \rightarrow \min$$

Beispiel 9.2: Histogrammegalisierung



9.1.2 Histogrammanipulation



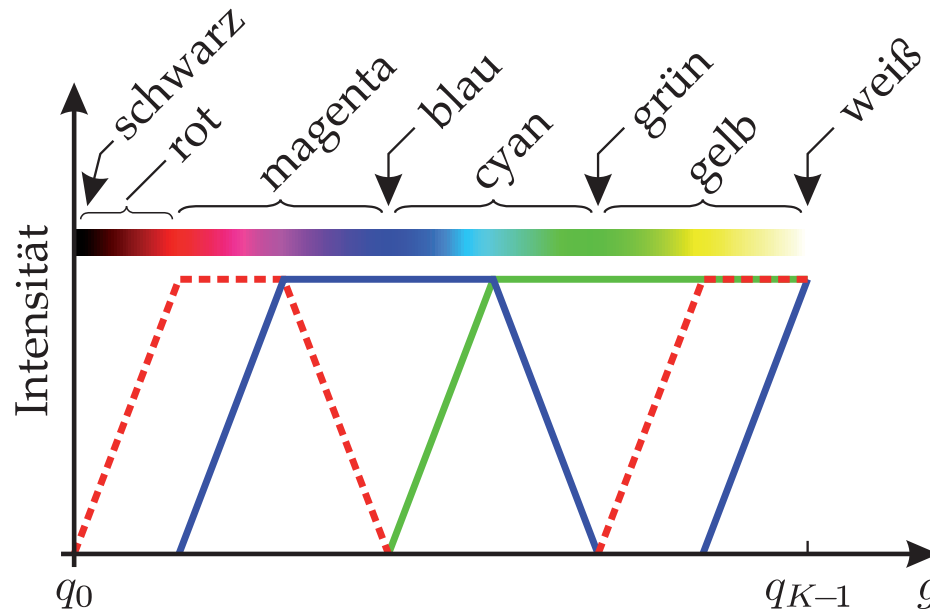
9.1.3 Pseudo- und Falschfarbendarstellung

Ziel: visuell aufschlussreichere Bilder

■ **Pseudofarben:** skalares Bild $g \mapsto \begin{pmatrix} \text{Rot}(g) \\ \text{Grün}(g) \\ \text{Blau}(g) \end{pmatrix}$

gedächtnislos,
ortsinvariant,
nichtlinear

Beispiel:



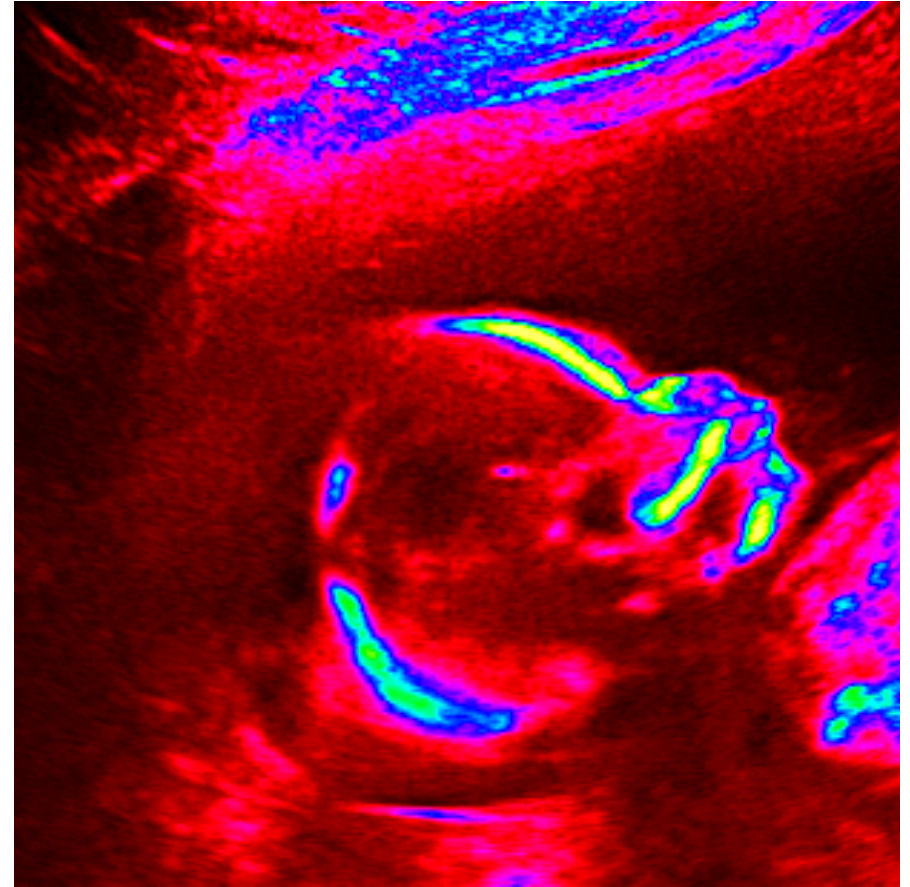
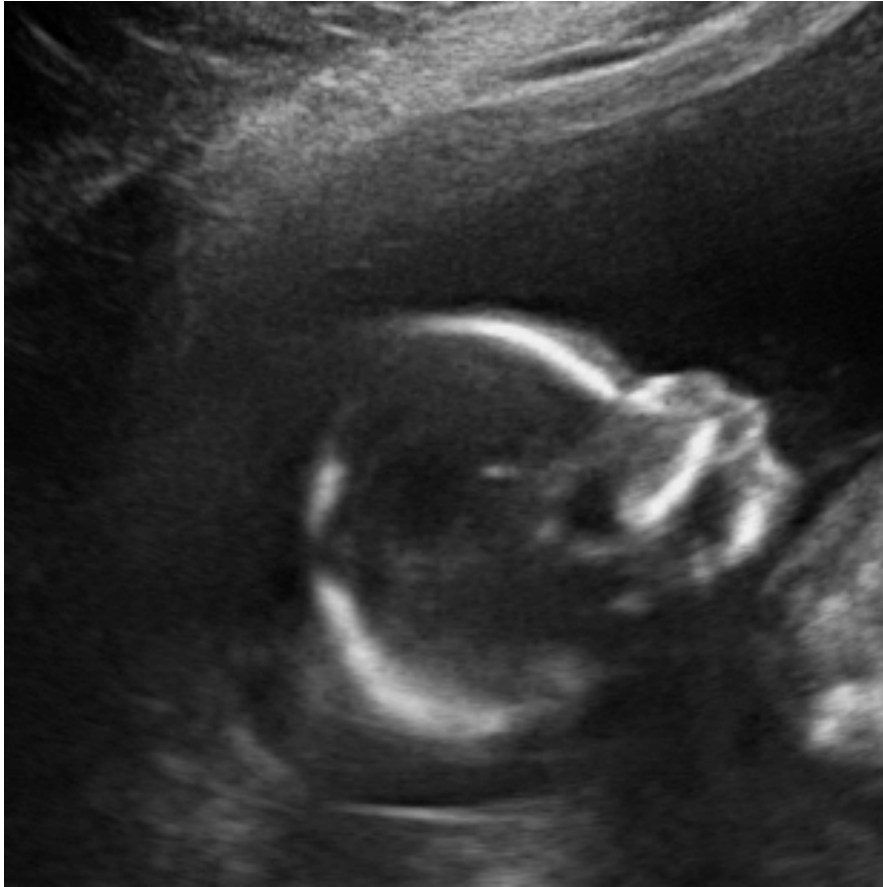
← additive
Farbmischung

menschliches Auge
kann wesentlich
mehr Farbwerte als
Grauwerte auflösen

■ **Falschfarbendarstellung:**
Multikanalbild $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^Q \mapsto \begin{pmatrix} \text{Rot}(g) \\ \text{Grün}(g) \\ \text{Blau}(g) \end{pmatrix}$
(z. B. multispektral)

gedächtnislos,
ortsinvariant,
nichtlinear

Beispiel 9.3: Pseudofarbendarstellung



Beispiel 9.4: Änderungsdetektion

$g_1(\mathbf{x})$



$g_2(\mathbf{x})$



- Hervorhebung von Änderungen durch **Falschfarbendbild**:

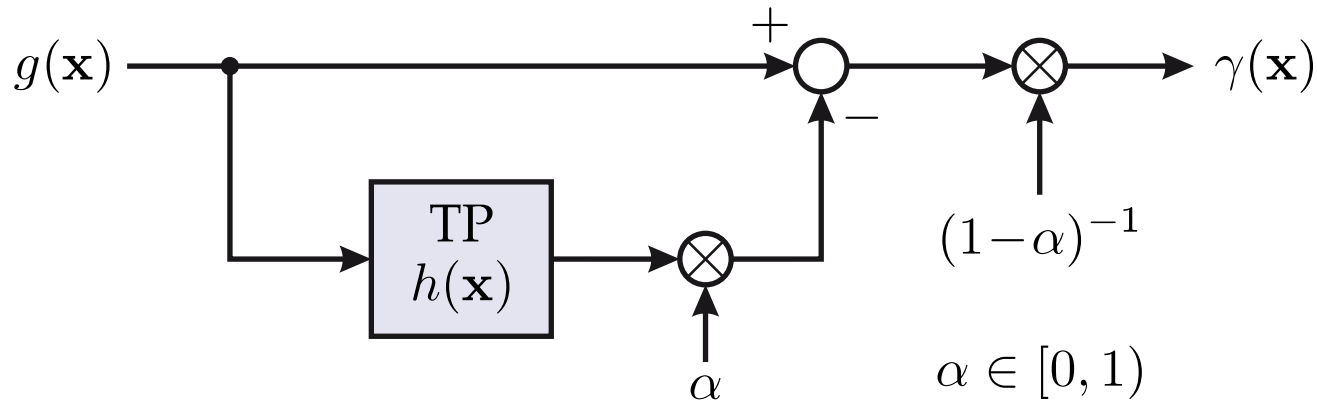
$$\gamma(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} g_2(\mathbf{x}) \\ g_1(\mathbf{x}) \\ g_1(\mathbf{x}) \end{pmatrix} =: \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$



9.1.4 Bildverschärfung

- Scharfe Kanten korrespondieren mit hohen Ortsfrequenzen
- Verstärkung höherer Frequenzen → Verbesserung des visuellen Schärfeeindrucks – aber auch Verstärkung hochfrequenter Störungen!
- Forderung: mittlerer Grauwert soll unverändert bleiben

Beispiel 9.5: Bildverschärfung



$$h(\mathbf{x}) \quad \circ \bullet \quad H(\mathbf{f})$$

$$H(\mathbf{0}) = 1, \quad H(\mathbf{f}) \xrightarrow{\|\mathbf{f}\| \rightarrow \infty} 0$$

