

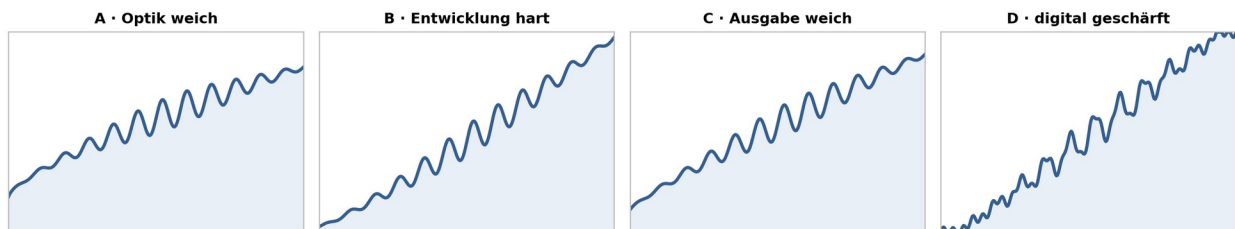
02

Was gehört wirklich zum Material?

Materialeigenschaft, Systemeinfluss und sichtbare Bildwirkung

DFM-CHAPTER 02 · VERSION 1.0 · Zweiter Produktionspilot auf Basis DFM-FORMAT-SPEC v0.1

Dasselbe Aufzeichnungsmaterial – unterschiedliche Systemantworten



COMPARE 2.1 - Dasselbe Aufzeichnungsmaterial kann in unterschiedlichen fotografischen Systemen zu deutlich verschiedenen Ergebnissen führen. Die vier Kurven sind synthetische didaktische Darstellungen und keine Messwerte realer Filme oder Sensoren.

Dieses Kapitel untersucht, welche Eigenschaften eines fotografischen Bildes tatsächlich dem Aufnahmемaterial zugeschrieben werden können - und welche erst durch das Zusammenwirken von Optik, Belichtung, Entwicklung, Ausgabe und Betrachtung entstehen.

Im Mittelpunkt steht die Unterscheidung zwischen intrinsischen Materialeigenschaften, Prozesseigenschaften und Systemeigenschaften. Anhand von Schärfe, Auflösung, Kontrast, Tonwert, Farbe, Korn und Rauschen wird gezeigt, warum sichtbare Bildwirkungen selten nur eine einzige Ursache besitzen.

Das Kapitel führt damit vom allgemeinen fotografischen Materialsystem aus Kapitel 1 zu einer kausalen Betrachtung der Bildentstehung: Nicht das sichtbare Merkmal allein definiert das Material, sondern die Frage, welcher Bestandteil des Systems dieses Merkmal hervorbringt.

2.1 Dasselbe Material - unterschiedliche Bilder

Nehmen wir an, zwei Fotografen erhalten dieselbe Charge eines Schwarzweißfilms. Beide belichten denselben Filmtyp, aber der erste arbeitet mit einem kontrastreichen, gut korrigierten Objektiv, der zweite mit einer älteren Optik, deren Streulicht und Randabfall deutlich höher sind. Schon vor der Entwicklung ist damit nicht mehr dasselbe fotografische System im Einsatz. Wird Film A anschließend in einem weich arbeitenden Entwickler verarbeitet und Film B stärker entwickelt, vergrößert der eine auf mattes Papier und der andere auf ein härteres Papier, entstehen zwei Bilder, denen Betrachter sehr unterschiedliche „Filmcharaktere“ zuschreiben könnten - obwohl das Aufzeichnungsmaterial nominell identisch war.

Dasselbe Problem tritt digital auf. Eine RAW-Datei enthält noch kein endgültiges Erscheinungsbild. Unterschiedliche Demosaicing-Verfahren, Tonkurven, Rauschminderung, Schärfung, Farbmatrizen, Weißabgleiche und Ausgabefarbräume können aus denselben Sensordaten Bilder erzeugen, die im direkten Vergleich wie Ergebnisse verschiedener Kameras wirken. Wer nur das fertige JPEG betrachtet, kann deshalb nur begrenzt entscheiden, welche Eigenschaft tatsächlich dem Sensor, welche der Verarbeitung und welche der Ausgabe zuzuschreiben ist.

Für DFM ist diese Beobachtung methodisch zentral. Die Aussage „Dieser Film ist weich“, „dieser Sensor zeichnet kühl“ oder „diese Emulsion hat hohe Plastizität“ kann eine nützliche Alltagserfahrung ausdrücken. Als technische Beschreibung ist sie unvollständig, solange die Bedingungen, unter denen die Wirkung entsteht, nicht benannt sind. Die Leitfrage lautet deshalb: Welche Eigenschaften dürfen wir dem Material selbst zuschreiben - und welche entstehen erst im Zusammenspiel mit dem restlichen System?

2.2 Warum sichtbare Eigenschaften schwer zuzuordnen sind

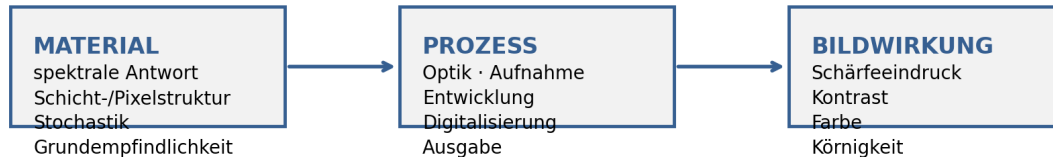
Fotografische Sprache ist historisch aus der Praxis entstanden. Fotografen mussten nicht für jede Aufnahme ein Kausalmodell aufstellen; sie brauchten handlungsfähige Abkürzungen. Ein bestimmter Film „war körnig“, ein Entwickler „arbeitete weich“, ein Objektiv „zeichnete hart“. Solche Begriffe sind praktisch, weil sie wiederkehrende Erfahrungen verdichten. Problematisch werden sie erst dann, wenn aus der praktischen Kurzform eine vermeintlich eindeutige technische Ursache gemacht wird.

