

03

Wie lässt sich fotografisches Material messen?

Sensitometrie, Kennlinien und messbare Materialeigenschaften

DFM-CHAPTER 03 · VERSION 1.0 · Produktionsfassung auf Basis DFM-FORMAT-SPEC

Kapitel 2 hat gezeigt, dass eine sichtbare Bildwirkung nicht automatisch eine Materialeigenschaft ist. Kapitel 3 geht deshalb einen Schritt weiter: Es fragt, wie fotografische Materialien überhaupt so beschrieben werden können, dass aus Aussagen wie ‚feinkörnig‘, ‚empfindlich‘ oder ‚kontrastreich‘ technisch belastbare Merkmale entstehen. Im Mittelpunkt stehen Sensitometrie, Belichtung, optische Dichte, charakteristische Kennlinien, Empfindlichkeit, spektrale Antwort, räumliche Auflösung, MTF, Korn, digitales Rauschen, Signal-Rausch-Verhältnis, Dynamikumfang und grundlegende Farbmessung. Ebenso wichtig wie der Zahlenwert sind Messverfahren, Bedingungen, Unsicherheit, Evidenz und Provenance. Damit bildet dieses Kapitel die methodische Brücke von der qualitativen Systemanalyse zu einem formalisierten Materialprofil. Ein Material wird nicht als Look beschrieben, sondern als strukturierter Satz von Eigenschaften, deren Bedeutung und Gültigkeitsbereich nachvollziehbar dokumentiert sind.



Aus „feinkörnig“ wird erst durch Definition und Messkontext eine technische Aussage.

SYSTEM 3.1 – Vom fotografischen Eindruck zum Messwert. Die Darstellung zeigt die methodische Kette, mit der DFM Wahrnehmungsbegriffe in definierte und dokumentierte Materialeigenschaften überführt. Diagramm: didaktische Darstellung, keine Messdaten.

3.1 Vom Eindruck zum Messwert

Ein Schwarzweißfilm wird in einem Datenblatt, einem Laborbericht oder einer fotografischen Diskussion schnell mit vier Wörtern beschrieben: empfindlich, feinkörnig, scharf und kontrastreich. Für die Praxis können solche Begriffe nützlich sein. Sie verdichten Erfahrung in eine Sprache, die Fotografen intuitiv verstehen. Für ein digitales fotografisches Materialsystem reichen sie jedoch nicht aus. „Feinkörnig“ ist ohne Vergrößerungsmaßstab, Messverfahren und Prozesszustand unbestimmt. „Scharf“ kann Materialauflösung, Kontrastübertragung, Kantenwirkung oder bloß den Eindruck eines stark nachgeschärften Scans meinen. „Empfindlich“ ist ohne Normbezug ebenfalls keine vollständige technische Aussage.

Kapitel 2 hat gezeigt, dass solche sichtbaren Eigenschaften häufig aus mehreren Stufen des Systems entstehen. Kapitel 3 ändert deshalb die Perspektive. Es fragt nicht zuerst, wie ein Material aussieht, sondern welche Eigenschaften sich definieren, messen und unter kontrollierten Bedingungen vergleichen lassen. Dabei entsteht eine wichtige Trennung: Ein Messwert ist nicht automatisch „wahrer“ als eine visuelle Beobachtung. Er ist nur präziser, wenn klar ist, welche Größe er beschreibt und unter welchen Bedingungen er erhoben wurde.

Ein gutes Messsystem macht aus einem Eindruck keine scheinbar exakte Zahl, sondern aus einer Frage eine reproduzierbare Operation. Aus „Der Film ist kontrastreich“ wird beispielsweise: Welche Beziehung besteht zwischen logarithmischer Belichtung und resultierender optischer Dichte bei einem definierten Film-Prozess-System? Aus „Der Film löst fein auf“ wird: Wie verändert sich die Kontrastübertragung mit steigender Ortsfrequenz und welchem Testkontrast? Aus „Der Sensor rauscht wenig“ wird: Wie hoch sind Signal-Rausch-Verhältnis und Rauschanteile bei definierter Belichtung, Temperatur, Verarbeitung und Ausgabestufe?

DFM versteht Messung deshalb als Übersetzungsprozess zwischen Beobachtung und formaler Beschreibung. Erst wenn eine Eigenschaft operationalisiert ist, kann sie Bestandteil eines Materialprofils werden. Dieser Schritt ist grundlegend, weil spätere digitale Modelle nur dann nachvollziehbar sind, wenn ihre Parameter auf dokumentierten Begriffen, Messungen oder eindeutig gekennzeichneten Rekonstruktionen beruhen.

3.2 Was bedeutet Messen?

Messen bedeutet, einer definierten Größe nach einem festgelegten Verfahren einen Wert zuzuordnen. In der einfachsten Form wird ein Ergebnis häufig als Zahlenwert mit Einheit dargestellt. Für DFM ist das zu wenig. Ein belastbarer Messdatensatz besteht mindestens aus Messgröße, Zahlenwert, Einheit oder normierter Darstellung, Verfahren, Randbedingungen, Unsicherheit, Quelle und Version. Fehlt einer dieser Bausteine, kann der Wert zwar informativ sein, seine Vergleichbarkeit bleibt jedoch eingeschränkt.

Eine allgemeine Darstellung lautet:

$$x = x_{\text{mess}} \pm u$$

Dabei bezeichnet x die betrachtete Messgröße, x_{mess} den ermittelten Wert und u die zugehörige Unsicherheitsangabe. Die Formel ist bewusst allgemein. Sie sagt noch nichts darüber, wie u bestimmt wird; sie erinnert lediglich daran, dass ein Messwert ohne Unsicherheitskontext unvollständig ist.

DFM | GRUNDSATZ

Messwert und Messbedingungen

Ein Messwert ohne Messbedingungen ist keine vollständige Materialeigenschaft. Verfahren, Randbedingungen, Unsicherheit, Quelle und Version gehören zur technischen Aussage.

3.3 Sensitometrie als Messdisziplin der Fotografie

Sensitometrie ist die technische Untersuchung der Empfindlichkeit und Reaktion fotografischer Materialien auf definierte Belichtung. Eastman Kodak beschreibt Sensitometrie in seinem Basic Photographic Sensitometry Workbook als Wissenschaft vom Messen der Empfindlichkeit fotografischer Materialien und stellt sie zugleich als Werkzeug zur Kontrolle von Belichtung und Verarbeitung dar. Historisch gehört sie zu den zentralen Methoden, mit denen fotografische Materialien nicht nur visuell, sondern quantitativ charakterisiert wurden.

Der typische sensitometrische Gedankengang ist einfach: Ein Material erhält eine Reihe definierter Belichtungen. Nach einer definierten Verarbeitung wird für jede Stufe die resultierende optische Dichte gemessen. Aus der Beziehung zwischen Belichtung und Dichte entsteht eine Kennlinie. Ihre Form erlaubt Aussagen über Empfindlichkeit, Gradation, nutzbare Belichtungsbereiche und Prozessverhalten. Das Verfahren ist deshalb zugleich Material- und Prozessanalyse: Ein Schwarzweißnegativefilm ohne Angabe des Entwicklungsprozesses ist sensitometrisch nicht vollständig beschrieben.

Das ist für DFM besonders relevant. Ein digitales Materialprofil soll nicht eine vermeintlich „absolute“ Filmcharakteristik speichern, sondern Eigenschaften mitsamt ihrem Gültigkeitsbereich. Kennlinien, spektrale Antworten oder räumliche Übertragungsfunktionen werden dadurch zu versionierten, quellengebundenen Bestandteilen eines Materialmodells. Sensitometrie liefert dafür ein historisch gewachsenes methodisches Vorbild: definierte Eingabe, kontrollierter Prozess, messbare Ausgabe und dokumentierte Interpretation.