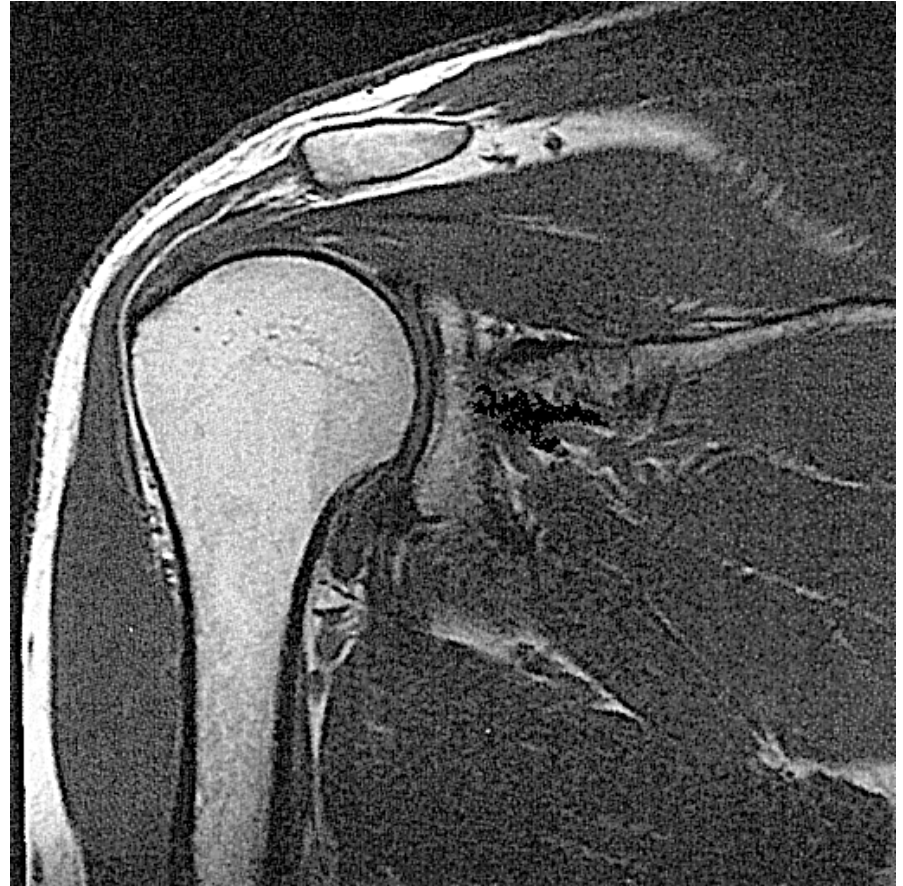
$$V(\mathbf{f}) := \frac{\Gamma(\mathbf{f})}{G(\mathbf{f})} = \frac{1 - \alpha H(\mathbf{f})}{1 - \alpha}$$

$$V(\mathbf{0}) = 1, \quad V(\mathbf{f}) \xrightarrow{\|\mathbf{f}\| \rightarrow \infty} \frac{1}{1 - \alpha} > 1$$

MRT-Bild einer menschlichen Schulter



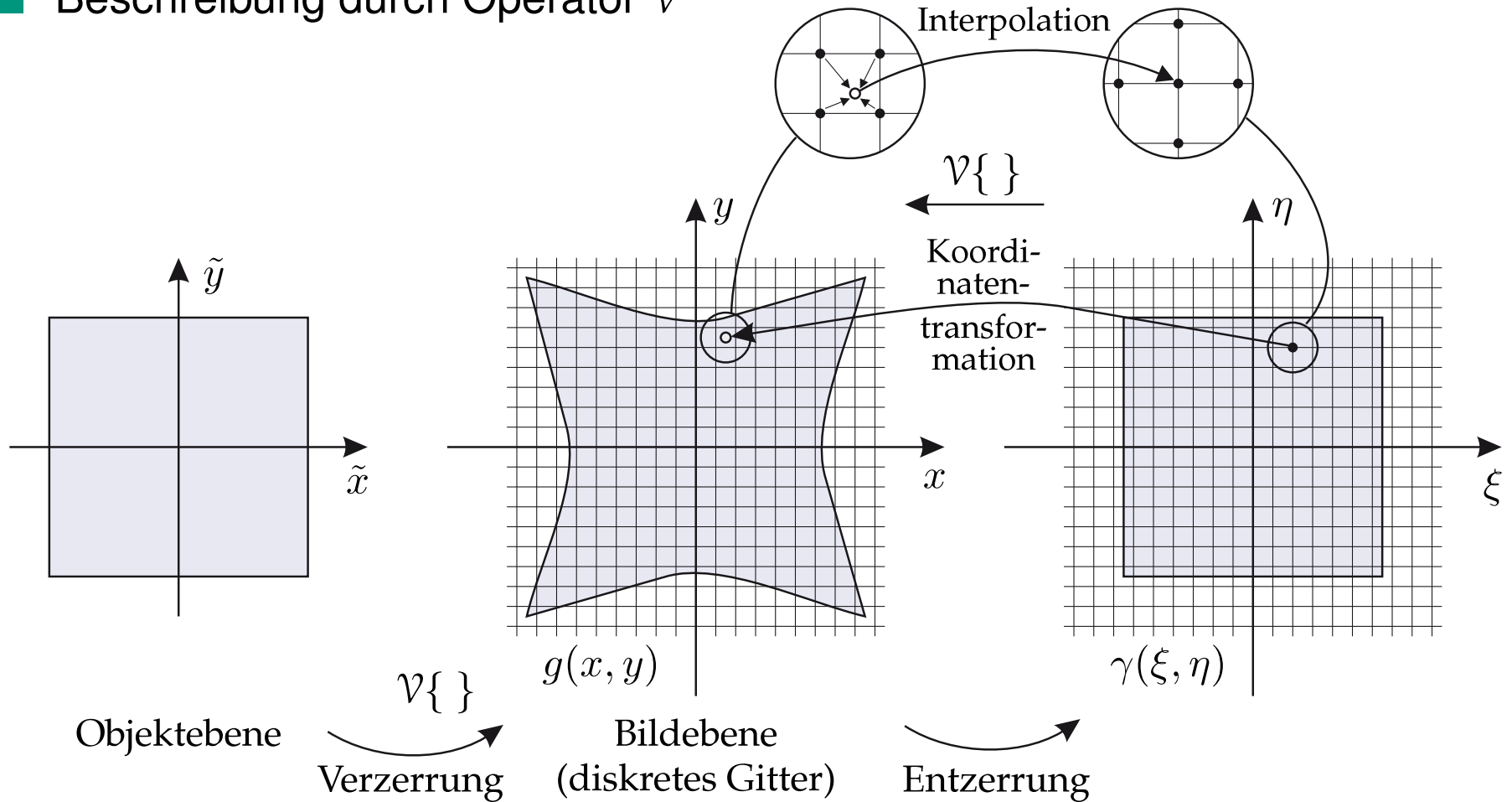
Originalbild $g(\mathbf{x})$



11×11 -Binomial-Tiefpass; $\alpha = 0,75$

9.2.1 Geometrische Entzerrung

- Ziel: Korrektur von Abbildungsfehlern oder perspektivischen Verzerrungen
- Beschreibung durch Operator \mathcal{V}



■ Gegeben:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathcal{V} \left\{ \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix} \right\}$$

■ **Entzerrung:** Koordinaten $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathcal{V} \left\{ \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} \right\}$ liegen i. Allg. zwischen den Gitterpunkten der x, y -Ebene \rightarrow Wert $g(x, y)$ **interpolieren**

■ **Ideale Interpolation** mit $\text{sinc}\left(\frac{x}{\Delta x}\right) \text{sinc}\left(\frac{y}{\Delta y}\right)$ nur näherungsweise möglich, sehr aufwendig; bei Einhaltung der Abtastbedingung fehlerfrei

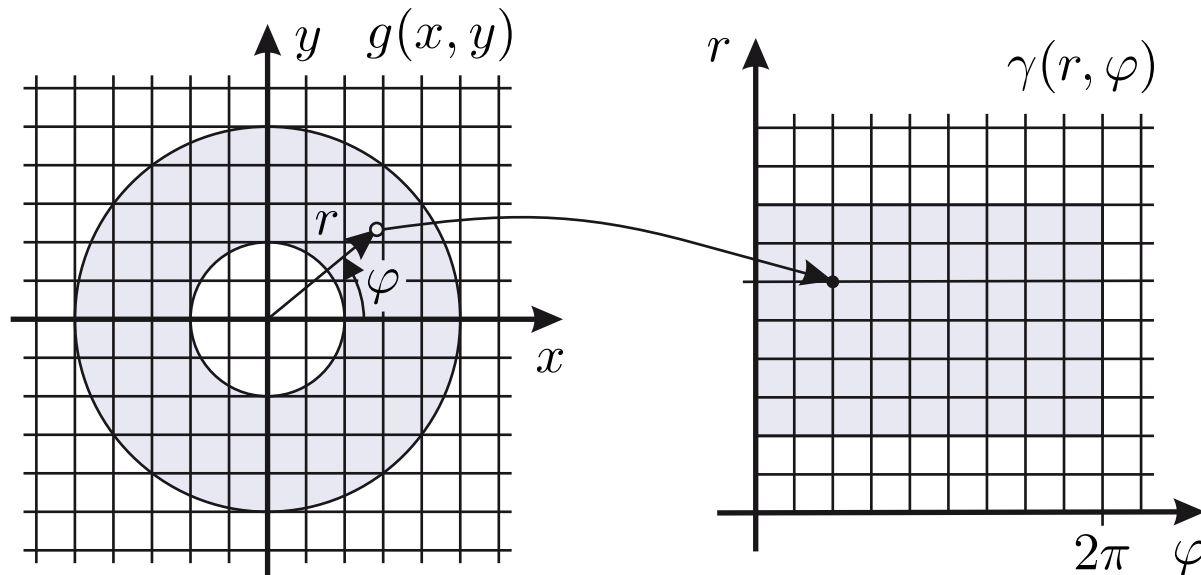
■ **Alternativen:**

- Nächster-Nachbar-Interpolator (0. Ordnung): meist zu schlecht
- **Bilineare Interpolation** (1. Ordnung): reicht meist aus, besonders wenn Überabtastung vorliegt
- Höhere Interpolationen (v.a. **bikubische Interpolation**)

Beispiel 9.6: Gezielte Verzerrung

- Manchmal werden geometrische Transformationen gezielt eingesetzt
- Beispiel: **Polarkoordinatentransformation** (Einsatzgebiet: effiziente Berechnung der Radon-Transformation, vgl. Abschn. 14.3)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathcal{V} \left\{ \begin{pmatrix} r \\ \varphi \end{pmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \\ r \sin \varphi \end{pmatrix}$$



9.2.1 Geometrische Entzerrung

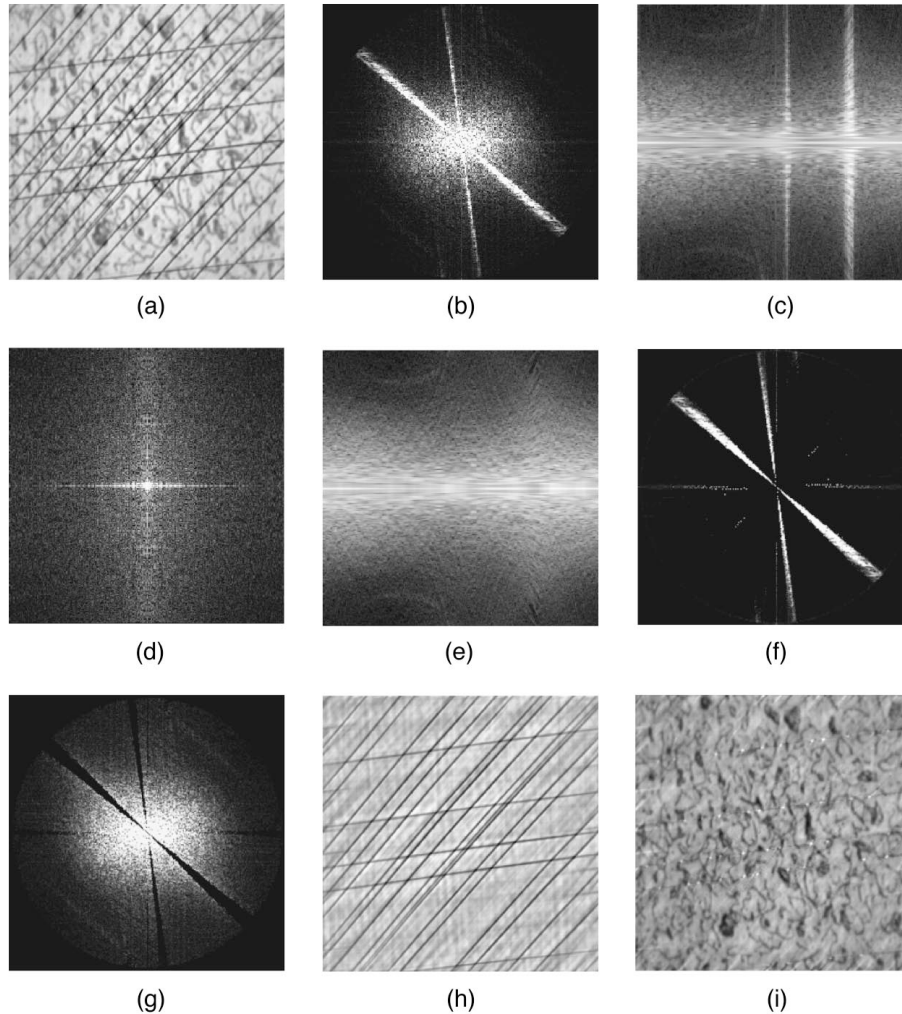


Fig. 7 Test picture: (a) original image; (b) $|G(\mathbf{f})|$; (c) $\log(|G(\mathbf{f})| + 1)$ in polar coordinates, reflected on the φ -axis (horizontal); (d) DFT of (c); (e) DFT^{-1} of (d) $\times M(f_\rho, f_\varphi)$; (f) magnitude $\hat{L}(\mathbf{f})$ of the line spectrum; (g) magnitude $\hat{B}(\mathbf{f})$ of the background spectrum; (h) line texture $\hat{I}(\mathbf{x})$; (i) background texture $\hat{b}(\mathbf{x})$.