Ein sichtbares Bildmerkmal kann mehrere Quellen besitzen. Niedrige lokale Kontraste können aus Streulicht der Optik, aus der Kennlinie des Materials, aus der Entwicklung, aus einem flachen Scan oder aus der Displaydarstellung stammen. Farbverschiebungen können durch das Spektrum der Lichtquelle, die spektrale Empfindlichkeit des Materials, chemische Prozesse, Scannerprofile, Weißabgleich und Farbmanagement beeinflusst werden. Selbst sichtbare Körnigkeit ist nicht einfach identisch mit der physikalischen Kornstruktur der Emulsion: Vergrößerungsmaßstab, Entwicklung, Scanschärfung, Ausgabeauflösung und Betrachtungsabstand wirken mit.

Damit entsteht ein Attributionproblem. Das fertige Bild zeigt das Ergebnis einer Kette, nicht die isolierten Beiträge der Kettenglieder. Wer vom Bild rückwärts auf die Ursache schließen will, löst daher ein inverses Problem: Aus einer beobachtbaren Wirkung sollen die zugrunde liegenden Komponenten rekonstruiert werden. Ohne kontrollierte Bedingungen oder zusätzliche Quellen ist diese Rückrechnung häufig mehrdeutig.

DFM | GRUNDSATZ**Eine sichtbare Bildwirkung ist nicht automatisch eine Materialeigenschaft.**

Beobachtete Eigenschaften müssen als Ergebnis der gesamten Systemkette geprüft werden. Material kann einen starken oder sogar dominanten Einfluss besitzen, ohne alleinige Ursache des sichtbaren Ergebnisses zu sein.

**Intrinsische Eigenschaft ≠ beobachtbare Systemeigenschaft**

Die beobachtete Bildwirkung entsteht aus Kopplungen. Material kann dominant sein, ist aber selten alleinige Ursache.

SYSTEM 2.2 - Materialeigenschaft versus Systemeigenschaft. Intrinsische Eigenschaften beschreiben das Aufzeichnungsmedium; beobachtbare Bildwirkungen entstehen erst durch die Kopplung mit Optik, Aufnahme, Entwicklung und Ausgabe.

2.3 Intrinsische Materialeigenschaften

Als intrinsische Materialeigenschaft bezeichnet DFM eine Eigenschaft, die primär aus der physikalischen, chemischen oder elektronischen Struktur des Aufzeichnungsmediums hervorgeht und sinnvoll beschrieben werden kann, wenn andere Systemkomponenten gedanklich konstant gehalten werden. Bei fotografischen Filmen gehören dazu beispielsweise der Schichtaufbau, die Art und Verteilung lichtempfindlicher Kristalle, die spektrale Sensibilisierung, die prinzipielle Reaktionscharakteristik auf Belichtung oder die Stabilität des latenten Bildes. Bei elektronischen Sensoren können Pixelgeometrie, Quanteneffizienz, Ladungskapazität, Dunkelstromverhalten oder bestimmte Rauschquellen zu den material- beziehungsweise bauteilnahen Eigenschaften gerechnet werden.

„Intrinsisch“ bedeutet dabei nicht „vollständig unabhängig“. Auch eine Materialkennlinie ist nur unter definierten Belichtungs- und Entwicklungsbedingungen messbar. Die spektrale Antwort eines Sensors hängt vom gesamten Sensorschichtaufbau einschließlich Farbfiltern und Mikrolinsen ab. Die sichtbare Körnigkeit eines Films hängt vom Prozess und der Vergrößerung ab. Eine ideale Trennung existiert in realen Systemen daher nur näherungsweise.

Die Kategorie bleibt trotzdem nützlich. Sie erlaubt es, diejenigen Eigenschaften zu identifizieren, die bei einem Austausch anderer Komponenten nicht beliebig verschwinden. Wenn dieselbe Emulsion unter kontrollierten Bedingungen wiederholt eine charakteristische spektrale Empfindlichkeit zeigt, ist diese Beobachtung

materialnäher als der Eindruck, ein fertiger Print sei „warm“. DFM verwendet den Begriff deshalb als analytische Ebene, nicht als Behauptung absoluter Isolation.

DFM | BEGRIFF

Intrinsische Materialeigenschaft

Eine Eigenschaft, die primär aus Struktur und Verhalten des Aufzeichnungsmediums hervorgeht und unter definierten Randbedingungen sinnvoll separat beschrieben werden kann. „Intrinsisch“ bedeutet im realen fotografischen System nicht vollständig unabhängig.

2.4 Systemeigenschaften und Emergenz

Eine Systemeigenschaft entsteht aus dem Zusammenwirken mehrerer Komponenten. Systemauflösung ist das offensichtlichste Beispiel: Ein Material kann hohe räumliche Frequenzen übertragen, doch wenn Optik, Fokus, Bewegung oder Ausgabe diese Information begrenzen, erscheint sie im fertigen Bild nicht. Dasselbe gilt für den nutzbaren Tonwertumfang, die wahrgenommene Farbwiedergabe oder den Schärfeeindruck.

Für solche Fälle ist der Begriff Emergenz hilfreich. Eine emergente Eigenschaft entsteht auf der Ebene des Gesamtsystems, obwohl ihre Voraussetzungen in den Einzelkomponenten liegen. Fotografische „Plastizität“ ist dafür ein typisches Wahrnehmungswort. Sie kann aus Übergängen zwischen scharfen und unscharfen Bereichen, Mikrokontrast, Tonwertmodellierung, Aufnahmeformat, Objektivcharakter, Materialstruktur, Ausgabegröße und Betrachtungsabstand entstehen. Keine einzelne dieser Größen enthält die „Plastizität“ als isolierten Parameter.

Das bedeutet nicht, dass Systemeigenschaften beliebig wären. Sie können reproduzierbar, messbar und modellierbar sein. Ihre Ursache liegt nur nicht notwendigerweise an einer einzigen Stelle. Für digitale Materialsysteme ist diese Unterscheidung entscheidend: Ein Modell, das eine emergente Wirkung lediglich als Stilparameter abspeichert, reproduziert möglicherweise ein Erscheinungsbild, aber nicht dessen kausale Struktur.