Messkette: Jeder Schritt gehört zur Provenance des resultierenden Messwerts.

SYSTEM 3.3 – Sensitometrische Messkette. Definierte Belichtung, kontrollierte Verarbeitung und Dichtemessung bilden gemeinsam den Messpfad. Jeder Schritt muss dokumentiert werden.

DFM | BEGRIFF

Sensitometrie

Technische Untersuchung der Reaktion fotografischer Materialien auf definierte Belichtung. In DFM dient Sensitometrie als methodisches Vorbild für die Verbindung von Messgröße, Prozessbedingungen und

interpretierbarer Kennlinie.

3.4 Belichtung und logarithmische Darstellung

Die fotografische Reaktion beginnt mit Belichtung. In einer einfachen photometrischen Darstellung kann Belichtung als Produkt aus Beleuchtungsstärke und Zeit geschrieben werden. In radiometrischen Zusammenhängen werden entsprechend Bestrahlungsstärke und Bestrahlung verwendet. Die gemeinsame Struktur lautet:

$$H = E \cdot t$$

H bezeichnet die Belichtung, E die jeweils definierte Beleuchtungs- oder Bestrahlungsgröße und t die Belichtungszeit. Photometrische und radiometrische Größen dürfen dabei nicht ohne Weiteres vermischt werden. Für spektral selektive Materialien ist nicht nur die Gesamtenergie, sondern auch ihre Verteilung über die Wellenlänge relevant.

Fotografische Kennlinien verwenden häufig $\log H$ statt H. Die logarithmische Achse komprimiert große Belichtungsbereiche und macht multiplikative Belichtungsänderungen als additive Abstände sichtbar. Das entspricht der praktischen Fotografie, in der Belichtungsstufen durch Faktoren beschrieben werden. Die Logarithmierung ist damit nicht nur historische Konvention, sondern eine zweckmäßige Darstellung großer Intensitätsbereiche.

3.5 Optische Dichte

Nach der Verarbeitung klassischer fotografischer Materialien ist nicht unmittelbar die ursprüngliche Belichtung sichtbar, sondern eine veränderte Transmission oder Reflexion. Für transparente Materialien wird die optische Dichte traditionell logarithmisch aus dem Verhältnis von einfallendem zu durchgelassenem Licht beschrieben. Eine vereinfachte Transmissionsdichte lautet:

$$D = \log_{10}(I_0 / I)$$

I_0 bezeichnet die einfallende und I die transmittierte Lichtintensität. Eine Dichte von 1 entspricht idealisiert einer Transmission von einem Zehntel, $D = 2$ einem Hundertstel. Bei Reflexionsmaterialien werden entsprechend definierte Reflexionsmessungen und Messgeometrien benötigt; eine Transmissionsformel darf nicht unkritisch auf jede Ausgabeform übertragen werden.

Dichte ist deshalb eine besonders nützliche logarithmische Größe: Sie erlaubt, große Änderungen der Transmission kompakt darzustellen. Für DFM ist jedoch auch hier die Messgeometrie Teil der Provenance. Zwei Dichtemessungen sind nur dann unmittelbar vergleichbar, wenn Filterung, Spektralempfindlichkeit des Densitometers und geometrische Bedingungen ausreichend übereinstimmen.

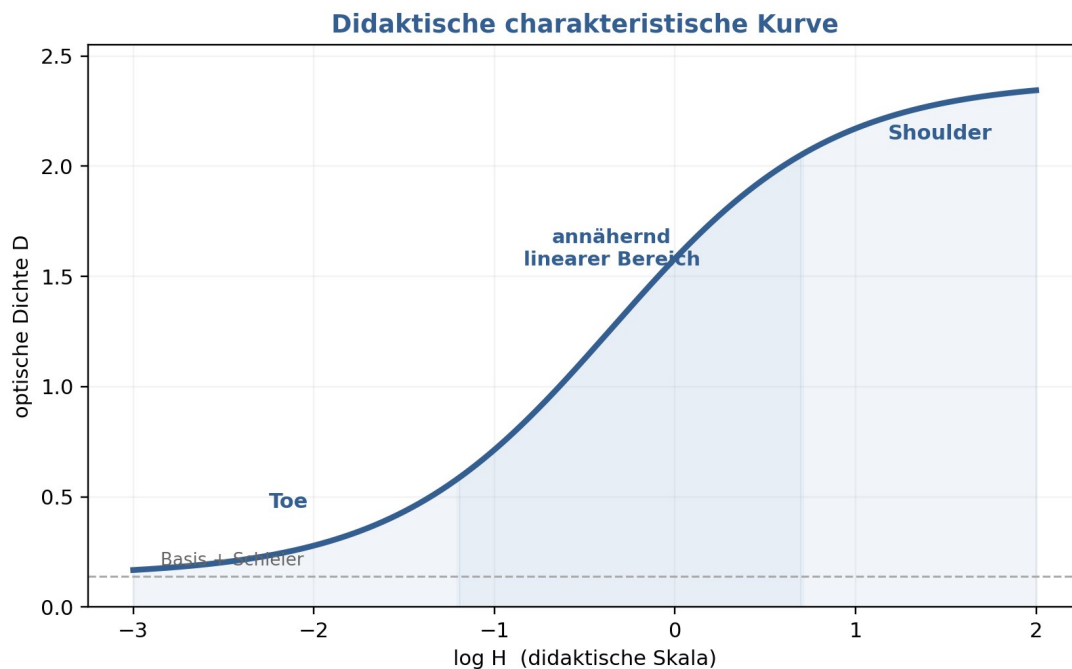
3.6 Die charakteristische Kurve

Trägt man die gemessene optische Dichte gegen den Logarithmus der Belichtung auf, entsteht die charakteristische Kurve. Historisch wird sie häufig mit Hurter und Driffield verbunden und entsprechend als H&D-Kurve bezeichnet. Für DFM ist weniger die historische Bezeichnung entscheidend als die Funktion: Die Kurve beschreibt, wie aus einer Belichtungsänderung unter definierten Prozessbedingungen eine Dichteänderung wird.

Typischerweise lassen sich mehrere Bereiche unterscheiden. Im unteren Belichtungsbereich liegt der Toe, in dem zusätzliche Belichtung zunächst relativ geringe Dichteänderungen erzeugt. Darauf folgt ein Bereich, der über eine bestimmte Strecke annähernd linear erscheinen kann. Bei hohen Belichtungen flacht die Kurve im Shoulder ab. Zusätzlich muss die Basis- und Schleierdichte berücksichtigt werden: Selbst unbelichtetes verarbeitetes Material besitzt keine perfekte Dichte null.

Die Kurve darf nicht als unveränderliche Signatur einer Emulsion missverstanden werden.

Entwicklungstemperatur, Zeit, Entwicklerzusammensetzung, Bewegung, Lagerzustand und weitere Prozessvariablen können ihre Lage und Form verändern. Für ein DFM-Materialprofil bedeutet das: Eine Kennlinie braucht einen Prozesskontext. Ein Profil kann mehrere Kennlinien für unterschiedliche dokumentierte Prozesse enthalten oder eine parametrisierte Beziehung zwischen Material und Prozess beschreiben. Beides ist methodisch sauberer als eine einzige Kurve ohne Provenance.



DATA 3.2 – Didaktische charakteristische Kurve $D = f(\log H)$. Toe, annähernd linearer Bereich und Shoulder dienen als konzeptionelle Orientierung. Die Kurve ist synthetisch und stellt keine reale Emulsion dar.