9.2.1 Geometrische Entzerrung

Bilineare Interpolation:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2, \quad \text{i. Allg. } \mathbf{x} \notin \mathbb{Z}^2 \quad \Delta x = \Delta y := 1$$

$$\lfloor x \rfloor \in \mathbb{Z}$$

größte ganze Zahl $\leq x$

$$x = \lfloor x \rfloor + \delta x$$

$$\lceil x \rceil := \lfloor x \rfloor + 1$$

$$g_0(y) = (g_{01} - g_{00}) \delta y + g_{00}$$

$$g_1(y) = (g_{11} - g_{10}) \delta y + g_{10}$$

$$\hat{g}(\mathbf{x}) = \text{Bilin}\{g(\mathbf{x})\} = (g_1(y) - g_0(y)) \delta x + g_0(y)$$

$$\hat{g}(\mathbf{x}) \approx g(\mathbf{x}) \quad (\text{bis auf Interpolationsfehler})$$

9.2.2.1 Signalmodell

$$g(\mathbf{x}) = b(\mathbf{x}) \diamond s(\mathbf{x})$$

Inhomogenität

Nutzsignal
(charakterisiert Prüfobjekt)

- Inhomogenität $b(\mathbf{x})$:
 - örtlich langsam veränderlich (Tiefpasssignal)
 - Ursachen:
 - inhomogene Beleuchtung
 - ortsvariante Aufnahmeempfindlichkeit
 - $b(\mathbf{x})$ meist fest durch Aufnahmesituation vorgegeben

Homogenisierung $\hat{=}$ Unterdrückung von $b(\mathbf{x})$

- Zur wirksamen Unterdrückung von $b(\mathbf{x})$ sollten sowohl $b(\mathbf{x})$ als auch der Operator \diamond bekannt sein!

Beispiel 9.8: Multiplikatives Modell

$$g(\mathbf{x}) = b(\mathbf{x}) \cdot s(\mathbf{x})$$

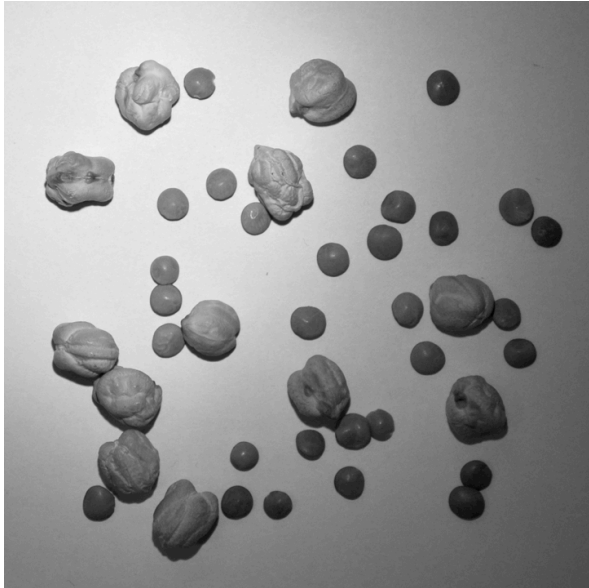
- Falls $b(\mathbf{x})$ bekannt $s(\mathbf{x}) = \frac{g(\mathbf{x})}{b(\mathbf{x})}$

Elimination der Inhomogenität
durch Division

- Inhomogenität $b(\mathbf{x})$ kann z. B. durch Referenzaufnahme eines strukturlosen, diffus streuenden Objektes bestimmt werden, d. h. $s(\mathbf{x}) = \text{const.}$

Oft ist \diamond unbekannt oder $b(\mathbf{x})$ nicht verfügbar

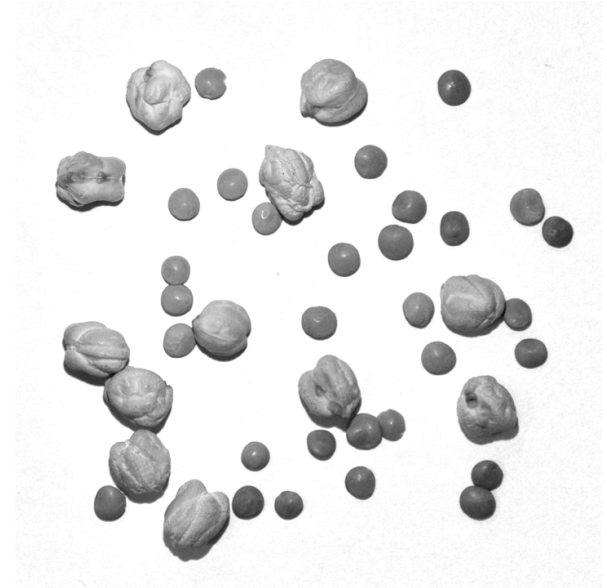
Beispiel 9.9: Division durch eine Referenzaufnahme



Originalbild



Hintergrund (Referenz)

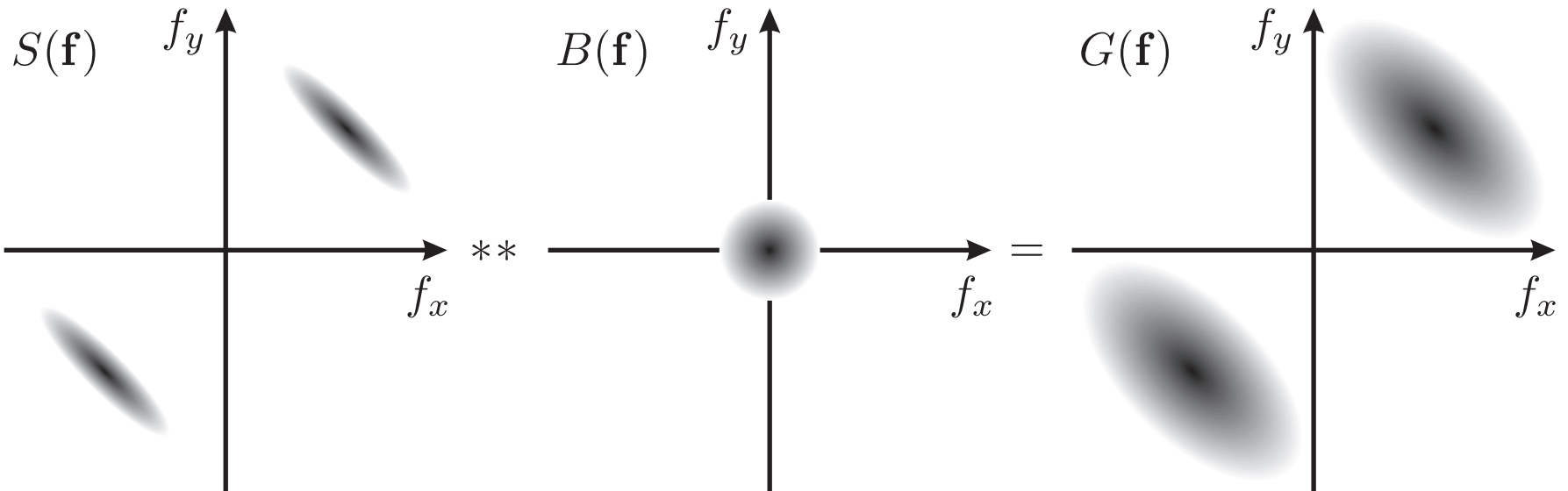


Ergebnis der Division

9.2.2.3 Homomorphe Filterung

Voraussetzungen:

- multiplikatives Modell $\left\{ \begin{array}{l} \text{physikalisch in vielen praktischen Fällen sinnvoll} \\ b(\mathbf{x}): \text{„Beleuchtung“}; \quad s(\mathbf{x}): \text{„Reflektanz“ der OF} \end{array} \right.$
- $b(\mathbf{x})$ örtlich langsam veränderlich verglichen mit $s(\mathbf{x})$
- ideal: $\text{supp}\{B(\mathbf{f})\} \cap \text{supp}\{S(\mathbf{f})\} = \emptyset$
- $g(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall \mathbf{x}$

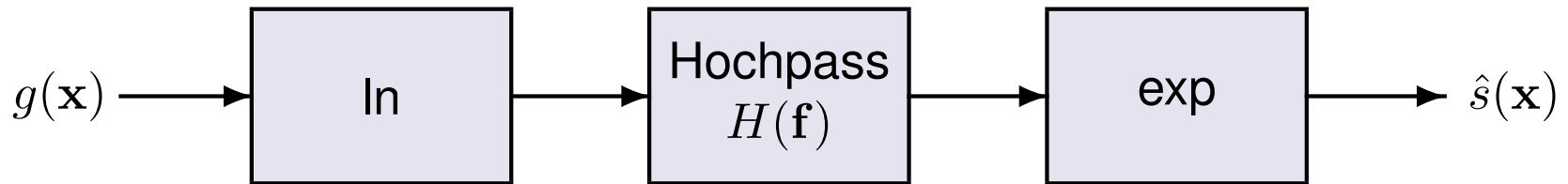


- lineares Filter setzt additive Überlagerung der Signalkomponenten voraus
 \Rightarrow lineare Filter können $s(\mathbf{x})$ und $b(\mathbf{x})$ nicht trennen!