2.5 Schärfe ist kein Einzelparameter

Schärfe gehört zu den am häufigsten missverstandenen fotografischen Begriffen. Im Alltag bezeichnet sie den Eindruck klarer Details und definierter Kanten. Technisch umfasst dieser Eindruck jedoch mehrere unterschiedliche Größen. Auflösung beschreibt, bis zu welcher räumlichen Frequenz Strukturen noch getrennt oder übertragen werden können. Die Modulationsübertragungsfunktion, MTF, beschreibt dagegen, mit welchem Kontrast verschiedene Ortsfrequenzen übertragen werden. Kantensteilheit, lokaler Kontrast, Korn beziehungsweise Rauschen und digitale Nachschärfung beeinflussen zusätzlich die Wahrnehmung.

Deshalb kann ein Bild mit hoher nomineller Auflösung weich wirken. Eine Optik kann feinste Strukturen noch übertragen, bei mittleren Ortsfrequenzen aber relativ wenig Kontrast liefern. Umgekehrt kann ein Bild mit geringerer echter Detailauflösung durch starke Kantenanhebung sehr scharf erscheinen. Digitale Schärfung kann die Übergänge an Kanten steiler machen, ohne verlorene Motivinformation vollständig zurückzugewinnen.

Auch Betrachtungsbedingungen spielen mit. Ein großer Print aus kurzer Distanz zeigt andere Grenzen als dasselbe Bild auf einem kleinen Display. Was als „scharfer Film“ beschrieben wird, ist daher häufig eine

Zusammenfassung aus Materialauflösung, Kontrastübertragung, Entwicklung, Aufnahmeformat, Vergrößerung und Ausgabe. Für DFM muss der Wahrnehmungsbegriff Schärfe deshalb in mess- oder zumindest beschreibbare Teilursachen zerlegt werden.

DFM | DENKFEHLER

„Dieser Film ist scharf.“

Der Satz kann eine praktische Erfahrung beschreiben, ist technisch aber unterbestimmt. Wahrgenommene Schärfe hängt unter anderem von Optik, Fokus, Bewegung, Materialübertragung, Entwicklung, Korn beziehungsweise Rauschen, Ausgabe und Betrachtung ab.

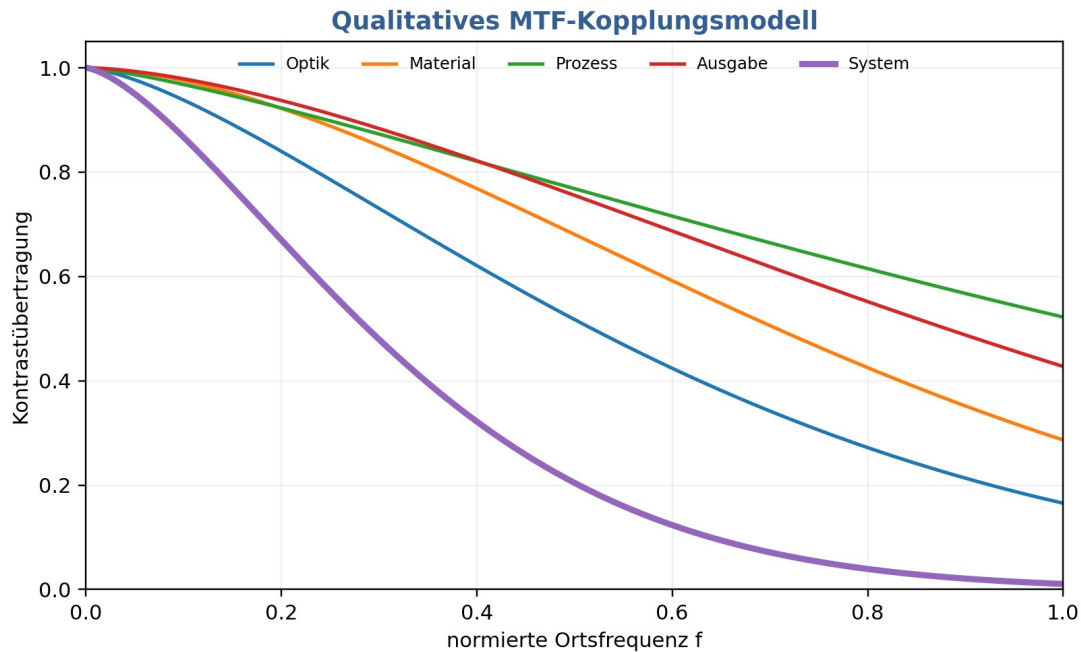
2.6 Filmauflösung ist nicht Systemauflösung

Kapitel 1 hat den Grundsatz bereits eingeführt: Filmauflösung ist nicht Systemauflösung. In Kapitel 2 wird daraus eine Kausalregel. Die räumliche Übertragung eines realen Systems lässt sich im einfachsten linearen Modell als Produkt der Übertragungsfunktionen mehrerer Stufen betrachten. Für eine didaktische Näherung kann geschrieben werden:

$$MTF_System(f) \approx MTF_Optik(f) \times MTF_Material(f) \times MTF_Prozess(f) \times MTF_Ausgabe(f)$$

Dabei bezeichnet f die Ortsfrequenz. Das Produktmodell ist eine bewusste Vereinfachung für weitgehend lineare, separierbare Übertragungsstufen. Reale fotografische Systeme können nichtlinear, ortsabhängig und signalabhängig reagieren. Die Gleichung dient hier deshalb als Strukturmodell: Jede Stufe kann Kontrastübertragung begrenzen, und ein Verlust an einer Stelle wird durch eine nachfolgende Stufe nicht automatisch rückgängig gemacht.

Die aktuelle ISO 12233 beschreibt für digitale Kameras Verfahren zur Messung von Auflösung und räumlicher Frequenzantwort. Für DFM ist daran weniger die konkrete Normprozedur als der systemische Gedanke wichtig: Räumliche Bildqualität wird als übertragene Information verstanden, nicht als einzelne Megapixel- oder Linienzahl.



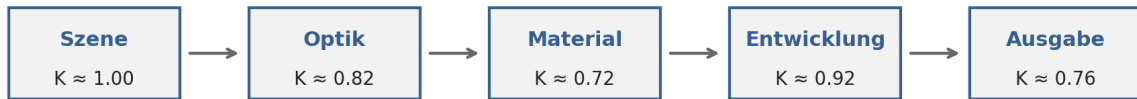
DATA 2.3 - Qualitatives MTF-Kopplungsmodell. Die Kurven sind synthetisch; sie zeigen ausschließlich, wie mehrere begrenzende Übertragungsstufen zu einer niedrigeren Systemantwort führen können.