3.7 Gradation, Gamma und Empfindlichkeit

In einem geeigneten Abschnitt der charakteristischen Kurve kann die Steigung als Maß für Gradation beschrieben werden. In vereinfachter Form gilt:

$$\gamma \approx \Delta D / \Delta \log H$$

Diese vereinfachte Steigungsdarstellung gilt nur für einen definierten Kurvenabschnitt. In fotografischen Standards können statt eines einfachen Gamma-Wertes andere Gradienten und Auswerteverfahren maßgeblich sein. Der wahrgenommene Kontrast eines fertigen Bildes ist außerdem nicht mit dieser Material- oder Prozesssteigung identisch, weil Optik, Ausgabe und Betrachtung weitere Transformationen hinzufügen.

Empfindlichkeit wird ebenfalls aus definierten Kriterien abgeleitet. Deshalb ist eine Filmempfindlichkeit keine frei wählbare Eigenschaft, sondern das Ergebnis eines normierten oder anderweitig dokumentierten Messverfahrens. Historische Systeme wie ASA oder DIN und heutige ISO-Angaben müssen im jeweiligen Normkontext gelesen werden.

3.8 ISO ist kein universelles Materialmodell

Die Standardisierung von Empfindlichkeit ist ein gutes Beispiel dafür, wie wichtig die genaue Bedeutung einer Kennzahl ist. Für Schwarzweiß-Negativfilm-Prozess-Systeme beschreibt ISO 6:1993 ein sensitometrisches Verfahren zur Bestimmung der ISO-Empfindlichkeit; die Norm wurde 2023 bestätigt und ist weiterhin aktuell. Für Farbnegativfilme der Standfotografie gilt ISO 5800:1987, die 2026 erneut bestätigt wurde. Digitale Kameras verwenden mit ISO 12232:2019 wiederum eine andere normative Logik für ISO-Speed-Ratings, Standard Output Sensitivity und empfohlene Belichtungsindizes.

Schon diese drei Beispiele zeigen, warum „ISO 400“ kein universeller Materialvektor ist. Der Wert hilft bei der Belichtungssteuerung innerhalb des jeweils definierten Systems, beschreibt aber weder Auflösung noch MTF, Korn beziehungsweise Rauschen, spektrale Empfindlichkeit, Farbwiedergabe oder die vollständige Tonwertcharakteristik. Zwei Materialien können dieselbe nominelle ISO-Empfindlichkeit besitzen und sich in allen genannten Eigenschaften deutlich unterscheiden.

Für DFM wird ISO daher als einzelne Kenngröße geführt, nicht als Stellvertreter für das gesamte Material. In einem formalen Profil müssen zusätzlich die Bedingungen dokumentiert werden, unter denen die Empfindlichkeit gilt. Bei historischen Quellen ist außerdem zu prüfen, welchem Empfindlichkeitssystem eine Zahl entstammt. ASA, DIN und ISO können ineinander überführbare Beziehungen besitzen, doch ältere historische Systeme und Herstellerangaben sind nicht automatisch direkt vergleichbar.

3.9 Spektrale Empfindlichkeit

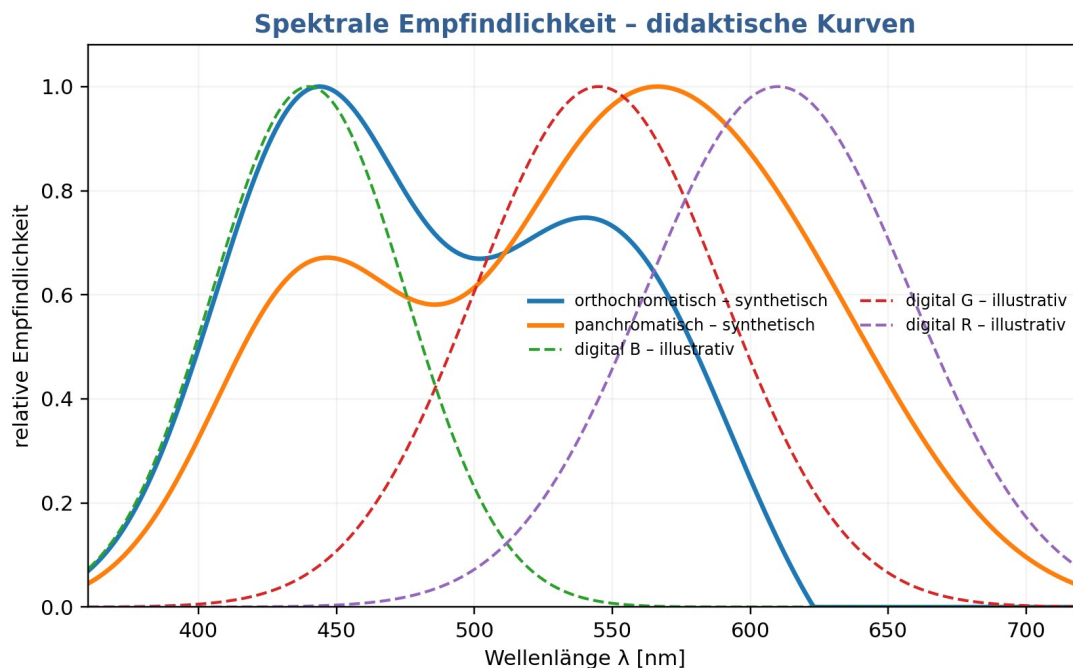
Fotografische Materialien reagieren nicht auf jede Wellenlänge gleich. Diese Tatsache ist für historische Bildcharakteristik besonders wichtig. Frühe Silberhalogenidmaterialien waren zunächst vor allem im kurzwelligen Bereich empfindlich; durch Sensibilisierungsfarbstoffe wurden später orthochromatische und panchromatische Reaktionen möglich. Damit änderte sich nicht lediglich die „Farbe“ eines Schwarzweißbildes, sondern die relative Helligkeitswiedergabe farbiger Gegenstände.

Die spektrale Empfindlichkeit kann abstrakt als Funktion $S(\lambda)$ beschrieben werden. Dabei bezeichnet λ die Wellenlänge. Eine solche Kurve zeigt, wie stark ein Material auf Licht verschiedener Wellenlängen reagiert. Die Kurve ist keine Farbbalance und kein fertiger Look. Erst im Zusammenspiel mit dem Spektrum der Beleuchtung, der Reflexion der Szene, Filtern, Optik und Prozess entsteht die beobachtbare Ton- oder Farbwiedergabe.

Standardisierte Sensitometrie benötigt deshalb definierte Lichtquellen. ISO 7589:2002 legt spektrale Eigenschaften von Beleuchtungen für sensitometrische Prüfungen unter anderem für Tageslicht-, Wolfram- und Druckerbedingungen fest. Für DFM ist diese Normlogik wichtiger als ein einzelner Zahlenwert: Ein Messwert der Empfindlichkeit ohne Kenntnis des Belichtungsspektrums kann bei spektral selektiven Materialien missverständlich sein.

Digitale Sensoren besitzen ebenfalls spektrale Antworten. Farbfilterarrays teilen das einfallende Licht typischerweise in mehrere spektral überlappende Kanäle; nachgelagerte Farbmatrizen und Weißabgleich transformieren diese Sensordaten weiter. Deshalb ist auch beim digitalen System eine gemessene Kanalantwort nur eine Stufe der Farbwiedergabe, nicht das fertige Farbergebnis.

$$S(\lambda)$$



DATA 3.4 – Spektrale Empfindlichkeit als Funktion $S(\lambda)$. Die Kurven sind synthetisch und dienen nur der Erklärung unterschiedlicher Reaktionsbereiche; sie sind keine Messdaten konkreter Filme oder Sensoren.