9.2.2.3 Homomorphe Filterung

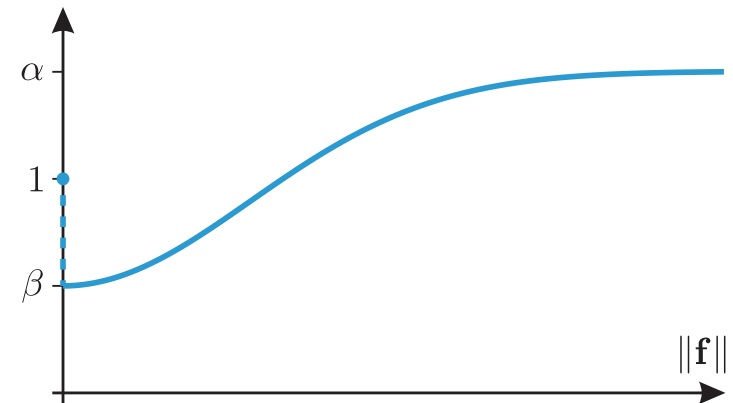
- **Logarithmierung** und Unterdrückung von $\log b(\mathbf{x})$ durch Hochpass

$$\log g(\mathbf{x}) = \underbrace{\log b(\mathbf{x})}_{\substack{\text{örtlich langsam} \\ \text{veränderlich}}} + \underbrace{\log s(\mathbf{x})}_{\substack{\text{örtlich schnell} \\ \text{veränderlich}}}$$



- Häufig verwendeter **Hochpass**:

$$H(\mathbf{f}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{f} = \mathbf{0} \\ \alpha - (\alpha - \beta) \exp\left(-\frac{\|\mathbf{f}\|^2}{\rho^2}\right) & \text{sonst} \end{cases}$$



Beispiel 9.10: Beleuchtungsausgleich durch homomorphe Filterung



Originalbild



Ergebnis der homomorphen
Filterung ($\alpha = 1; \beta = 0; \rho = 4$)

9.2.2.4 Homogenisierung

- Bei **anisotropen Reliefs** reicht **multiplikatives Modell** zur Erklärung und Beschreibung der auftretenden Inhomogenitäten manchmal nicht aus
- Besseres **Modell**:

$$g(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x}) \cdot s(\mathbf{x}) + \mu(\mathbf{x})$$

$s(\mathbf{x})$: Nutzsignal, örtlich schnell veränderlich

$$\frac{1}{|\mathcal{A}|} \iint_{\mathcal{A}} s(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \approx 0 \quad \frac{1}{|\mathcal{A}|} \iint_{\mathcal{A}} s^2(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \approx 1$$

in einem hinreichend großen Gebiet \mathcal{A}

$b(\mathbf{x})$: Aufspaltung $\left\{ \begin{array}{l} \mu(\mathbf{x}) \quad : \text{lokaler Mittelwert} \\ \sigma(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall \mathbf{x} : \text{lokaler Kontrast} \end{array} \right.$

örtlich langsam veränderlich

Wunsch:

$$\gamma(\mathbf{x}) = \sigma_0 \cdot s(\mathbf{x}) + \mu_0 \quad \sigma_0 > 0, \mu_0 : \text{Konstanten}$$

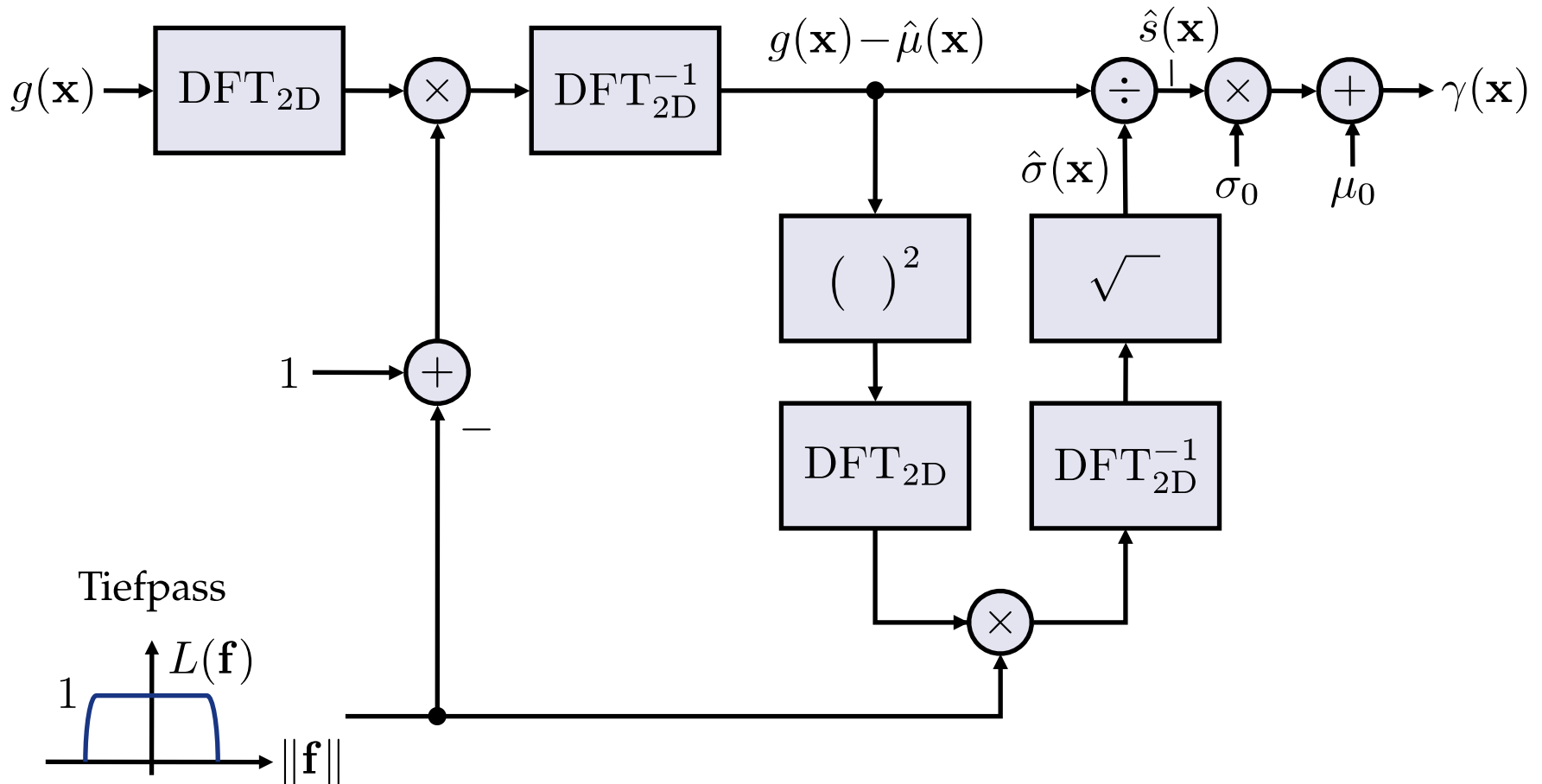
- Schätzung von $\mu(\mathbf{x})$ und $\sigma(\mathbf{x})$ durch lokale örtliche Mittelung:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = \text{TP}\{g(\mathbf{x})\}$$

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}) = \sqrt{\text{TP}\{(g(\mathbf{x}) - \hat{\mu}(\mathbf{x}))^2\}}$$

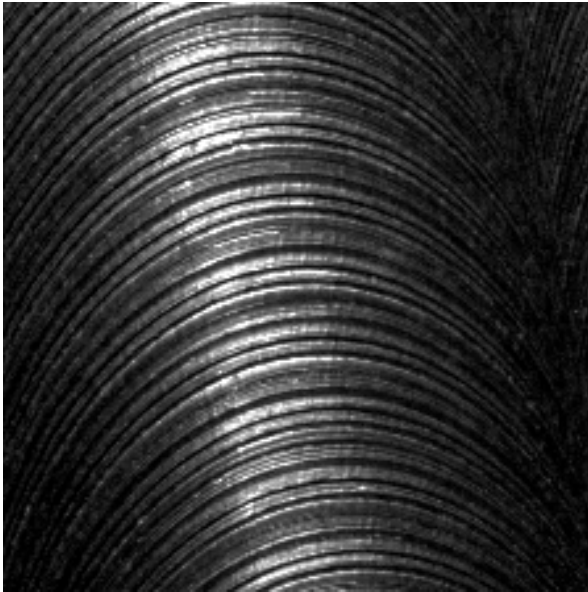
$$\Rightarrow \hat{s}(\mathbf{x}) = \frac{g(\mathbf{x}) - \hat{\mu}(\mathbf{x})}{\hat{\sigma}(\mathbf{x})}$$

9.2.2.4 Homogenisierung

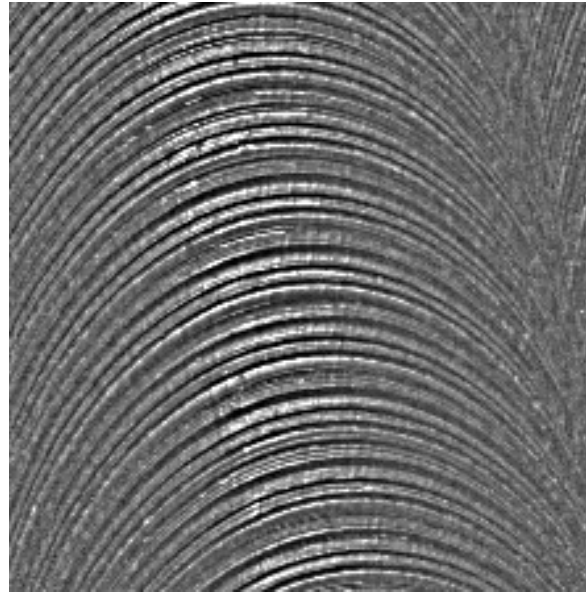


Realisierung der Homogenisierung zweiten Grades im Ortsfrequenzbereich

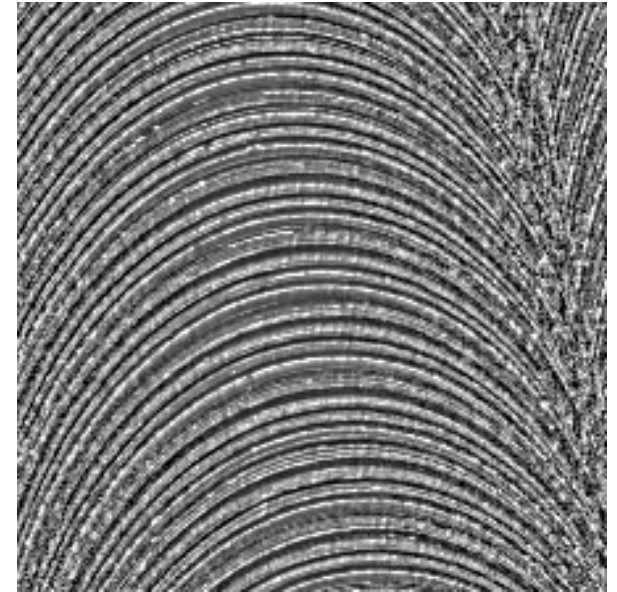
Beispiel 9.11: Homogenisierung einer Frästextur



Originalbild Frästextur

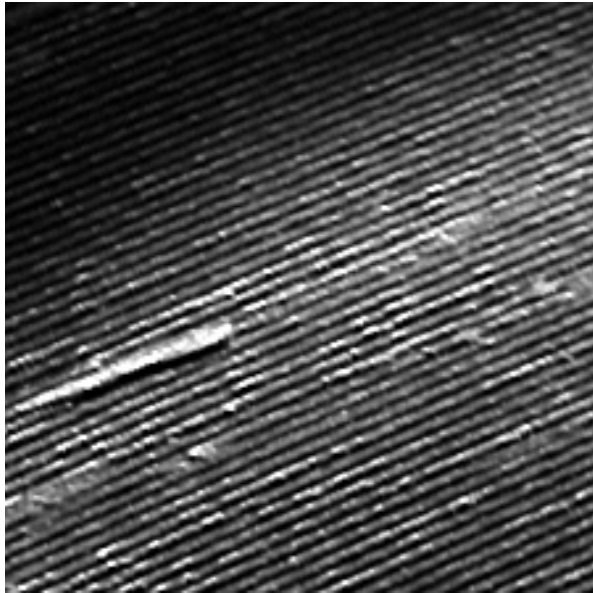


homomorphe Filterung

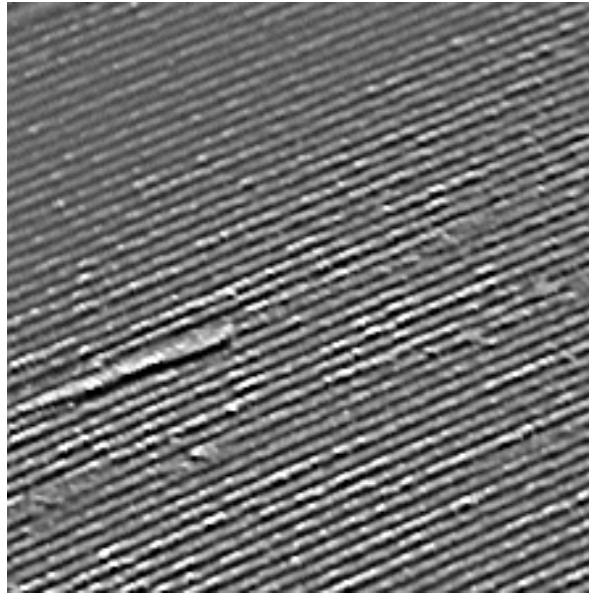


Homogenisierung

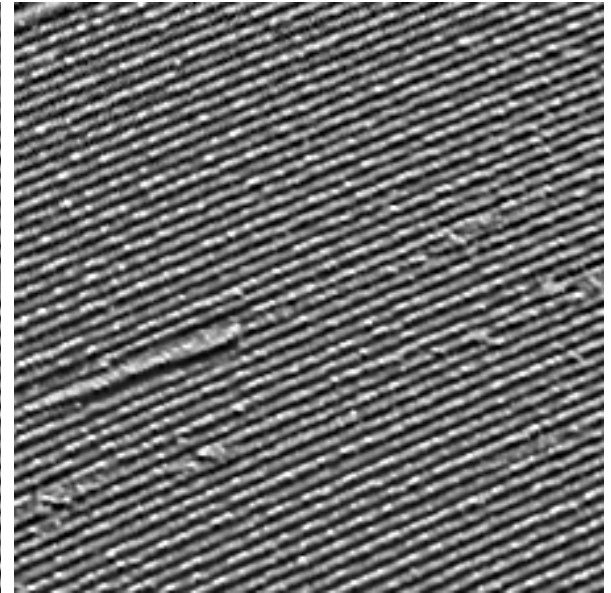
Beispiel 9.12: Homogenisierung einer Stoßtextur