2.7 Kontrast und Tonwertwiedergabe

Auch „Kontrast“ bezeichnet mehrere Ebenen. Der Motivkontrast entsteht in der Szene aus Beleuchtung und Reflexion. Die Optik kann diesen Kontrast durch Streulicht und Abbildungsfehler reduzieren. Das Material reagiert mit einer charakteristischen Beziehung zwischen Belichtung und resultierendem Signal beziehungsweise optischer Dichte. Die Entwicklung verändert bei chemischen Materialien unter anderem die Steigung dieser Beziehung; digitale Prozesse verändern Tonwertkurven, lokale Kontraste und Signaltransformationen. Schließlich begrenzt die Ausgabe, welche Helligkeits- oder Dichteunterschiede sichtbar werden.

Bei klassischer sensitometrischer Betrachtung wird die Beziehung zwischen logarithmischer Belichtung und Dichte über die charakteristische Kurve beschrieben. Ihre Bereiche werden traditionell als Toe, annähernd geradliniger Bereich und Shoulder bezeichnet. Diese Begriffe sind nützlich, weil sie verdeutlichen, dass Schatten, Mitteltöne und Lichter nicht identisch reagieren. Für DFM reicht an dieser Stelle die Erkenntnis: Der fertige Tonwertverlauf ist nicht allein die Kennlinie des Materials. Er ist Ergebnis aus Szene, Belichtung, Materialreaktion, Entwicklung und Ausgabe.

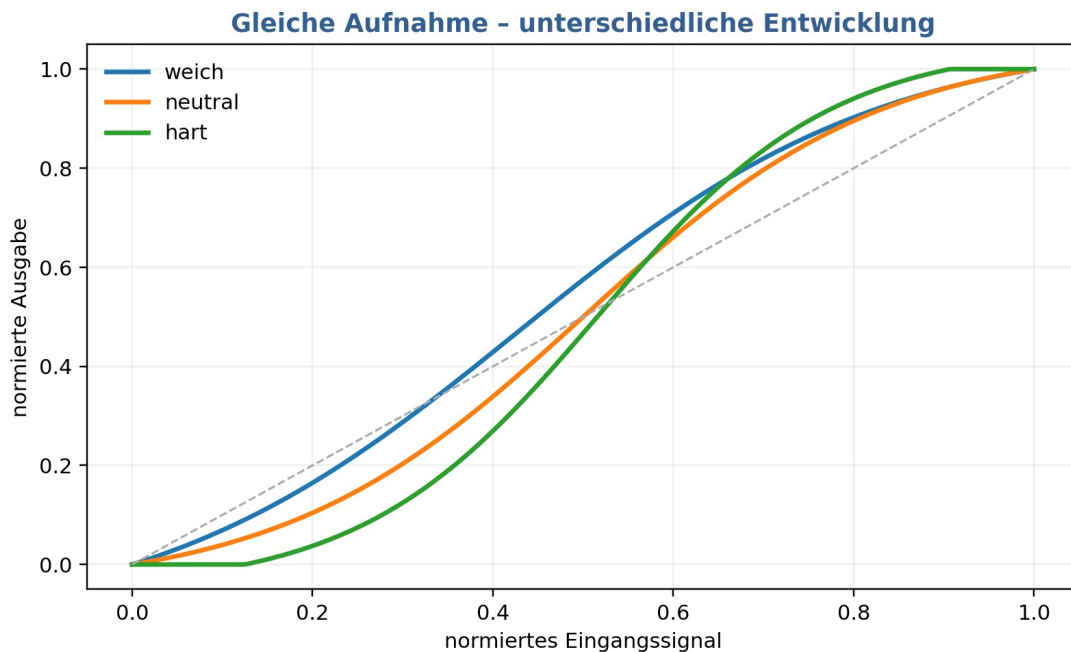
Wenn daher von einem „kontrastreichen Film“ gesprochen wird, muss gefragt werden, ob eine Materialkennlinie unter standardisiertem Prozess gemeint ist, ein konkretes Negativ nach einer bestimmten Entwicklung oder lediglich der Eindruck eines fertigen Prints. Erst diese Präzisierung macht den Begriff technisch belastbar.



Kontrast wird entlang der Kette übertragen, verändert und begrenzt.

Werte nur didaktisch; keine Messdaten.

SYSTEM 2.4 - Wo entsteht Kontrast? Die angegebenen K-Werte sind rein didaktisch. Entscheidend ist die Kette: Motivkontrast wird durch Optik, Material, Entwicklung und Ausgabe jeweils übertragen beziehungsweise verändert.



COMPARE 2.5 - Gleiche Aufnahme, unterschiedliche Entwicklung. Die synthetischen Kurven zeigen exemplarisch, wie verschiedene Transformationen aus demselben Eingangssignal unterschiedliche Tonwertwirkungen erzeugen können.

2.8 Farbe als Systemantwort

Farbe ist besonders anfällig für vereinfachende Zuschreibungen. Ein Farbfilm besitzt zweifellos materialspezifische spektrale Empfindlichkeiten und Farbstoffbildungsmechanismen. Ein digitaler Sensor besitzt eine spektrale Antwort, die unter anderem durch Photodioden, Farbfilter und weitere Schichten geprägt wird. Das sichtbare Farbergebnis entsteht jedoch erst, wenn diese Eigenschaften mit dem Spektrum der Beleuchtung und einer Verarbeitungskette zusammentreffen.

Bei analogem Farbmateriale gehören Entwicklung, Maskierung, Kopier- oder Scanprozess und Zielmedium zur Farbwiedergabe. Im Digitalen kommen Demosaicing, Farbmatrix, Weißabgleich, Ton- und Gamut-

Transformationen, Farbprofile und das Display hinzu. Zwei Konverter können aus denselben RAW-Daten unterschiedliche Farbresultate erzeugen, ohne dass sich am Sensor etwas geändert hätte.