3.10 Auflösung und MTF

Räumliche Detailwiedergabe wird häufig mit einer einzigen Auflösungszahl beschrieben. Historisch sind Linienpaare pro Millimeter verbreitet. Eine solche Grenzauflösung beantwortet die Frage, bis zu welcher Feinheit ein bestimmtes Muster unter bestimmten Bedingungen noch getrennt oder erkannt werden kann. Das ist

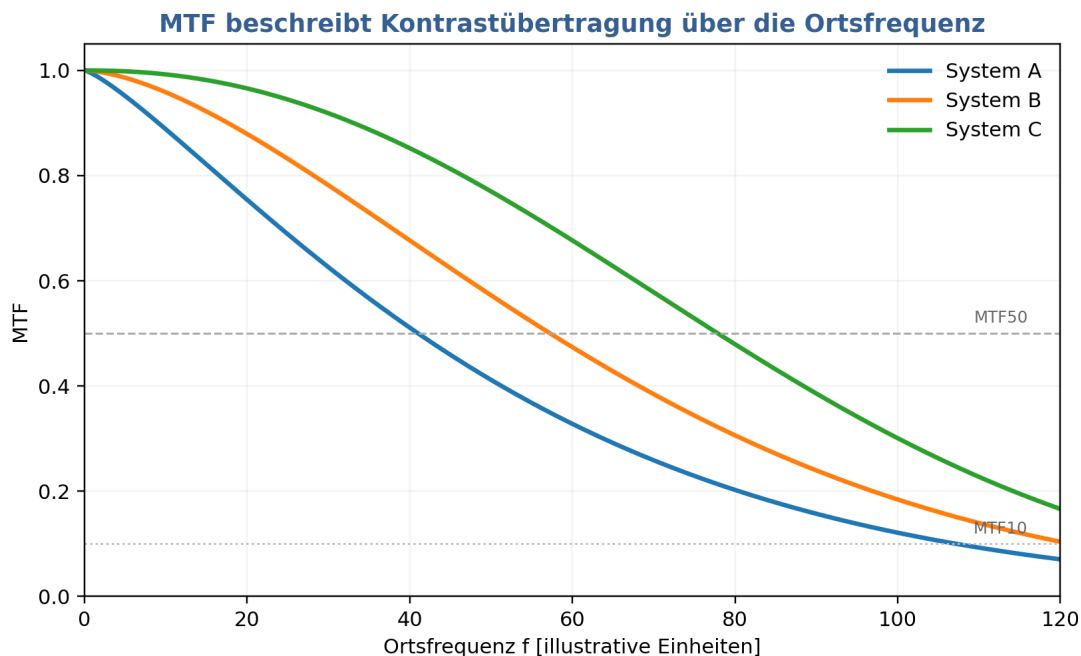
nützlich, aber unvollständig, weil die Stärke der Kontrastübertragung unterhalb dieser Grenze nicht beschrieben wird.

Die Modulation Transfer Function, MTF, beschreibt Kontrastübertragung als Funktion der Ortsfrequenz. Bei niedrigen Ortsfrequenzen geht es um großflächige Strukturen, bei höheren um zunehmend feinere Details. Zwei Systeme können eine ähnliche Grenzauflösung besitzen und dennoch bei mittleren Frequenzen deutlich unterschiedlich wirken, weil eines dort mehr Kontrast überträgt. Diese Eigenschaft erklärt, warum wahrgenommene Schärfe und Grenzauflösung nicht identisch sind.

Für digitale Kameras spezifiziert ISO 12233:2024 Verfahren zur Messung von Auflösung und Spatial Frequency Response. Die Norm betont ausdrücklich, dass die Zahl adressierbarer Photoelemente nicht mit der tatsächlichen Auflösung gleichgesetzt werden darf. Auch hier zeigt sich dieselbe DFM-Grundidee wie bei Film: nominelle Strukturgröße oder Pixelzahl beschreibt nicht automatisch die Systemleistung.

Material-MTF und System-MTF müssen getrennt betrachtet werden. Eine Materialmessung kann die räumliche Übertragung des Aufzeichnungsträgers charakterisieren. Das fertige Bild enthält zusätzlich Optik, Fokus, Bewegung, Entwicklung, Scan beziehungsweise digitale Verarbeitung und Ausgabe. In einem vereinfachten linearen Modell lassen sich diese Beiträge qualitativ als Produkt von Übertragungsfunktionen darstellen.

$$MTF(f)$$



DATA 3.5 – Illustrative MTF-Verläufe. Die Kurven zeigen, dass ähnliche Grenzbereiche mit unterschiedlicher Kontrastübertragung bei mittleren Ortsfrequenzen verbunden sein können. Keine historischen Messdaten.

$$MTF_{System}(f) \approx MTF_{Optik}(f) \cdot MTF_{Material}(f) \cdot MTF_{Prozess}(f) \cdot MTF_{Ausgabe}(f)$$

DFM | DENKFEHLER

„Dieser Film löst 100 Linienpaare pro Millimeter auf.“

Eine Grenzauflösungszahl ist ohne Testkontrast, Prozessbedingungen und Messmethode unvollständig.

Außerdem beschreibt sie nicht die Kontrastübertragung des gesamten fotografischen Systems.

3.11 Korn, Rauschen und Signalqualität

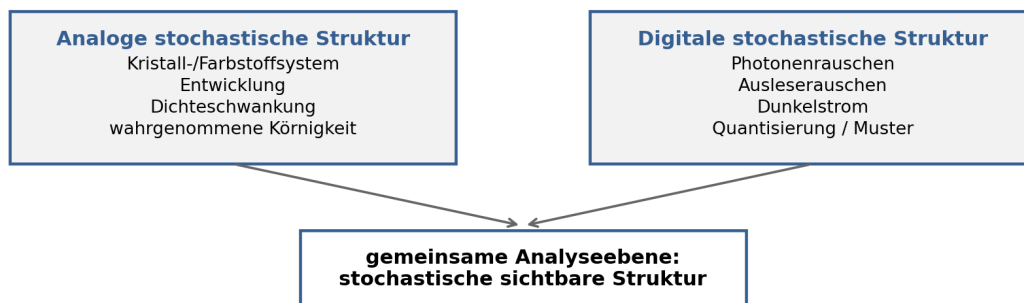
Fotografisches Korn wird häufig gleichzeitig als ästhetische Eigenschaft, Materialstruktur und Rauschphänomen behandelt. Für eine technische Beschreibung müssen diese Ebenen getrennt werden. Die mikroskopische Struktur des Materials ist nicht identisch mit der im Print wahrgenommenen Körnigkeit. Entwicklung, Vergrößerung, Scan, Schärfung und Betrachtungsabstand beeinflussen, wie stark eine stochastische Struktur sichtbar wird.

Digitale Sensoren besitzen andere physikalische Rauschquellen. ISO 15739:2023 nennt unter anderem Photonenrauschen, Dunkelstromrauschen, analoges Ausleserauschen, Quantisierungsrauschen sowie räumliche Musteranteile. Die Norm legt Mess- und Berichtsverfahren für Rauschen, Signal-Rausch-Verhältnisse und Dynamikumfang digitaler Stillbildkameras fest. Sie zeigt damit exemplarisch, wie stark ein scheinbar einfacher Begriff wie „Rauschen“ von Messbedingungen und statistischer Definition abhängt.

Eine einfache Form des Signal-Rausch-Verhältnisses kann als Verhältnis eines mittleren Signals zur Standardabweichung des Rauschens dargestellt werden. Welche Signalgröße, welche Rauschdefinition und welche linearisierte Ebene verwendet werden, muss jedoch angegeben werden. Ein SNR-Wert ohne diese Information ist nur eingeschränkt interpretierbar. Für DFM ist deshalb nicht nur der Wert zu speichern, sondern auch seine Messdefinition.

Korn und digitales Rauschen dürfen nicht physikalisch gleichgesetzt werden. Auf einer höheren funktionalen Ebene können beide jedoch als stochastische sichtbare Strukturen beschrieben werden, die Detailwahrnehmung, Gleichmäßigkeit und Tonübergänge beeinflussen. Ein digitales Materialmodell kann daher gemeinsame abstrakte Kategorien besitzen, muss darunter aber verfahrensspezifische Ursachen und Statistiken erhalten.

$$SNR = \mu_Signal / \sigma_Rauschen$$



SYSTEM 3.6 – Korn und digitales Rauschen. Unterschiedliche physikalische Entstehungswege werden auf einer gemeinsamen funktionalen Analyseebene betrachtet, ohne sie gleichzusetzen.