Originalbild Stoßtextur

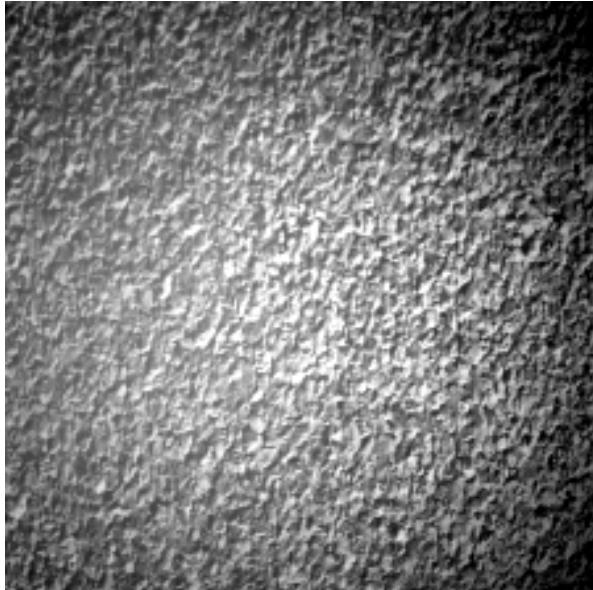


homomorphe Filterung

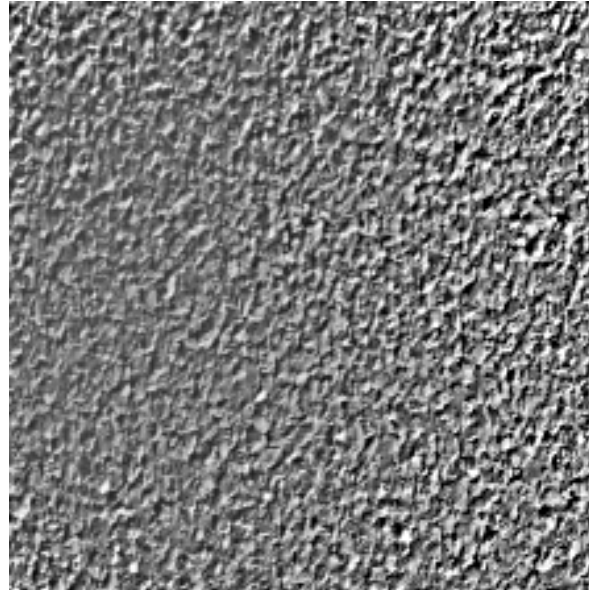


Homogenisierung

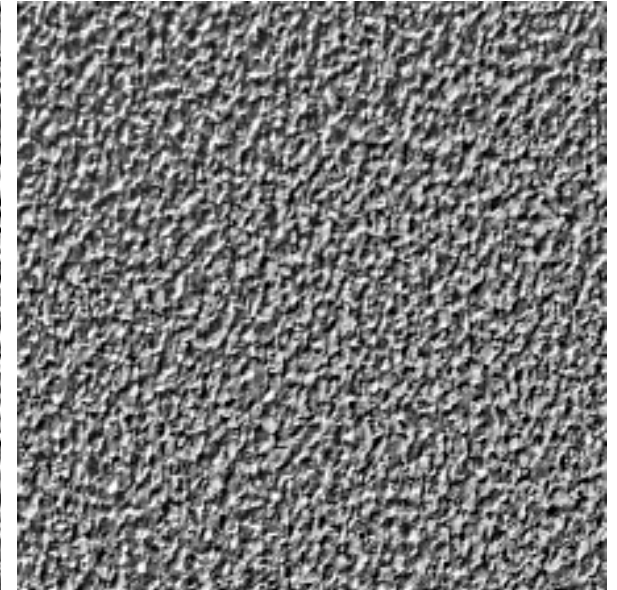
Beispiel 9.13: Homogenisierung einer Korktextur



Originalbild Korktextur



homomorphe Filterung



Homogenisierung

9.3 Verminderung zufälliger Störungen

- **Modellierung** von Nutzsignal $s(\mathbf{x})$ und Störung $n(\mathbf{x})$ als Zufallsprozesse:

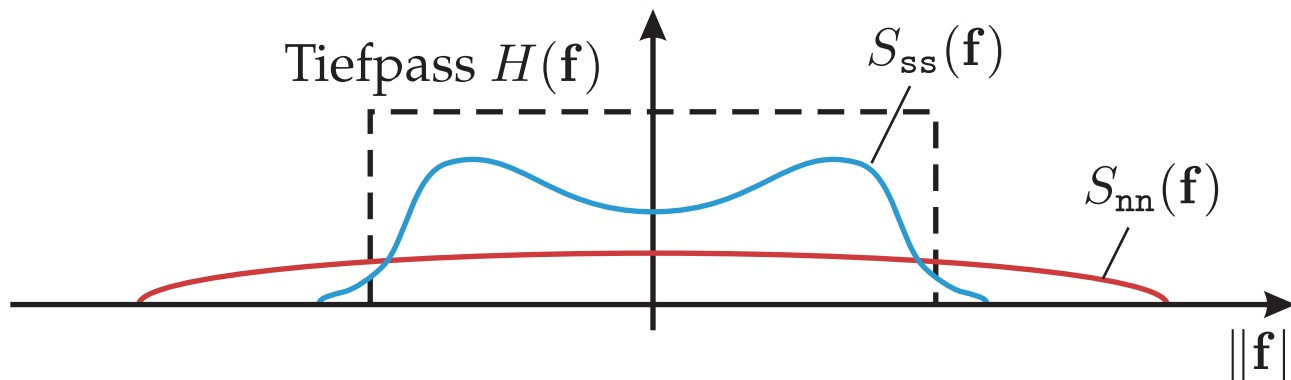
$$g(\mathbf{x}) = s(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x})$$

In der Praxis auch andere Verknüpfungen möglich!

- Häufige Annahmen: $n(\mathbf{x})$ schwach stationär, $E\{n(\mathbf{x})\} = 0$, $C_{ns}(\boldsymbol{\tau}) \equiv 0$

9.3.1 Lineare Filter

Beispiel 9.14: Breitbandiges Rauschen



Beispiel 9.15: Störungsunterdrückung mit Glättungsfiltern



Originalbild



Gestörtes Bild (weißes Gauß'sches R.)

9.3.1 Lineare Filter

Filter-
größe: □

Gleitende
Mittelung



Binomial-TP

Kegel-TP



Medianfilter
(nichtlinear) ■

9.3.1 Lineare Filter

9.3.1.2 Gleitende Mittelung

$$h(\mathbf{x}) = \frac{1}{D^2} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y}{D}\right)$$

■ Vorteile:

- endliche örtliche Ausdehnung

- separabel:

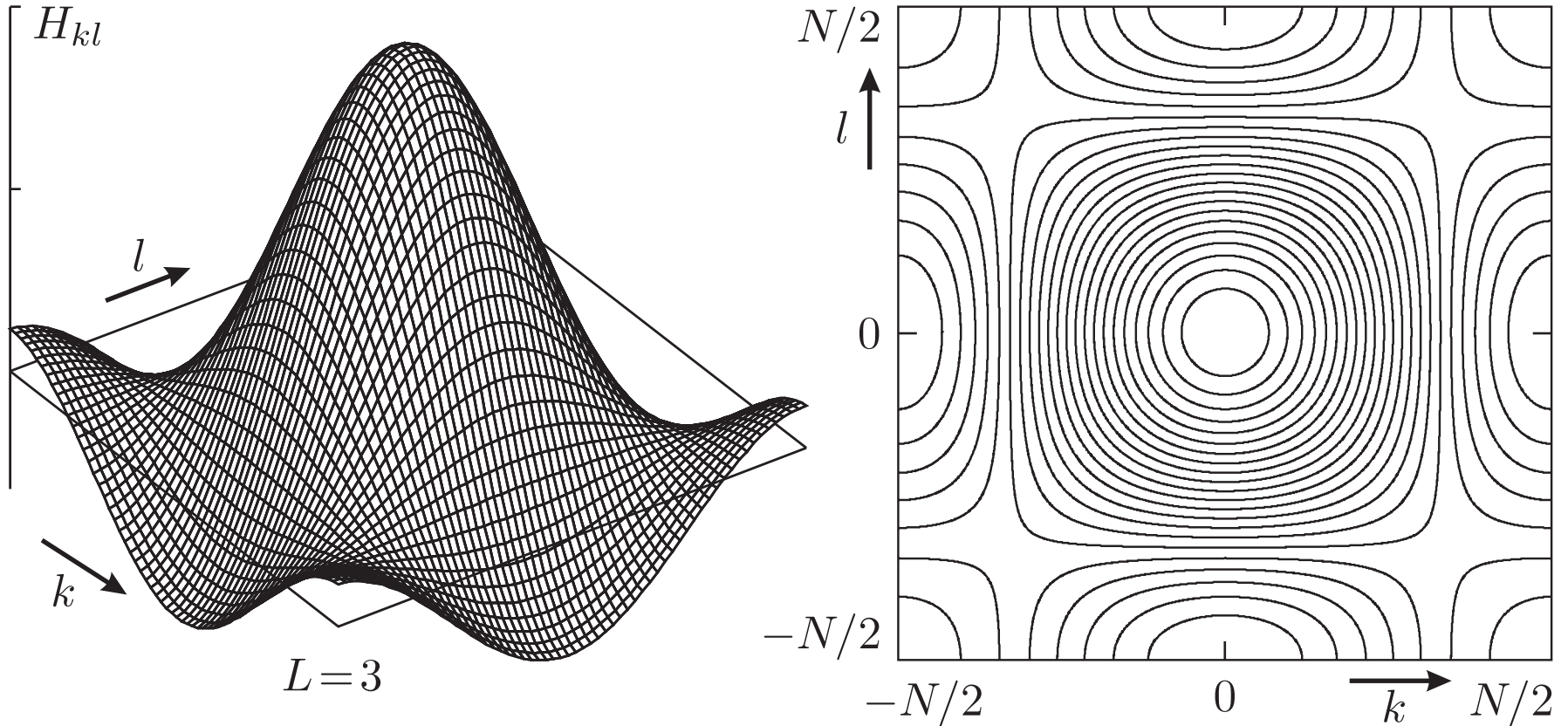
$$g(\mathbf{x}) ** h(\mathbf{x}) = \left(g(\mathbf{x}) * \frac{1}{D} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \right) * \frac{1}{D} \operatorname{rect}\left(\frac{y}{D}\right)$$

Filterung in x - und y -Richtung kann separat durchgeführt werden; spart Rechenzeit