DFM behandelt „Farbcharakter“ deshalb als Systemantwort. Materialeigenschaften sind darin enthalten, aber nicht mit dem endgültigen Farbeindruck identisch. Für historische Rekonstruktionen ist das besonders wichtig: Ein digitalisierter historischer Film ist bereits durch Alterung, Scanner, Profilierung und die moderne Anzeige vermittelt. Wer daraus direkt auf die ursprüngliche Emulsion schließt, muss diese zusätzlichen Übertragungsschritte berücksichtigen.

2.9 Korn und Rauschen

Analoge Körnigkeit und digitales Rauschen können beide als stochastische Bildstrukturen sichtbar werden, sind aber physikalisch nicht dasselbe. Fotografisches Korn entsteht im Zusammenhang mit lichtempfindlichen Kristallen, deren Entwicklung und der daraus resultierenden Dichteverteilung. Sichtbare Körnigkeit ist ein Wahrnehmungsphänomen, das durch Material, Entwicklung, Vergrößerung und Betrachtung beeinflusst wird.

Bei digitalen Sensoren entstehen Rauschanteile aus anderen Mechanismen. Dazu gehören unter anderem Photonenrauschen, Dunkelstromrauschen, Ausleserauschen, Quantisierung und feste Muster. ISO 15739 behandelt Mess- und Berichtsverfahren für Rauschen und Dynamikumfang digitaler Kameras und unterscheidet entsprechend zwischen verschiedenen Rauschbeiträgen. Eine direkte Gleichsetzung von Korn und Sensorrauschen würde diese physikalischen Unterschiede verwischen.

Für DFM ist aber eine funktionale Vergleichsebene sinnvoll. Beide Phänomene beeinflussen die Sichtbarkeit feiner Details, gleichmäßiger Flächen und Tonübergänge. Beide können außerdem durch nachgelagerte Prozesse verstärkt oder abgeschwächt werden. Ein Materialmodell darf deshalb stochastische Struktur als gemeinsame Modellkategorie führen, muss aber die jeweilige Ursache und Statistik verfahrensspezifisch behandeln.

2.10 Vom Materialcharakter zum Systemcharakter

Für die weitere Arbeit führt DFM drei Ebenen ein. Materialcharakter bezeichnet Eigenschaften, die primär aus dem Aufzeichnungsmedium hervorgehen. Prozesscharakter bezeichnet Eigenschaften, die vor allem durch Entwicklung, Digitalisierung oder Ausgabe geprägt werden. Systemcharakter bezeichnet wiederkehrende Wirkungen, die erst aus der Kombination dieser Ebenen entstehen.

Diese Dreiteilung verhindert zwei Extreme. Einerseits wäre es falsch, dem Material jede Eigenart abzusprechen: Spektrale Antwort, Tonwertverhalten oder stochastische Struktur können eindeutig materialspezifisch sein. Andererseits wäre es ebenso falsch, das fertige Bild als direkte Sichtbarmachung dieser Eigenschaften zu behandeln. Zwischen beidem liegen Transformationen.

Die Einteilung ist bewusst funktional. Ein einzelner Parameter kann je nach System an einer anderen Stelle liegen. Bei einem klassischen Negativprozess ist die chemische Entwicklung eine separate Stufe. Bei manchen digitalen Kameras findet ein Teil der Signalverarbeitung bereits sensor- oder kameranah statt. Entscheidend ist weniger die physische Verpackung als die Frage, welche Transformation kausal welchen Anteil an der Bildwirkung erzeugt.

2.11 Messbare und wahrnehmbare Eigenschaften

Technische Fotografie benötigt Messgrößen, doch Bilder werden von Menschen betrachtet. DFM trennt deshalb messbare und wahrnehmbare Eigenschaften, ohne eine Seite gegen die andere auszuspielen. Messbar sind beispielsweise optische Dichte, spektrale Empfindlichkeit, Signal-Rausch-Verhältnis, MTF, Farbkoordinaten oder bestimmte Formen der Körnigkeit. Wahrnehmungsbegriffe lauten dagegen „weich“, „hart“, „plastisch“, „ruhig“, „warm“ oder „körnig“.

Wahrnehmungsbegriffe sind nicht unbrauchbar. Sie weisen häufig auf reale Kombinationen messbarer Faktoren hin. Das Problem entsteht erst, wenn ein subjektiver Eindruck wie ein einzelner technischer Parameter behandelt wird. „Warm“ kann eine Verschiebung des Weißpunktes, veränderte relative Sättigung, spektrale Selektivität, Papierfarbe oder Umgebungslicht meinen. „Ruhig“ kann mit niedriger sichtbarer Körnigkeit, weichen Tonwertübergängen und geringer lokaler Schärfung zusammenhängen.

Die methodische Aufgabe besteht deshalb darin, Wahrnehmungssprache in Hypothesen über technische Ursachen zu übersetzen. Ein solcher Übersetzungsschritt darf Unsicherheit enthalten. Er ist besser als eine Scheingenauigkeit, die eine ästhetische Kategorie direkt in einen Materialparameter verwandelt.

2.12 Kausalität statt Stilbeschreibung

Ein Stilbegriff beschreibt, was wir sehen. Ein Kausalmodell versucht zu erklären, warum wir es sehen. Für DFM ist diese Verschiebung entscheidend. Die Aussage „Das Bild wirkt alt“ ist als Beobachtung zulässig, liefert aber noch kein technisches Modell. Erst die Zerlegung in mögliche Ursachen macht die Aussage prüfbar.

Eine historische Wirkung kann etwa aus eingeschränkter spektraler Sensibilisierung, niedrigem oder ungleichmäßigem Mikrokontrast, charakteristischen Aberrationen, einer spezifischen Tonwertkennlinie, Prozessartefakten, geringer Reproduktionsqualität oder einem bestimmten Ausgabe- und Betrachtungsmedium entstehen. Manche dieser Ursachen sind dokumentiert, andere nur wahrscheinlich. Der Begriff „alt“ verschmilzt sie zu einem Gesamteindruck.

Digitale Rekonstruktion sollte diesen Gesamteindruck nicht einfach als Zielbild behandeln. Wenn nur ein Preset auf einen fertigen Datensatz angewendet wird, kann die Oberfläche stimmen, während interne Abhängigkeiten falsch bleiben. Ein Gesicht, Himmel und Vegetation reagieren dann möglicherweise identisch auf dieselbe globale Farbanpassung, obwohl ein historisches Material aufgrund seiner spektralen Empfindlichkeit unterschiedliche Motivfarben anders gewichtet hätte. Kausalität bedeutet hier: Die Transformation soll dort ansetzen, wo die historische oder technische Ursache liegt.