3.12 Dynamikumfang

Dynamikumfang bezeichnet nicht überall dasselbe. In der Szene beschreibt er die Spanne zwischen dunklen und hellen relevanten Bereichen. Beim Aufnahmesystem geht es um den Bereich von noch nutzbar erfassbaren niedrigen bis hohen Signalen. Beim Negativmaterial lässt sich eine Belichtungsspanne mit einer Dichtekurve verknüpfen; beim digitalen Sensor werden Sättigungsgrenze und Rauschgrenze häufig als relevante Grenzen herangezogen. Die Ausgabe hat wiederum einen eigenen Kontrast- und Helligkeitsumfang.

Deshalb ist der Dynamikumfang eines Prints nicht mit dem Dynamikumfang eines Sensors oder Negativs identisch. Tonemapping, Gradation und lokale Verarbeitung können eine große Aufnahmespanne in einen deutlich kleineren Ausgabeumfang transformieren. Umgekehrt kann eine kontrastreiche Ausgabe den Eindruck hoher Dynamik erzeugen, obwohl sie physikalisch nur einen begrenzten Leuchtdichte- oder Reflexionsbereich besitzt.

Für digitale Stillbildkameras enthält ISO 15739:2023 ein Verfahren zur Bestimmung des DSC-Dynamikumfangs im Kontext definierter Rauschmessungen. DFM übernimmt daraus nicht einfach einen universellen Wert, sondern die methodische Lehre: Dynamikumfang benötigt eine definierte obere und untere Grenze sowie einen angegebenen Messpfad. Historische Angaben müssen entsprechend auf ihre Definition geprüft werden.

3.13 Farbe als Messgröße

Farbe lässt sich nicht sinnvoll durch Bezeichnungen wie „warm“, „kühl“ oder „satt“ allein formalisieren. Die Farbmessung verwendet definierte Beobachter, Beleuchtungen, Tristimuluswerte, Farbräume und Farbdifferenzmetriken. CIE 015:2018 fasst die Empfehlungen der Commission Internationale de l'Éclairage zur Colorimetrie zusammen, darunter Standardbeobachter, Standardlichtarten, Tristimuluswerte und Farbdifferenzen. Der CIELAB-Farbraum dient als verbreitete näherungsweise wahrnehmungsgleichmäßige Darstellung für Objektfarben.

Für DFM ist dabei nicht vorgesehen, die gesamte Farbwissenschaft in ein Materialprofil zu kopieren. Entscheidend ist vielmehr die Trennung von Messung und Interpretation. Spektrale Materialantwort, Messfarben unter definierter Beleuchtung, Scannerprofil, digitale Farbmatrix und Ausgabeprofil gehören zu unterschiedlichen Stufen. Eine ΔE -Farbdifferenz kann beispielsweise ein nützlicher Vergleichswert sein, sagt aber allein nichts darüber aus, welcher Teil der fotografischen Kette die Abweichung verursacht hat.

Historische Farbsysteme stellen zusätzliche Anforderungen. Alterung, Farbstoffabbau, Archivbeleuchtung und Digitalisierung verändern das heute messbare Objekt. Deshalb muss zwischen ursprünglicher Systemcharakteristik, aktuellem Erhaltungszustand und digitaler Reproduktion unterschieden werden. Das DFM-Evidenzsystem wird an dieser Stelle praktisch: Eine gemessene Farbe eines gealterten Originals ist Evidenz für dessen heutigen Zustand, aber nicht automatisch ein direkter Messwert des ursprünglichen Materials bei seiner Herstellung.

Für einfache Vergleiche kann eine Farbdifferenz im CIELAB-Raum als ΔE ausgedrückt werden; die konkrete Formel und ihre Wahrnehmungsnähe hängen von der gewählten ΔE -Definition ab. Für DFM genügt an dieser Stelle die methodische Einsicht, dass Farbwerte immer an Beobachter, Beleuchtung, Referenzweiß und Messgeometrie gebunden sind.

3.14 Messbedingungen und Kalibrierung

Messwerte werden erst durch ihre Bedingungen vergleichbar. Bei chemischen Materialien gehören dazu unter anderem Entwickler, Verdünnung, Temperatur, Zeit, Agitation, Fixierung, Trocknung und Lagerzustand. Bei spektralen Messungen kommen Lichtquelle, Spektralverteilung und Messgeometrie hinzu. Bei Auflösungs- und MTF-Messungen sind Testchart, Fokus, Optik, Kontrast, Vergrößerung und Auswertungsverfahren relevant. Digitale Messungen benötigen zusätzlich Kameraparameter, RAW- oder JPEG-Pfad, Linearisierung, Rauschunterdrückung, Schärfung und Kompression.

Kalibrierung ist dabei nicht dasselbe wie Messung. Sie stellt den Bezug eines Messsystems zu bekannten Referenzen oder Standards her. Ein Densitometer kann Messwerte liefern, doch seine Abweichungen und Referenzbedingungen müssen kontrolliert werden. Ein Scanner kann reproduzierbare Pixelwerte erzeugen, ohne dass diese bereits eine absolute Dichte- oder Farbmessung darstellen. Ebenso ist ein Kameratest nicht automatisch eine Sensormessung, wenn Optik und kamerainterne Verarbeitung Teil des gemessenen Pfades sind.

DFM speichert deshalb Messbedingungen nicht als Randnotiz, sondern als Teil des Datensatzes. Das ist auch für spätere digitale Rekonstruktionen wichtig. Wenn eine Kennlinie aus einer Quelle übernommen wird, muss klar sein, ob sie unter standardisierter Entwicklung, einer Herstellerempfehlung oder einem experimentellen Prozess entstand. Nur dann kann entschieden werden, ob sie als Materialreferenz, Prozessvariante oder historische Rekonstruktion verwendet werden darf.

Einflussgröße	Beispiel für notwendige Dokumentation	Warum relevant?
Entwicklung	Chemie, Zeit, Temperatur, Agitation	verändert Kennlinie, Dichte und Korn
Belichtung	Lichtquelle, Spektrum, Stufenfolge	bestimmt Eingang des Messsystems
Optik / Fokus	Objektiv, Blende, Fokusverfahren	beeinflusst räumliche Übertragung
Messgerät	Typ, Kalibrierung, Geometrie	bestimmt Messpfad und Vergleichbarkeit
Digitalpfad	RAW/JPEG, Linearisierung, Schärfung	kann Signal, Rauschen und MTF verändern

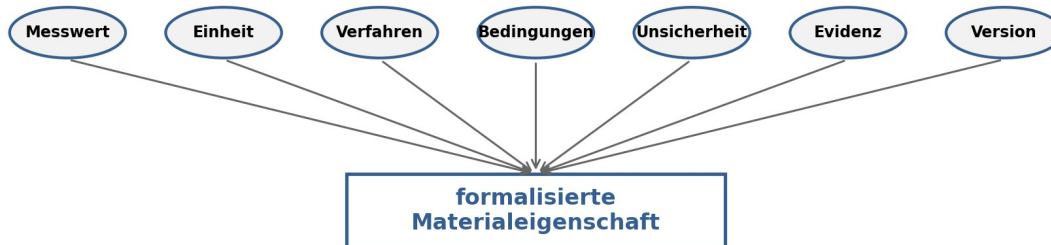
3.15 Reproduzierbarkeit und Unsicherheit

Reproduzierbarkeit bedeutet nicht, dass jede Wiederholung exakt denselben Zahlenwert liefern muss. Sie bedeutet, dass ein Verfahren ausreichend genau beschrieben ist, damit vergleichbare Ergebnisse unter kontrollierten Bedingungen erwartet und Abweichungen analysiert werden können. Wiederholungsmessungen, Kontrollproben, Referenzmaterialien und dokumentierte Kalibrierungen helfen dabei, zufällige und systematische Einflüsse zu unterscheiden.