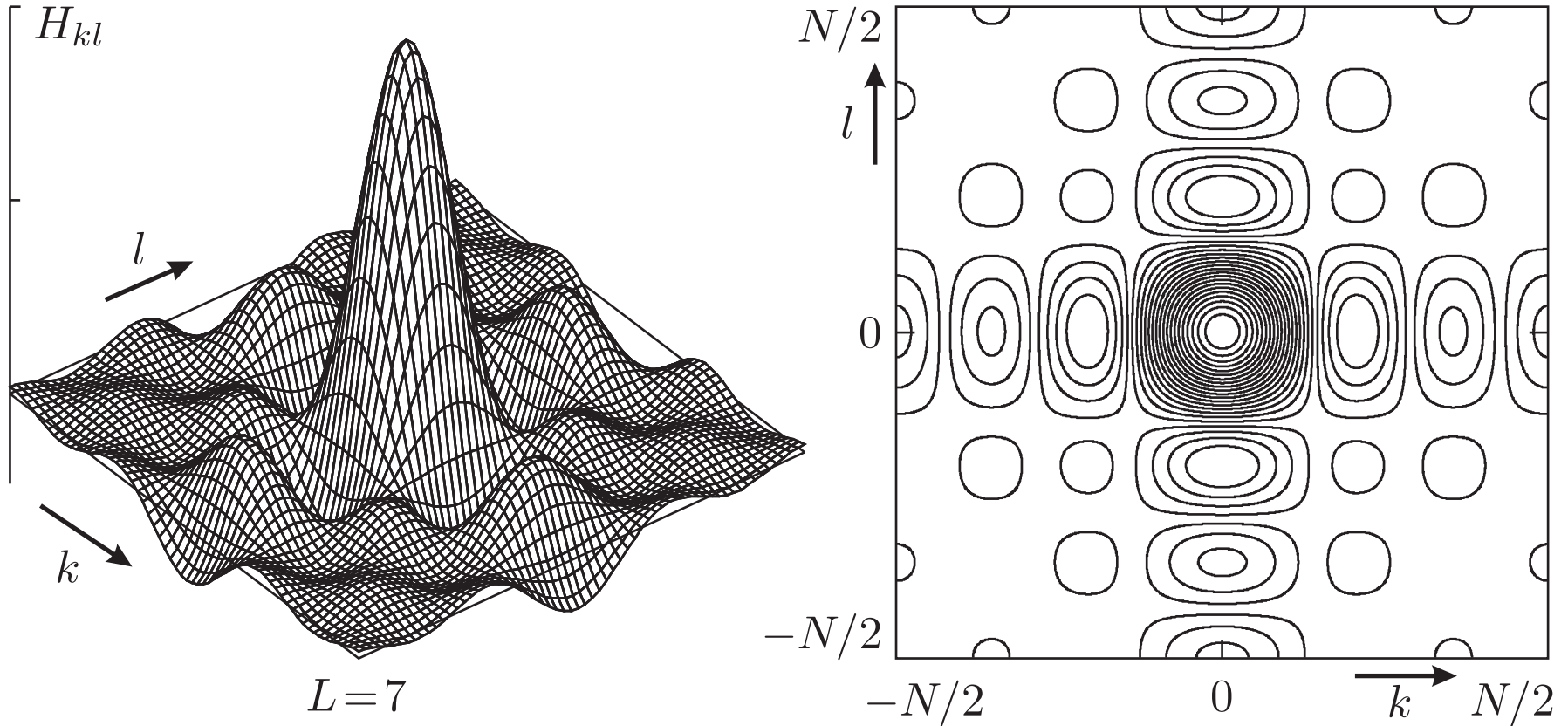
■ Nachteile:

- anisotrop
- Nebenextrema der Übertragungsfunktion $H(\mathbf{f})$

DFT-Übertragungsfunktion der (diskreten) gleitenden Mittelung ($L = 3$)



DFT-Übertragungsfunktion der (diskreten) gleitenden Mittelung ($L = 7$)



Anisotropie

9.3.1 Lineare Filter

9.3.1.4 Gauß-Tiefpass

$$h(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi D^2} e^{-\frac{1}{2} \frac{\|\mathbf{x}\|^2}{D^2}}$$

■ Vorteile:

- keine Nebenextrema im Ortsfrequenzbereich (im kontinuierlichen Fall)
- isotrop
- separabel
- erzeugt keine künstlichen Extrema (gilt strenggenommen nur im Eindimensionalen)

■ Nachteil:

- unendliche Ausdehnung im Ortsbereich und Ortsfrequenzbereich (scharfe Begrenzung im diskreten Fall führt dann doch wieder zu Nebenextrema)

■ Diskrete Näherung: **Binomial-Tiefpass**

$$1D: h_{m,L} = \frac{1}{2^{L-1}} \binom{L-1}{\frac{L-1}{2} + m}, \quad m = -\frac{L-1}{2}, \dots, \frac{L-1}{2}, \quad D = \frac{\sqrt{L-1}}{2} \Delta x$$

$$\binom{L-1}{\frac{L-1}{2} + m}$$

Pascal'sches Dreieck

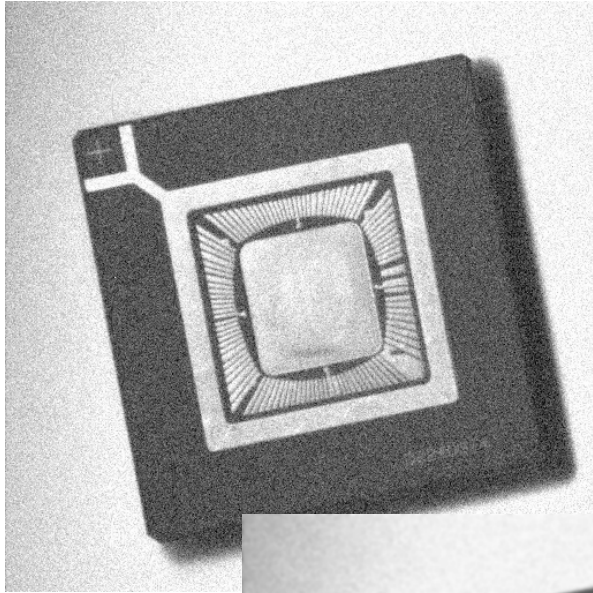
L	Binomialkoeffizienten	eff. Mittelungsbreite
1	1	0
2	1 1	1
3	1 2 1	$\sqrt{2}$
4	1 3 3 1	$\sqrt{3}$
5	1 4 6 4 1	2
6	1 5 10 10 5 1	$\sqrt{5}$

■ Es gilt: $h_{m,3} * h_{m,L} = h_{m,L+2}$ $\left\{ \begin{array}{l} h_{m,L} \text{ mit } L > 3 \text{ durch wiederholte} \\ \text{Faltung mit } h_{m,3} \rightarrow \text{Serie von} \\ \text{Zwischenergebnissen} \end{array} \right.$

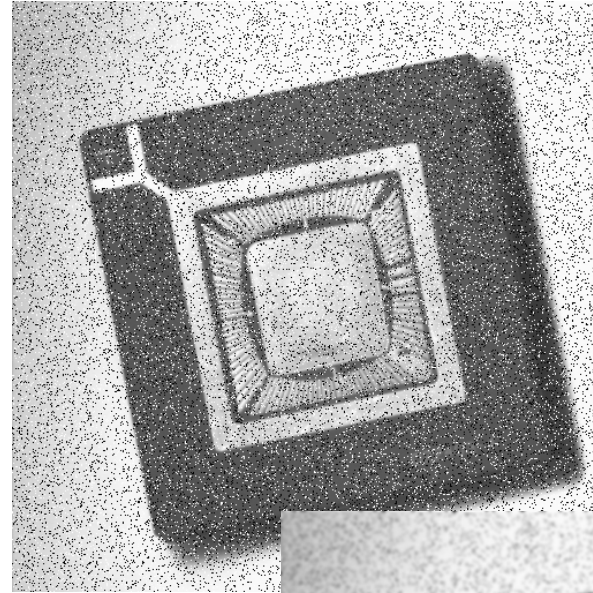
■ Zweidimensional: $h_{mn,L} = h_{m,L} \cdot h_{n,L}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Separabilität spart Rechenzeit} \end{array} \right.$

■ Bemerkung: Binomial-TP $\xrightarrow{L \rightarrow \infty}$ Gauß-TP

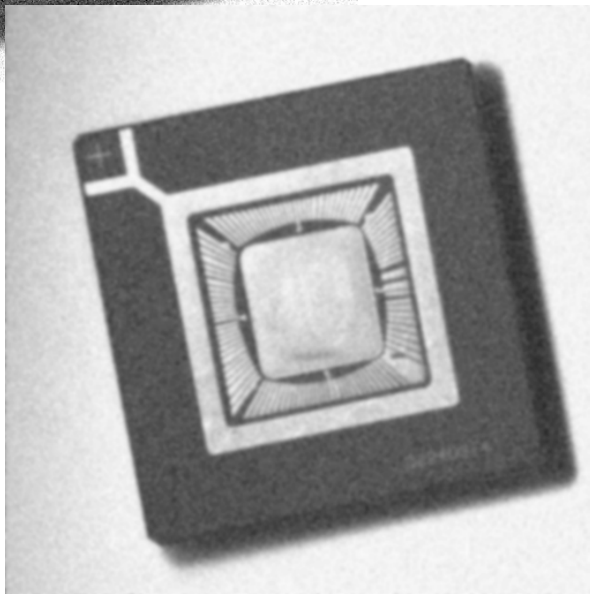
Beispiel 9.17: Störungsunterdrückung mit einem Binomial-Tiefpass



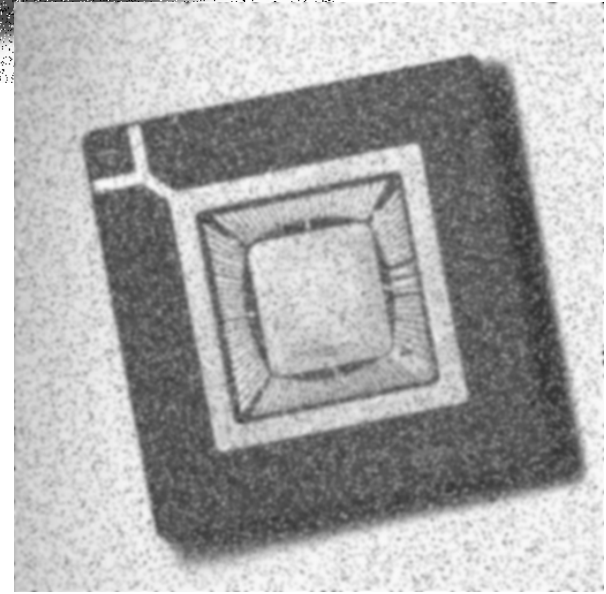
Gauß'sches
Rauschen
($\sigma^2 = 400$)