Ein ähnliches Bild ist noch kein ähnlicher fotografischer Prozess.

2.13 Die DFM-Eigenschaftsmatrix

Die Eigenschaftsmatrix ist ein Arbeitsinstrument, kein Naturgesetz. Sie ordnet sichtbare Merkmale den Systemstufen zu, die typischerweise Einfluss nehmen können. Ihr wichtigster Zweck besteht darin, monokausale Zuschreibungen zu verhindern. Wenn eine Beobachtung mehrere Spalten berührt, muss eine Rekonstruktion konkurrierende Ursachen prüfen.

Bei Auflösung sind beispielsweise Optik, Material, Entwicklung, Ausgabe und Aufnahmebedingungen relevant. Farbe wird stark von Licht, Material, Verarbeitung und Ausgabe beeinflusst. Vignettierung ist häufig optikdominiert, kann aber auch durch digitale Korrektur, Scan oder Ausgabe verändert werden. Schärfeeindruck liegt geradezu quer über der gesamten Kette.

Die Einträge hoch, mittel und gering sind deshalb keine universellen Zahlenwerte. Sie dienen als Prüfhinweise. Für ein konkretes Verfahren kann eine Spalte deutlich wichtiger oder nahezu irrelevant sein. Genau diese Abweichung muss dokumentiert werden. Die Matrix wird in späteren Kapiteln verfahrensspezifisch verfeinert.

DFM-Eigenschaftsmatrix · H = hoher, M = mittlerer, G = geringer typischer Einfluss

	Szene	Optik	Material	Entwicklung	Ausgabe	Betrachtung
Auflösung	M	H	H	M	H	M
Kontrast	H	M	M	H	H	M
Tonwert	H	G	H	H	H	M
Farbe	H	M	H	H	H	H
Korn / Rauschen	G	G	H	M	M	M
Vignettierung	G	H	G	G	M	G
Verzeichnung	G	H	G	G	M	G
Schärfeeindruck	M	H	H	H	H	H

Qualitative Orientierung – verfahrensabhängig, nicht universell.

SYSTEM 2.6 - DFM-Eigenschaftsmatrix. H, M und G kennzeichnen typische qualitative Einflussstärken. Die Matrix ist kein universelles Messmodell; für jedes historische oder moderne Verfahren muss sie anhand von Evidenz angepasst werden.

Bildmerkmal	Material	Optik	Entwicklung	Ausgabe
Auflösung	hoch	hoch	mittel	hoch
Kontrast	mittel	mittel	hoch	hoch
Farbe	hoch	gering-mittel	hoch	hoch
Körnigkeit	hoch	gering	mittel	hoch
Vignettierung	gering	hoch	gering	mittel

Tabelle 2.1 - Bildmerkmale und mögliche Ursachen. Die Einstufungen sind qualitative Orientierungen und verfahrensabhängig; sie dürfen nicht als universelle quantitative Gewichtungen verwendet werden.

2.14 Historische Rekonstruktion

Historische Fotografie liegt uns häufig nicht als ursprüngliches System, sondern als Kette von Reproduktionen vor. Ein Glasnegativ kann auf Papier kopiert, später reproduziert, gescannt, komprimiert und auf einem modernen Display betrachtet worden sein. Jede Stufe verändert die Beobachtbarkeit ursprünglicher Eigenschaften. Ein weich erscheinendes digitales Reprobuild beweist deshalb nicht, dass die historische Emulsion oder Optik weich war.

Für eine belastbare Rekonstruktion müssen Quellenebenen getrennt werden. Zeitgenössische technische Beschreibungen können Hinweise auf Material und Prozess geben. Erhaltene Originalobjekte zeigen reale Resultate, sind aber möglicherweise gealtert. Moderne Scans erlauben Analyse, enthalten jedoch die Charakteristik des Digitalisierungsprozesses. Vergleichsversuche können Hypothesen prüfen, sind aber Rekonstruktionen und keine Primärquellen.

Historische Kohärenz bedeutet deshalb mehr als das Auswählen eines passenden Filmnamens. Optik, Material, Entwicklung, Ausgabe und Betrachtung müssen zeitlich und technisch zusammenpassen, wenn eine historisch plausible Systemantwort angestrebt wird. Ein Materialmodell von 1925, kombiniert mit moderner Überschärfung und heutiger Farbinterpretation, ist ein legitimes Hybridmodell - aber keine historisch kohärente Rekonstruktion.

2.15 Digitale Rekonstruktion

Für digitale Materialsysteme ergibt sich daraus eine klare Architekturentscheidung. Ein Modell sollte nicht lediglich eine Zielästhetik mit einem Schalter wie „historical_look = true“ aktivieren. Eine solche Abkürzung wäre für ein Presetsystem ausreichend, nicht aber für ein kausal strukturiertes Materialmodell.

Stattdessen werden Teilmodelle unterschieden: Ein Optikmodell beschreibt räumliche Abbildungseigenschaften, ein Materialmodell die Aufzeichnungsantwort, ein Entwicklungsmodell die Transformation des latenten oder digitalen Zwischenzustands, ein Ausgabemodell die Zielwiedergabe. Kontext kann Parameter liefern, darf aber die dokumentierte Szene nicht überschreiben. In dieser Struktur können einzelne Komponenten ausgetauscht und gegeneinander getestet werden.

Eine solche Modularität ermöglicht auch Hybridexperimente. Man kann ein historisch rekonstruiertes Material mit moderner Optik kombinieren, wenn dieser Eingriff ausdrücklich markiert wird. Der wissenschaftliche Gewinn liegt darin, dass die Veränderung einer Komponente beobachtbar wird. Genau darin unterscheidet sich ein Forschungsmodell von einer reinen Stilbibliothek.

```
reconstruction:
  optical_model: separate
  material_model: separate
  development_model: separate
  output_model: separate
  context_model: evidence_bound
```

Das Schema ist bewusst synthetisch und didaktisch. Es beschreibt keine produktive Implementierung und enthält keine internen Parameter einer Referenzanwendung.