Messunsicherheit gehört deshalb zum Ergebnis. Ein Wert wie „92 lp/mm“ wirkt präzise, kann aber ohne Testkontrast, Auswerteverfahren, Entwicklungszustand und Unsicherheitsangabe Scheingenauigkeit erzeugen. Gleiches gilt für Empfindlichkeit, Dichte, SNR oder Farbdifferenzen. Die geeignete Form der Unsicherheit hängt

vom jeweiligen Verfahren ab; DFM verlangt keine einheitliche statistische Formel für alle Messarten, aber eine explizite Dokumentation dessen, was bekannt und was unsicher ist.

Die allgemeine Schreibweise $x = x_{\text{mess}} \pm u$ ist daher vor allem eine Erinnerung an die Struktur des Messwerts. u kann eine standardisierte Unsicherheit, eine Streuung, ein Vertrauensbereich oder eine anders definierte Unsicherheitsangabe repräsentieren. Die konkrete Bedeutung muss in der Provenance des Messdatensatzes festgelegt sein. Ein präziser Zahlenwert ohne diese Bedeutung ist weniger informativ als ein gröberer Wert mit sauberer Dokumentation.



SYSTEM 3.7 – DFM-Messdatenmodell. Erst die Kombination aus Messwert, Einheit, Verfahren, Bedingungen, Unsicherheit, Evidenz und Version ergibt eine formal belastbare Materialeigenschaft.

3.16 Historische Messdaten

Historische technische Literatur ist für DFM unverzichtbar, aber sie stellt besondere Anforderungen an die Vergleichbarkeit. Normen, Maßeinheiten, Sensitometer, Lichtquellen, Entwickler und Testkriterien haben sich verändert. Eine Auflösungsangabe aus einem Herstellerprospekt der 1930er Jahre kann auf einem anderen Testkontrast beruhen als eine moderne Laborangabe. Eine historische Empfindlichkeitszahl kann einem System entstammen, das nicht direkt mit heutigen ISO-Werten gleichgesetzt werden darf.

Zusätzlich muss zwischen wissenschaftlicher Messung und Marketingangabe unterschieden werden. Herstellerdatenblätter sind wertvolle Primärquellen, doch ihre Auswahl von Messbedingungen und Darstellungsformen verfolgt häufig auch praktische oder kommerzielle Ziele. Zeitgenössische Handbücher können Prozesse dokumentieren, ohne moderne Unsicherheitsangaben zu liefern. Erhaltene Negative wiederum zeigen ein reales Ergebnis, enthalten aber zusätzlich Einflüsse von Kamera, Belichtung, Entwicklung, Alterung und Reproduktion.

DFM behandelt historische Zahlen daher als Daten mit Provenance. Eine Zahl wird nicht dadurch aktuell vergleichbar, dass sie in moderne Einheiten umgerechnet wird. Zunächst muss geklärt werden, was damals tatsächlich gemessen wurde. Erst danach ist eine Normalisierung oder Rekonstruktion sinnvoll. Wo die Quellenlage unvollständig bleibt, wird dies explizit als Unsicherheit geführt.

3.17 Evidenz und Provenance

Das DFM-Evidenzsystem erhält bei Messdaten eine besondere Bedeutung. A – primär dokumentiert bezeichnet beispielsweise ein originales technisches Datenblatt oder eine zeitgenössische Normangabe. B – sekundär dokumentiert umfasst belastbare Fachliteratur, die Messdaten oder Methoden nachvollziehbar zusammenfasst. C – gemessen bezeichnet eigene oder vollständig nachvollziehbare experimentelle Messungen. D – rekonstruiert kennzeichnet Werte oder Kurven, die aus mehreren Quellen, erhaltenen Objekten oder experimentellen Annäherungen abgeleitet wurden. E – hypothetisch steht für plausible, aber noch nicht ausreichend belegte Annahmen.

Diese Klassen sind keine Rangliste von gut nach schlecht. Eine eigene Messung der Klasse C kann ungeeignet sein, wenn das Messverfahren schlecht dokumentiert ist; eine historische Primärquelle der Klasse A kann für eine heutige Fragestellung unvollständig sein. Entscheidend ist, dass der Erkenntnisstatus sichtbar bleibt. So lässt sich später unterscheiden, welche Teile eines digitalen Materialprofils direkt belegt, welche rekonstruiert und welche experimentell gesetzt sind.

Provenance ergänzt die Evidenzklasse um die konkrete Herkunft: Dokumenttitel, Ausgabe, Seitenangabe, Messgerät, Versuchs-ID, Dateihash, Bearbeitungsschritt oder Versionsnummer. Gerade bei digitalisierten Quellen und experimentellen Profilen verhindert dies, dass nach mehreren Iterationen unklar wird, wo eine Kurve oder ein Parameter ursprünglich herkam.

3.18 Vom Messwert zum Materialprofil

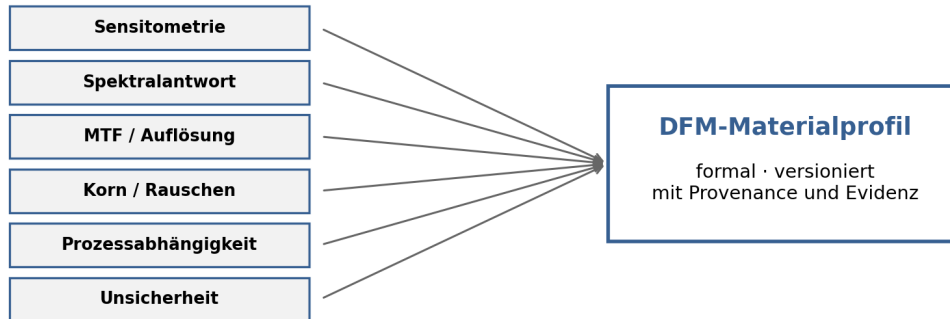
Ein einzelner Messwert beschreibt kein fotografisches Material. Erst eine strukturierte Kombination unterschiedlicher Eigenschaftsklassen nähert sich einem Materialprofil. DFM unterscheidet mindestens sensitometrische, spektrale, räumliche, stochastische, prozessbezogene und zeitliche Eigenschaften. Hinzu kommen Ausgabebedingungen und Unsicherheitsinformationen.

Sensitometrische Daten beschreiben beispielsweise die Beziehung zwischen Belichtung und resultierendem Signal beziehungsweise Dichte. Spektrale Daten beschreiben die Wellenlängenabhängigkeit. Räumliche Daten enthalten MTF oder andere Auflösungsinformationen. Stochastische Daten beschreiben Korn- oder Rauschstrukturen. Prozessdaten halten fest, wie Entwicklung, Digitalisierung oder andere Transformationen die Eigenschaften verändern. Zeitliche Daten können Alterung, Latentbildstabilität oder Drift dokumentieren.

Die wichtige Konsequenz lautet: Ein Materialprofil ist kein Preset. Ein Preset enthält typischerweise Transformationen für ein bereits vorhandenes Bild. Ein DFM-Materialprofil beschreibt dagegen Eigenschaften und Bedingungen, die innerhalb eines Bildentstehungssystems wirksam werden. Es kann deshalb sowohl dokumentierte Messdaten als auch parametrisierte Modelle enthalten. Wo keine Messung verfügbar ist, muss eine Rekonstruktion oder Hypothese als solche gekennzeichnet bleiben.