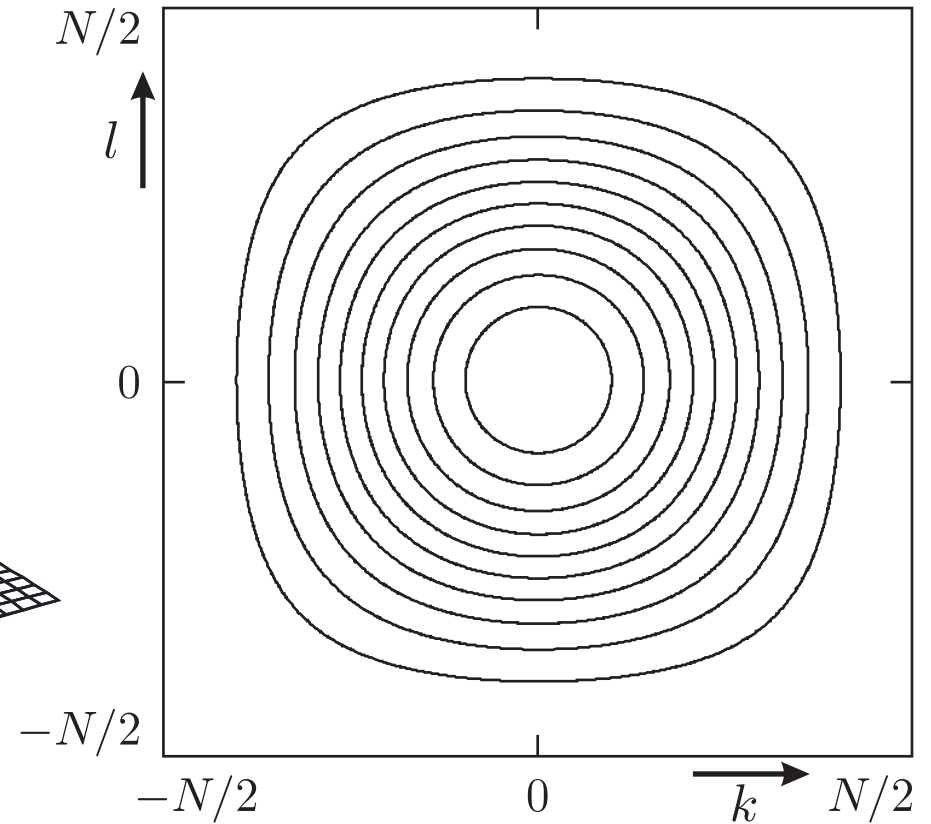
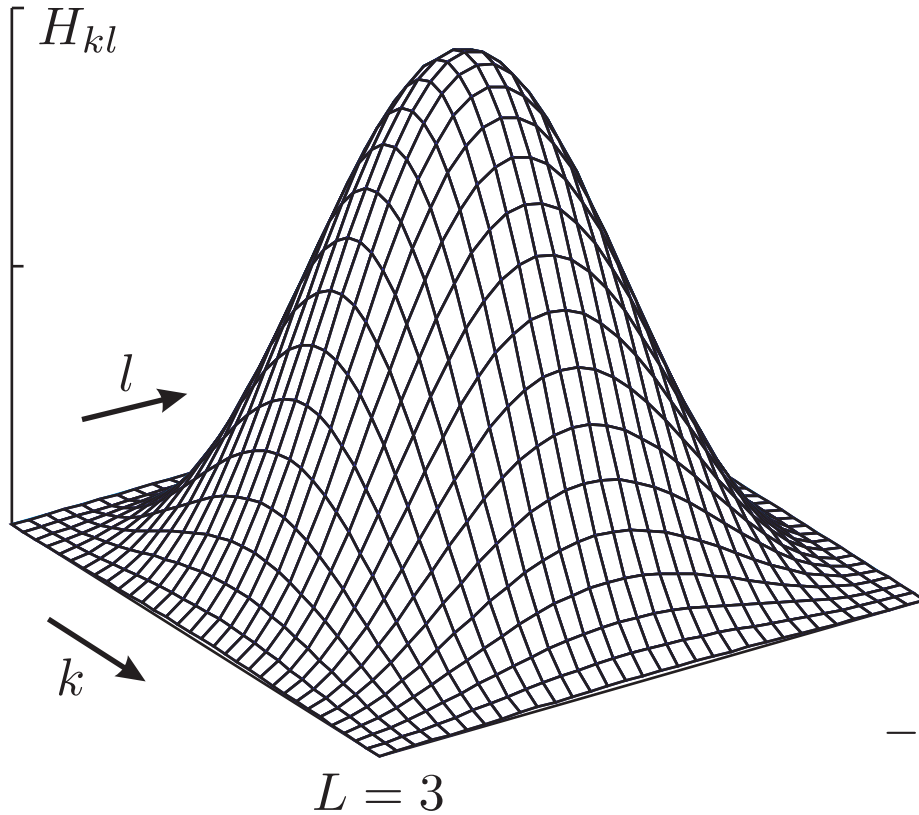
Impulsförmiges
Rauschen
(15%)



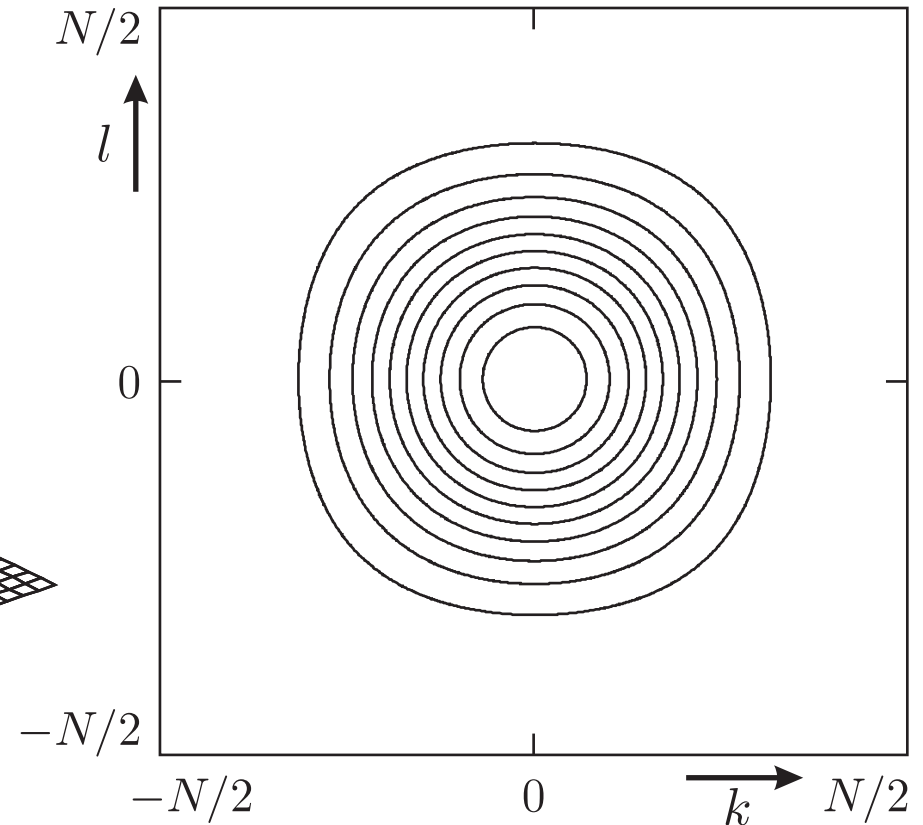
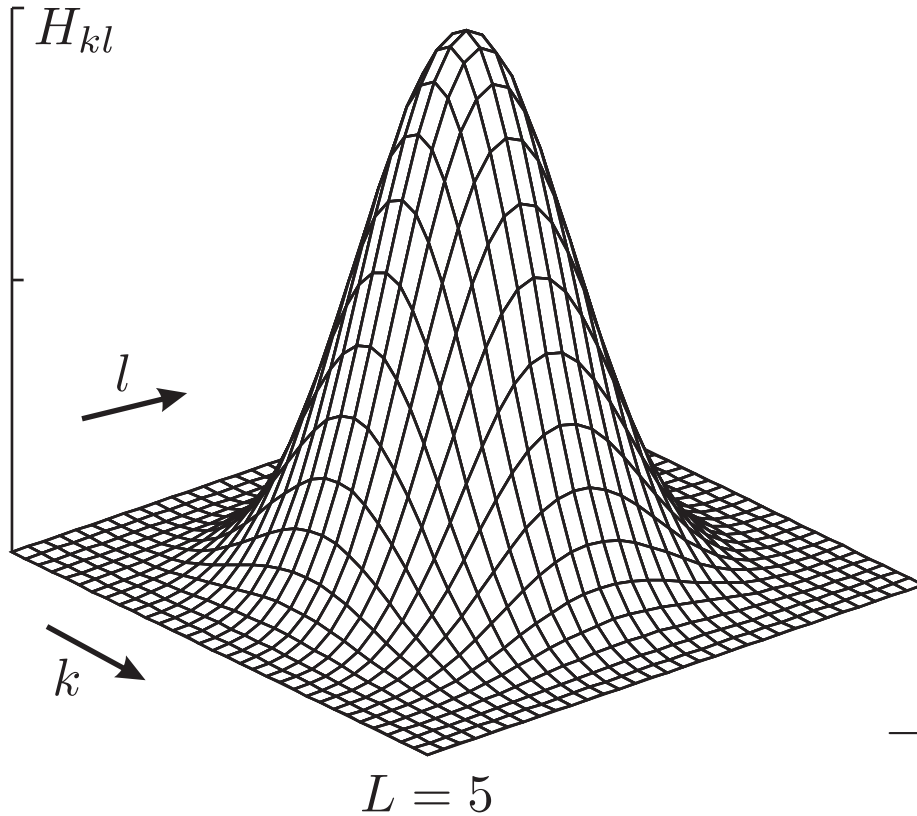
$L \times L = 9 \times 9$



DFT-Übertragungsfunktion des Binomial-Tiefpassfilters ($L \times L = 3 \times 3$)



DFT-Übertragungsfunktion des Binomial-Tiefpassfilters ($L \times L = 5 \times 5$)



fast isotrop

- Lineare Filter sind empfindlich gegen impulsförmige Störungen (Ausreißer)

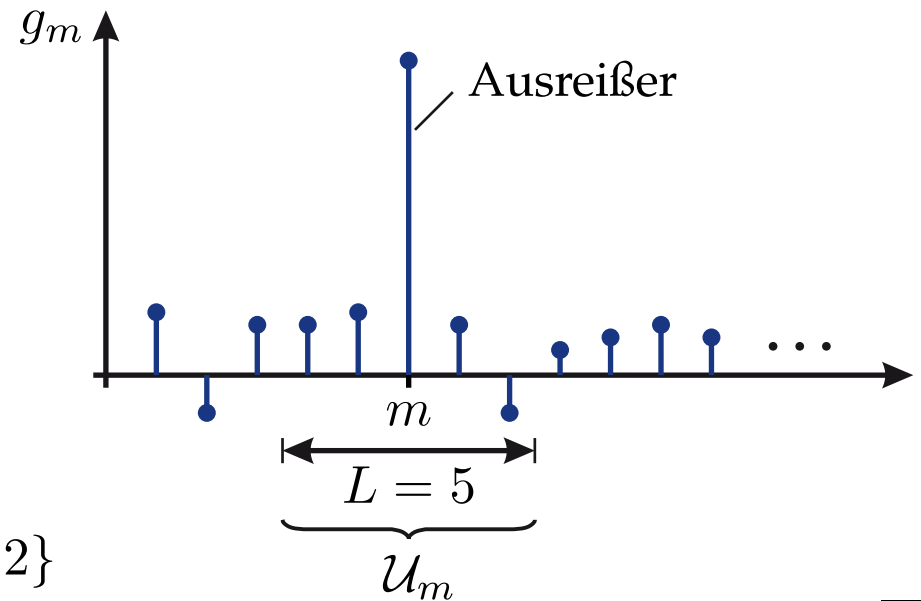
Beispiel 9.22: Gleitende Mittelung

- Betrachtet sei die gleitende Mittelung:

$$k_m = \frac{1}{5} \sum_{\nu=-2}^2 g_{m-\nu}$$

- Ein Ausreißer $g_m \rightarrow \infty$ an der Stelle m wirkt sich auf die gesamte Umgebung \mathcal{U}_m aus:

$$k_{m-i} \rightarrow \infty \quad \text{für} \quad i \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$$



9.3.2.1 Medianfilter

- Wichtiges nichtlineares **Glättungsfilter**
- Basiert auf der **Sortierung** der Bildwerte innerhalb einer Umgebung \mathcal{U}_m des zu bearbeitenden Bildpunktes:

$$\{g_{m-\mu} | \mu \in \mathcal{U}\} \xrightarrow{\text{Sortieren}} {}^m g_{(-K)} \leq \dots \leq \underbrace{{}^m g_{(0)}}_{\text{Median}} \leq \dots \leq {}^m g_{(K)}$$