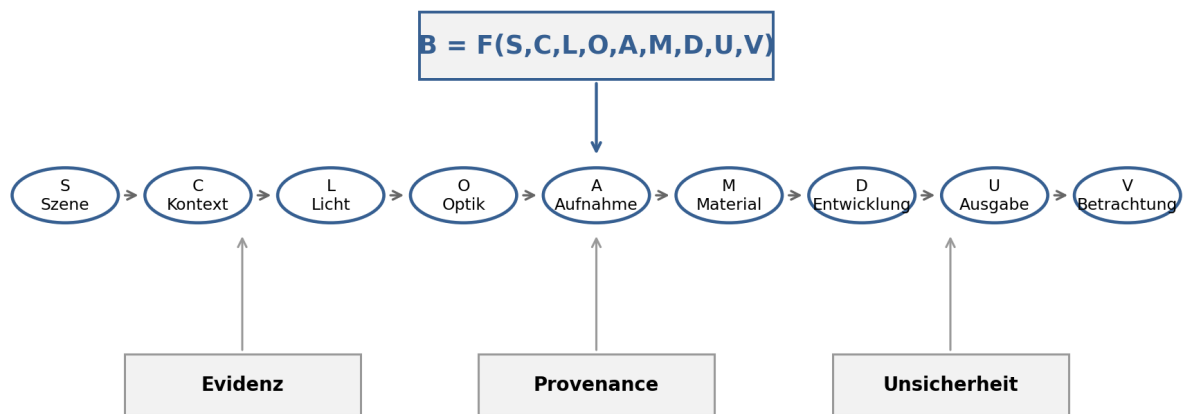
2.16 Das DFM-Kausalmodell

Das Referenzmodell aus Kapitel 1 beschreibt die Reihenfolge der fotografischen Systemstufen. Für die Analyse der Ursachen braucht DFM zusätzlich eine abstrakte Kausalnotation. Das beobachtete Bild B wird als Funktion mehrerer Einflussgrößen verstanden:

$$B = F(S, C, L, O, A, M, D, U, V)$$

B bezeichnet das beobachtete Bild. S steht für die Szene, C für Kontext, L für Licht und Atmosphäre, O für Optik, A für Aufnahme, M für Material, D für Entwicklung, U für Ausgabe und V für Betrachtung. Diese Gleichung ist keine konkrete Bildberechnung. Sie beschreibt eine Abhängigkeitsstruktur: Änderungen an mehreren Stellen können dieselbe beobachtbare Wirkung beeinflussen.

Das Modell erlaubt deshalb keine automatische Rückrechnung von B auf genau einen Parameter. Ein flauer Kontrast kann beispielsweise aus O, M, D oder U stammen. Für die Ursache braucht es zusätzliche Evidenz, kontrollierte Experimente oder Provenance-Informationen.



Kausalstruktur statt Stil-Label: Jede beobachtete Wirkung wird auf mögliche Ursachen zurückgeführt.

SYSTEM 2.7 - DFM-Kausalmodell. Die Prozesskette wird um Evidenz, Provenance und Unsicherheit ergänzt. Das Modell zwingt dazu, beobachtete Bildwirkungen als Ergebnis mehrerer möglicher Ursachen zu behandeln.

2.17 Evidenz, Unsicherheit und Provenance

Eine Kausalzuordnung ist nur so belastbar wie ihre Evidenz. Die Aussage „Diese Farbverschiebung stammt von der Emulsion“ kann direkt aus einer technischen Primärquelle hervorgehen, durch unabhängige Fachliteratur gestützt, in einem kontrollierten Experiment gemessen, aus mehreren Indizien rekonstruiert oder lediglich eine plausible Hypothese sein. Diese Fälle dürfen im Buch nicht gleich behandelt werden.

DFM verwendet deshalb die Evidenzklassen A bis E: primär dokumentiert, sekundär dokumentiert, gemessen, rekonstruiert und hypothetisch. Die Klassen sind kein Ranking der Bedeutung, sondern beschreiben die Herkunft

des Wissens. Eine rekonstruierte Aussage kann fachlich sehr wertvoll sein, solange sie nicht als dokumentierte Tatsache ausgegeben wird.

Provenance ergänzt diese Ebene. Für Messwerte, Bildbeispiele und Modellparameter muss nachvollziehbar sein, aus welcher Quelle sie stammen, welche Version verwendet wurde und welche Transformationen bereits stattgefunden haben. Unsicherheit wird explizit benannt. Gerade bei historischen Systemen ist ein Bereich mit begründeter Unsicherheit wissenschaftlich sauberer als ein auf drei Dezimalstellen präziser Wert ohne belastbare Herkunft.

DFM | PERSPEKTIVE

Von der Eigenschaft zur Kausalstruktur

Ein digitales Materialsystem muss nicht nur beschreiben, wie ein Bild aussieht. Es muss nachvollziehbar machen, welche Komponente welche Wirkung erzeugen soll, unter welchen Bedingungen dies gilt und mit welcher Evidenz die Zuordnung belegt ist.

2.18 Vom beobachteten Bild zum formalen Materialmodell

Die bisherige Analyse führt zu einer praktischen Konsequenz: Ein digitales Materialprofil sollte nicht mit einer Liste ästhetischer Adjektive beginnen, sondern mit technisch oder funktional beschreibbaren Eigenschaftsklassen. Dazu gehören spektrales Verhalten, Tonwertantwort, räumliche Übertragung, stochastische Struktur, Prozessabhängigkeit und zeitliche Stabilität. Diese Kategorien können später durch Messdaten, rekonstruierte Parameterbereiche und Evidenzangaben ergänzt werden.

Ein minimales didaktisches Schema könnte beispielsweise Materialklasse, synthetische spektrale Antwort, charakteristische Tonwertkurve, räumliche Übertragung und illustrative Kornstruktur getrennt benennen. Entscheidend ist die Trennung der Ebenen. Das Profil beschreibt nicht automatisch Optik, Entwicklung oder Ausgabe, sofern diese als eigene Module geführt werden.