Eigenschaft	Typische Messgröße / Darstellung	Einheit / Form	Systemabhängigkeit
Empfindlichkeit	ISO / abgeleitete Speed-Kennzahl	normabhängig	mittel
Dichte	optische Dichte	D	hoch

Spektrale Empfindlichkeit	$S(\lambda)$	relativ / spektral	mittel
Auflösung	Grenzauflösung	lp/mm oder systembezogen	hoch
Kontrastübertragung	MTF / SFR	0–1 oder %	hoch
Rauschen / Körnigkeit	statistische Kenngröße	verfahrensabhängig	hoch
Farbabweichung	ΔE / Farbkordinaten	dimensionslos / Koordinaten	hoch



SYSTEM 3.8 – Vom Messwert zum digitalen Materialprofil. Unterschiedliche Messklassen werden nicht zu einem Look, sondern zu einer formalisierten und versionierten Materialbeschreibung zusammengeführt.

DFM | PERSPEKTIVE

Vom Messwert zum ausführbaren Material

Messdaten bilden die Grundlage dafür, ein fotografisches Material formal und später algorithmisch zu modellieren. Ausführbarkeit setzt jedoch strukturierte Provenance, Unsicherheit und Prozessbezug voraus.

3.19 Ein synthetisches DFM-Materialprofil

Die folgende Struktur ist bewusst didaktisch. Sie zeigt, wie verschiedene Messklassen gemeinsam verwaltet werden könnten, ohne produktive Implementierungsdetails offenzulegen. Wichtig ist nicht die konkrete YAML-Syntax, sondern die Trennung zwischen Materialidentität, Messkontext, Sensitometrie, spektraler Antwort, räumlicher Übertragung, stochastischer Struktur und Unsicherheit.

Ein produktives System müsste darüber hinaus Einheiten, Datenpunkte, Messreihen, Quellenreferenzen, Versionsbeziehungen und Validierungsregeln detaillierter abbilden. Für ein öffentliches Fachbuch genügt die konzeptionelle Struktur. PUBLIC MODEL $\neq$ PRODUCTION MODEL bleibt damit gewahrt.

```

material:
  id: DFM-DEMO-MONO-03
  class: monochrome_negative
  version: 0.1
  
```

```

measurement_context:
  evidence: synthetic_example
  status: educational

sensitometry:
  curve_type: characteristic_curve
  speed: illustrative

spectral_response:
  type: synthetic_curve

spatial_response:
  mtf: illustrative

stochastic_response:
  grain: illustrative

uncertainty:
  documented: true

```

Dieses Profil ist ein synthetisches didaktisches Beispiel. Es enthält keine produktiven LichtRolle-Parameter und stellt kein historisch vollständiges Emulsionsprofil dar.

3.20 Vom Materialprofil zum ausführbaren System

Sobald Materialeigenschaften formal beschrieben, versioniert und mit Evidenz sowie Provenance verbunden sind, entsteht eine neue Möglichkeit: Die Beschreibung kann nicht nur gelesen, sondern von Software interpretiert werden. Ein Materialprofil wird damit potenziell ausführbar. Das bedeutet nicht, dass eine historische Emulsion vollständig durch eine Handvoll Kennwerte ersetzt werden kann. Es bedeutet, dass dokumentierte Eigenschaften zu Eingaben eines digitalen Modells werden können.

Eine praktische Referenzimplementierung könnte beispielsweise Material-, Optik-, Entwicklungs- und Kontextinformationen getrennt verwalten und erst während einer digitalen Entwicklung zusammenführen. Für DFM ist entscheidend, dass die Grenzen des Wissens erhalten bleiben. Gemessene Kurven dürfen nicht unbemerkt durch ästhetische Parameter ersetzt werden; rekonstruierten Werten darf nicht der Status historischer Messdaten gegeben werden. Versionierung und QA werden damit Teil der fotografischen Methodik.

Das Kapitel hat damit die Brücke von der Beobachtung zum formalisierten Messdatum geschlagen. Der nächste Schritt besteht nicht darin, noch mehr Einzelwerte zu sammeln. Vielmehr muss geklärt werden, wie Kennlinie, Spektralantwort, MTF, Korn, Prozessabhängigkeit und Unsicherheit zu einem konsistenten Materialmodell verbunden werden können. Erst aus dieser Struktur entsteht ein fotografisches Materialsystem, das zugleich historisch nachvollziehbar, technisch analysierbar und digital interpretierbar ist.

$$x = x_{mess} \pm u$$

Dabei bezeichnet x die betrachtete Messgröße, x_{mess} den ermittelten Wert und u die zugehörige Unsicherheitsangabe. Die Formel ist bewusst allgemein. Sie sagt noch nichts darüber, wie u bestimmt wird; sie erinnert lediglich daran, dass ein Messwert ohne Unsicherheitskontext unvollständig ist.

DFM | GRUNDSATZ

Messwert und Messbedingungen

Ein Messwert ohne Messbedingungen ist keine vollständige Materialeigenschaft. Verfahren, Randbedingungen, Unsicherheit, Quelle und Version gehören zur technischen Aussage.

3.21 Rohmessung, abgeleiteter Parameter und Modellparameter

Für eine belastbare digitale Materialbeschreibung muss DFM drei Ebenen auseinanderhalten. Die erste Ebene ist die Rohmessung: etwa eine Folge von Dichtewerten zu bekannten Belichtungsstufen, ein Spektrum aus einem Messgerät, eine Kantenaufnahme für eine SFR-Auswertung oder eine Reihe linearer Sensorwerte. Rohmessungen sollten möglichst nahe an der ursprünglichen Beobachtung gespeichert werden. Sie sind die Grundlage, auf die spätere Auswertungen zurückgeführt werden können.

Die zweite Ebene besteht aus abgeleiteten Parametern. Dazu gehören beispielsweise eine aus Messpunkten bestimmte Kurvensteigung, ein MTF50-Wert, ein Signal-Rausch-Verhältnis oder eine Farbdifferenz. Diese Größen sind bereits Ergebnisse einer Methode. Ändert sich das Auswerteverfahren, kann aus denselben Rohdaten ein anderer abgeleiteter Wert entstehen. Deshalb benötigt auch der abgeleitete Parameter eine Versions- und Methodenangabe. Ein MTF50-Wert ohne Hinweis auf Kantenmethode, Linearisierung und Auswertalgorithmus ist für einen späteren Vergleich nur eingeschränkt brauchbar.

Die dritte Ebene ist der Modellparameter. Ein ausführbares Materialmodell kann aus realen Messdaten vereinfachte oder geglättete Parameter erzeugen, die für Simulation oder Rekonstruktion geeignet sind. Eine gemessene Kennlinie kann etwa durch eine mathematische Funktion approximiert werden. Eine spektrale Messreihe kann auf eine kleinere Zahl von Stützstellen reduziert werden. Eine Kornmessung kann in Parameter eines stochastischen Modells überführt werden. Diese Transformation ist legitim, solange der Modellparameter nicht mit der Rohmessung verwechselt wird.

Diese Trennung schützt vor einem häufigen Problem digitaler Rekonstruktionen: Ein modelltechnisch praktischer Wert erhält mit der Zeit den Status eines historischen Messwertes, obwohl er ursprünglich nur eine Approximation war. DFM verlangt deshalb eine nachvollziehbare Kette Rohmessung → Auswertung → Modellparameter. Jede Stufe kann eine eigene Version besitzen. Dadurch lassen sich Modelle verbessern, ohne die zugrunde liegende Evidenz zu verlieren.