- Aus der sortierten Liste wird der in der Mitte zu liegen kommende **Median** ausgewählt:

$$k_m = \text{med}_{\mathcal{U}}\{g_m\} = {}^m g_{(0)}$$

- Sortierung drängt Ausreißer nach „außen“
- Falls weniger als $L/2$ Ausreißer $\rightarrow \infty$ und weniger als $L/2$ Ausreißer $\rightarrow -\infty$ in \mathcal{U} vorhanden sind, bleibt k_m endlich
- Ausreißer **schlagen nicht direkt** auf k_m **durch**: Ausreißer beeinflussen zwar den Sortiervorgang; dieser Einfluss ist jedoch praktisch sehr gering verglichen mit dem bei linearen Tiefpassfiltern

Zweidimensionales Medianfilter:

- Definition von \mathcal{U} als zweidimensionale Umgebung (Punktmenge)

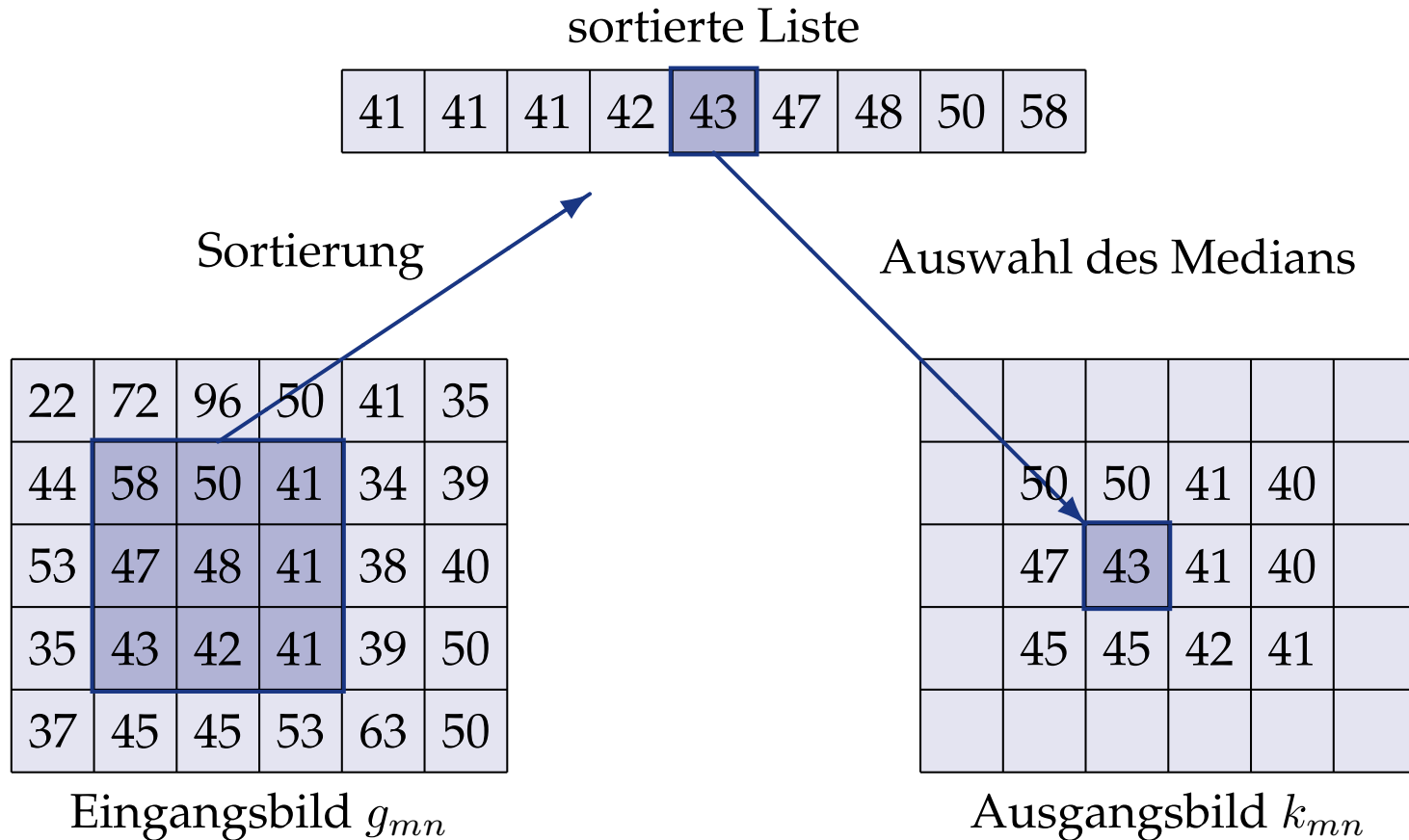


Illustration des Medianfilters der Größe $L \times L = 3 \times 3$

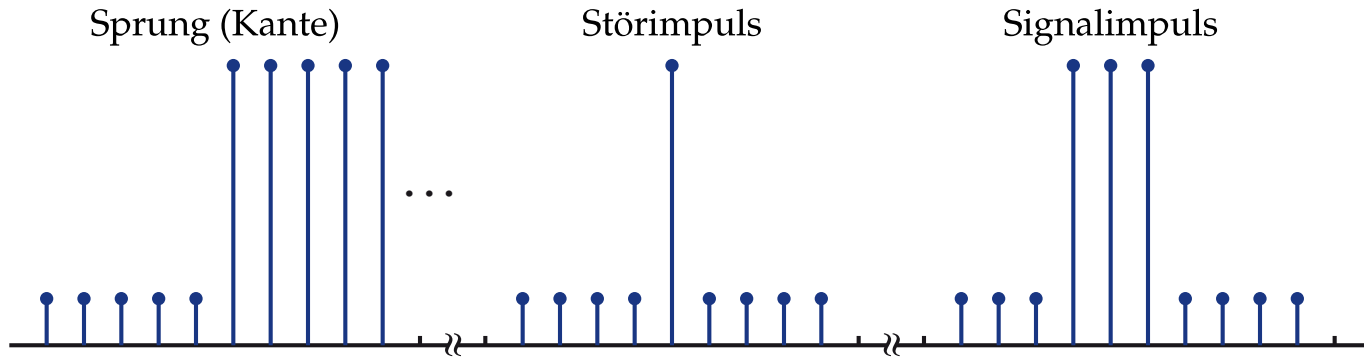
Eigenschaften:

- kantenerhaltend
- **Medianfilter optimal** zur Unterdrückung von **Impulsrauschen** („Salz- und Pfeffer-Rauschen“, Ausreißer) [BPF15]

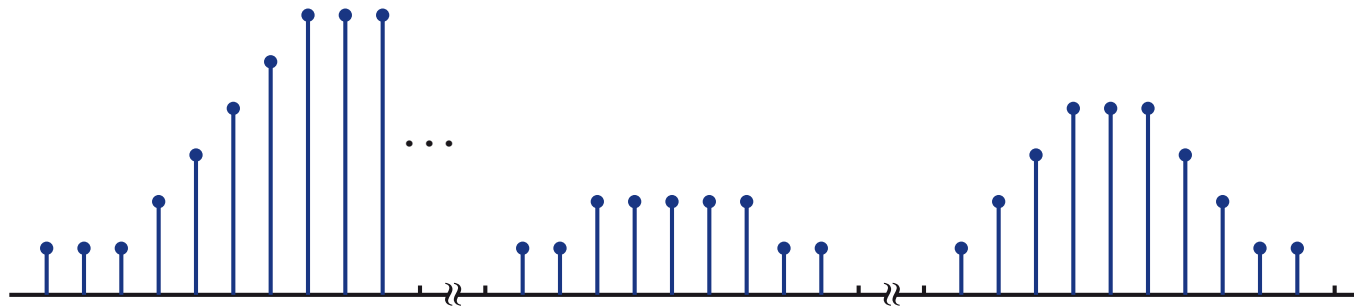
Bemerkung:

- **lineare Filter optimal** zur Unterdrückung von **Gauß'schem Rauschen** [BPF15]

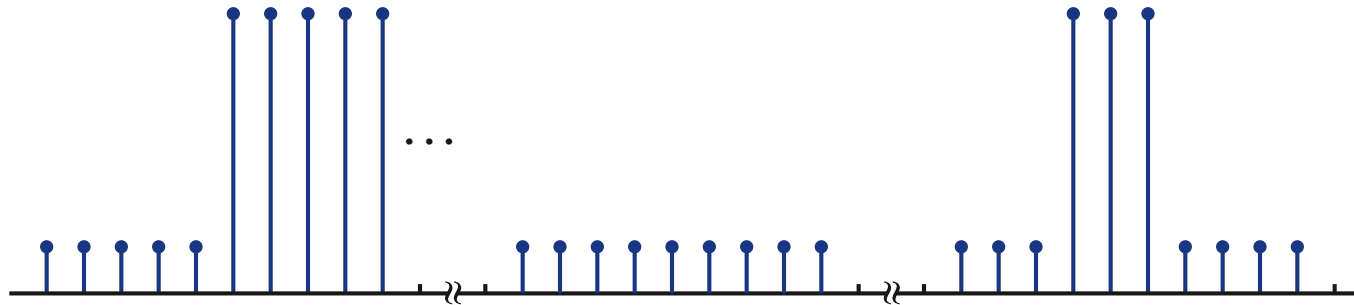
9.3.2.1 Medianfilter



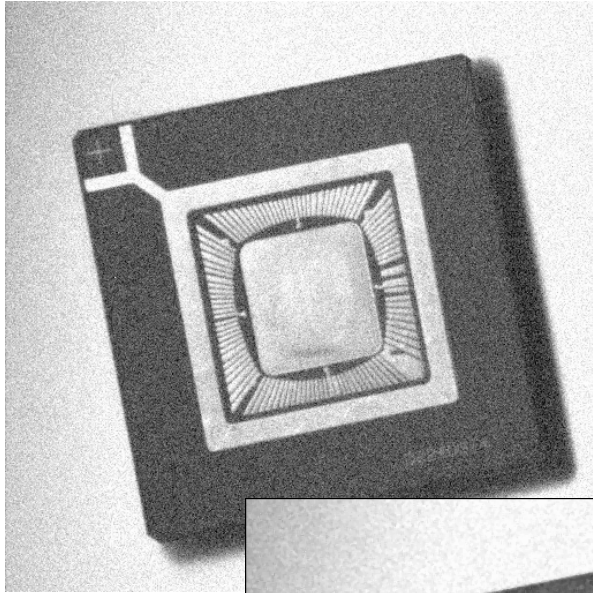
gleitende Mittelung, $L = 5$



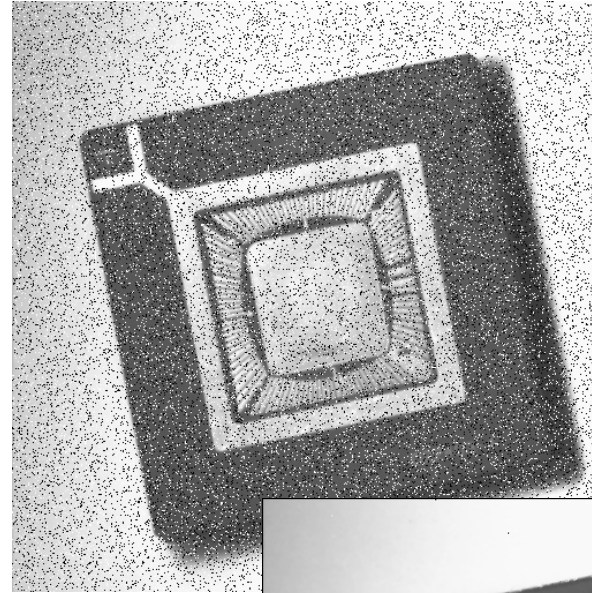
Medianfilterung, $L = 5$



Beispiel 9.17: Störungsunterdrückung mit dem Medianfilter, $L \times L = 3 \times 3$



Gauß'sches
Rauschen
($\sigma^2 = 400$)



Impulsartiges
Rauschen
(15 %)