Damit entsteht eine technische Sprache, in der ein historisches Material nicht als „Vintage-Look“, sondern als Satz prüfbarer Annahmen repräsentiert wird. Manche dieser Annahmen können später ausführbar werden. Andere bleiben dokumentarische Metadaten oder Unsicherheitsintervalle. Das Ziel ist nicht, jede historische Fotografie mathematisch vollständig vorherzusagen. Ziel ist ein Modell, das weiß, was es behauptet - und was nicht.

2.18.1 Synthetisches Materialbeispiel

```
material:
  id: DFM-DEMO-MONO-01
  class: monochrome_negative

  spectral_response:
    type: synthetic_example
```

```

tonal_response:
  type: characteristic_curve

spatial_response:
  type: illustrative

stochastic_structure:
  type: illustrative_grain

```

Dieses Schema ist ein didaktisches Beispiel und weder ein historisch vollständiges noch ein produktiv verwendetes Materialprofil. Werte, Gewichtungen, Kalibrierungslogik und produktive Emulsionsprofile einer Referenzimplementierung sind ausdrücklich nicht Bestandteil dieses Buchmodells.

2.18.2 Öffentliche Modellgrenze

DFM beschreibt öffentliche Fachmodelle. Diese können Prinzipien, Datentypen, Evidenzklassen und experimentelle Methoden offenlegen, ohne daraus die vollständige produktive Implementierung abzuleiten. Für die praktische Referenzanwendung gilt deshalb weiterhin: PUBLIC MODEL $\neq$ PRODUCTION MODEL.

LichtRolle kann später als Referenzimplementierung dienen, in der Material-, Optik-, Entwicklungs- und Kontextinformationen getrennt verwaltet und in einer kontrollierten Entwicklung zusammengeführt werden. Diese Erwähnung dient der methodischen Veranschaulichung und nicht der Produktdokumentation.

2.19 Zusammenführung und Übergang zum nächsten Kapitel

Kapitel 2 verschiebt den Blick vom Erscheinungsbild zur Ursache. Ein Material besitzt charakteristische Eigenschaften, aber das sichtbare Bild entsteht aus einer gekoppelten Kette. Schärfe, Kontrast, Farbe, Körnigkeit und Tonwert sind deshalb häufig Systemantworten. Eine technisch belastbare Rekonstruktion muss zunächst fragen, welche Komponenten beteiligt sind, bevor sie eine Eigenschaft dem Material zuschreibt.

Diese Trennung ist die Voraussetzung für alles Weitere. Wenn Materialcharakter, Prozesscharakter und Systemcharakter nicht auseinandergehalten werden, lassen sich historische Verfahren zwar stilistisch imitieren, aber kaum miteinander vergleichen. Ebenso wenig lässt sich ein digitales Materialmodell verifizieren, wenn nicht klar ist, welcher Parameter welche Wirkung verursachen soll.

Damit stellt sich die nächste Frage zwangsläufig: Wenn Materialeigenschaften nicht einfach aus dem fertigen Bild abgelesen werden dürfen, wie können sie objektiver beschrieben und gemessen werden? Empfindlichkeit, optische Dichte, charakteristische Kennlinien, spektrales Verhalten, räumliche Übertragung und weitere Messgrößen bilden den nächsten Schritt. Erst aus solchen Größen entsteht ein Materialprofil, das nicht nur plausibel aussieht, sondern technisch begründet ist.

DFM | GRUNDSATZ

DFM-Arbeitsregel

Keine sichtbare Eigenschaft wird einer Einzelkomponente zugeschrieben, solange konkurrierende Systemursachen nicht geprüft wurden. Diese Regel gilt besonders für historische Rekonstruktionen und für

die Bewertung digitaler Materialmodelle.

Quellen und weiterführende Literatur

- [1] Allen, Elizabeth; Triantaphillidou, Sophie (Hrsg.): The Manual of Photography. 10. Auflage. Focal Press / Elsevier, 2011. ISBN 978-0-240-52037-7.
- [2] Stroebel, Leslie D.; Compton, John; Current, Ira; Zakia, Richard D.: Basic Photographic Materials and Processes. 2. Auflage. Focal Press, 2000. ISBN 978-0-240-80405-7.
- [3] Eastman Kodak Company: Basic Photographic Sensitometry Workbook. Publication H-740, November 2006.
- [4] ISO 12233:2024: Digital cameras - Resolution and spatial frequency responses. 5. Ausgabe. ISO/TC 42, 2024.
- [5] ISO 15739:2023: Photography - Electronic still-picture imaging - Noise measurements. 4. Ausgabe. ISO/TC 42, 2023.
- [6] Holst, Gerald C.; Lomheim, Terrence S.: CMOS/CCD Sensors and Camera Systems. 2. Auflage. JCD Publishing / SPIE Press, 2011. ISBN 978-0-8194-8653-0.
- [7] Giorgianni, Edward J.; Madden, Thomas E.: Digital Color Management: Encoding Solutions. 2. Auflage. John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-51244-9.
- [8] Sharma, Gaurav (Hrsg.): Digital Color Imaging Handbook. CRC Press, 2003. DOI 10.1201/9781420041484.
- [9] Barrett, Harrison H.; Myers, Kyle J.: Foundations of Image Science. Wiley, 2004/2013 edition. ISBN 978-1-118-77277-5.
- [10] ISO 14524:2009: Photography - Electronic still-picture cameras - Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs). ISO/TC 42.

Redaktionelle Evidenznotiz zu Kapitel 2

Kapitel 2 verbindet etablierte Grundlagen der fotografischen Sensitometrie, Bildwissenschaft, Optik, Sensorik und Farbwiedergabe mit der DFM-eigenen methodischen Trennung zwischen intrinsischen Materialeigenschaften, Prozesscharakter und Systemeigenschaften. Die DFM-Eigenschaftsmatrix und das DFM-Kausalmodell sind Arbeitsmodelle dieses Buches; sie werden ausdrücklich nicht als historische Normmodelle ausgegeben. Synthetische Diagramme sind als solche gekennzeichnet und enthalten keine Messwerte realer Produkte.

PUBLIC MODEL $\neq$ PRODUCTION MODEL

Keine produktiven LichtRolle-Prompts, Gewichtungen, Kalibrierparameter, Scoring-Algorithmen, Providerlogik, Security-Architektur oder produktiven Emulsionsprofile sind Bestandteil dieses Kapitels.