Für historische Materialien, bei denen keine Rohmessung erhalten ist, beginnt die Kette möglicherweise erst bei einer publizierten Grafik, einer Tabelle oder einer textlichen Beschreibung. Auch dann bleibt die Ebenentrennung sinnvoll. Eine digitalisierte Kurve aus einem Handbuch ist eine rekonstruierte Datenquelle; die daraus gefittete Funktion ist ein weiterer abgeleiteter Modellschritt. Genau diese Transparenz verhindert Scheingenauigkeit und macht unterschiedliche Rekonstruktionen vergleichbar.

$$x = x_{mess} \pm u$$

Dabei bezeichnet x die betrachtete Messgröße, x_{mess} den ermittelten Wert und u die zugehörige Unsicherheitsangabe. Die Formel ist bewusst allgemein. Sie sagt noch nichts darüber, wie u bestimmt wird; sie erinnert lediglich daran, dass ein Messwert ohne Unsicherheitskontext unvollständig ist.

DFM | GRUNDSATZ

Messwert und Messbedingungen

Ein Messwert ohne Messbedingungen ist keine vollständige Materialeigenschaft. Verfahren, Randbedingungen, Unsicherheit, Quelle und Version gehören zur technischen Aussage.

3.22 Qualitätssicherung von Mess- und Materialdaten

Messdaten benötigen eine eigene Qualitätssicherung. Dabei geht es nicht nur darum, offensichtliche Tippfehler zu finden. Geprüft werden muss, ob Einheiten konsistent sind, Messbedingungen vollständig dokumentiert wurden, Kurven plausibel verlaufen, Referenzen erreichbar sind und Versionen eindeutig bleiben. Automatische Prüfungen können beispielsweise erkennen, ob eine spektrale Kurve außerhalb ihres definierten Wellenlängenbereichs Werte enthält, ob Dichtewerte in einer Stufenreihe unplausible Sprünge zeigen oder ob ein Datensatz eine Einheit nennt, die nicht zum Messverfahren passt.

Daneben bleibt fachliche Sichtprüfung notwendig. Eine formal gültige Datei kann inhaltlich falsch sein. Ein eingetragener ISO-Wert kann aus einem anderen Film-Prozess-System stammen; eine MTF-Kurve kann die System-MTF einer Kamera statt die Material-MTF beschreiben; ein historisches Diagramm kann bei der Digitalisierung falsch skaliert worden sein. DFM verbindet deshalb technische Validierung mit fachlicher Review.

Für experimentelle Daten empfiehlt sich eine eindeutige Testlauf-ID. Sie verbindet Materialversion, Probe, Gerät, Messdatum, Rohdaten, Auswerteskript und resultierende Parameter. Änderungen an der Auswertung erzeugen eine neue Ergebnisversion, ohne die ursprünglichen Messdaten zu überschreiben. Dieses Vorgehen ist für ein Forschungsprojekt genauso wichtig wie für eine spätere Referenzimplementierung, weil sich nur so nachvollziehen lässt, warum sich ein Materialprofil zwischen zwei Buch- oder Softwareversionen verändert hat.

Qualitätssicherung bedeutet auch, Grenzen zu akzeptieren. Ein historisches Material kann unvollständig dokumentiert sein. Statt Lücken mit scheinbar exakten Werten zu füllen, kann ein Profil Bereiche als unbekannt markieren, Wertintervalle angeben oder mehrere plausible Rekonstruktionsvarianten führen. Ein solches Profil wirkt weniger vollständig, ist wissenschaftlich aber belastbarer. Unsicherheit ist kein Defekt des Modells, sondern eine Eigenschaft des verfügbaren Wissens.

Damit wird Messdaten-QA zu einem Querschnittsthema des gesamten Buches. Sie verbindet die in Kapitel 1 eingeführten Prinzipien Evidenz, Provenance, Unsicherheit und Versionierung mit konkreten technischen Daten. Erst durch diese Verbindung kann aus einer Sammlung fotografischer Zahlen ein dauerhaft nachvollziehbares Materialsystem werden.

$$x = x_{mess} \pm u$$

Dabei bezeichnet x die betrachtete Messgröße, x_{mess} den ermittelten Wert und u die zugehörige Unsicherheitsangabe. Die Formel ist bewusst allgemein. Sie sagt noch nichts darüber, wie u bestimmt wird; sie erinnert lediglich daran, dass ein Messwert ohne Unsicherheitskontext unvollständig ist.

DFM | GRUNDSATZ

Messwert und Messbedingungen

Ein Messwert ohne Messbedingungen ist keine vollständige Materialeigenschaft. Verfahren, Randbedingungen, Unsicherheit, Quelle und Version gehören zur technischen Aussage.

Tabelle 3.2 – Messwert und notwendiger Kontext

Messwert	Ohne Kontext unzureichend, weil ...
ISO 400	nichts über Korn, MTF, Spektralverhalten oder vollständige Tonwertcharakteristik aussagt.
100 lp/mm	Testkontrast, Entwicklung und Messkriterium fehlen.
„hoher Dynamikumfang“	untere und obere Grenzkriterien sowie Messpfad fehlen.
„geringe Körnigkeit“	Messverfahren, Vergrößerung und Ausgabegröße fehlen.

DFM | GRUNDSATZ

Technische Belastbarkeit

Ein Materialmerkmal wird nicht dadurch technisch, dass ihm eine Zahl zugeordnet wird. Technisch belastbar wird es erst durch Definition, Messverfahren, Bedingungen, Unsicherheit und Provenance.

Quellen und weiterführende Literatur

1. ISO 6:1993. Photography — Black-and-white pictorial still camera negative film/process systems — Determination of ISO speed. ISO/TC 42. 1993; bestätigt 2023.
2. ISO 5800:1987. Photography — Colour negative films for still photography — Determination of ISO speed. 2. Ausgabe; bestätigt 2026.
3. ISO 7589:2002. Photography — Illuminants for sensitometry — Specifications for daylight, incandescent tungsten and printer.
4. ISO 12232:2019. Photography — Digital still cameras — Determination of exposure index, ISO speed ratings, standard output sensitivity, and recommended exposure index. Bestätigt 2024; Amendment 1:2020.
5. ISO 12233:2024. Digital cameras — Resolution and spatial frequency responses. 5. Ausgabe, 2024.
6. ISO 15739:2023. Photography — Electronic still-picture imaging — Noise measurements. 4. Ausgabe, 2023.
7. CIE 015:2018. Colorimetry, 4th Edition. Commission Internationale de l'Éclairage. DOI: 10.25039/TR.015.2018.

8. ISO/CIE 11664-4:2019. Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space.
9. Eastman Kodak Company. Basic Photographic Sensitometry Workbook. Publication H-740. November 2006.
10. James, T. H. (Hrsg.). The Theory of the Photographic Process. 4th ed. Macmillan, 1977.
11. Stroebel, L.; Compton, J.; Current, I.; Zakia, R. Basic Photographic Materials and Processes. 3rd ed. Focal Press, 2000.
12. Holst, G. C.; Lomheim, T. S. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems. 2nd ed. JCD Publishing, 2011.

Redaktioneller Hinweis: Normausgaben und Bestätigungsstatus wurden für diese Produktionsfassung gegen die offiziellen ISO- bzw. CIE-Katalogeinträge geprüft. Historische Einzelwerte werden in diesem Kapitel bewusst nicht ohne dokumentierte Messbedingungen als universelle Materialkonstanten verwendet.

Übergang zu Kapitel 4

Wenn fotografische Materialeigenschaften messbar und formal beschreibbar werden, stellt sich als Nächstes die Frage, wie diese unterschiedlichen Größen zu einem konsistenten Materialmodell zusammengeführt werden können. Kennlinie, Spektralantwort, Auflösung, Korn, Prozessabhängigkeit und Unsicherheit dürfen nicht als lose Datensammlung nebeneinanderstehen. Sie müssen zu einer strukturierten Beschreibung des fotografischen Materials verbunden werden. Kapitel 4 entwickelt deshalb die Architektur eines solchen Materialmodells und untersucht, welche Beziehungen zwischen den einzelnen Eigenschaftsklassen erhalten bleiben müssen, damit aus Messdaten ein kohärentes fotografisches System wird.