

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

**Richtlinie
DKD-R 2-1**

**Kalibrierung von Sensitometern
zur Sicherung der Bildqualität in
röntgendiagnostischen Betrieben**

Ausgabe 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180823A>



	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2/47

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)


DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: (05 31) 5 92-8021

Internet: www.dkd.eu

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3/47

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 2-1 Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180823A>

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren:

Mitglieder des Fachausschusses *Hochfrequenz und Optik* des DKD in der Zeit von 2003 bis 2009.

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Hochfrequenz und Optik* des DKD.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Vorwort.....	5
1. Geltungsbereich	6
2. Begriffsbestimmung Sensitometer.....	6
3. Kalibrierhierarchie für Sensitometer	6
3.1 Primärnormal	6
3.2 Bezugsnormal (Referenzsensitometer)	6
3.3 Gebrauchsnormal (Kalibriertes Sensitometer).....	7
4. Definition verwendeter Messgrößen	7
4.1 Kenngrößen von Sensitometern.....	7
4.2 Relative spektrale Strahlungsverteilung S	9
4.3 Pulswiederholfrequenz f	9
4.4 Belichtungszeit t	10
4.5 Densitometrische Messgrößen.....	10
5. Prüf- und Messmittel	10
5.1 Densitometer	10
5.2 Auswertung von LE und LK.....	10
5.3 Prüffilm	11
5.4 Umgebungsbedingungen	11
5.5 Messgeräte zur Messung der Belichtungszeit und Pulsfrequenz.....	11
5.6 Spektrometer	11

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	4/47

6.	Prüfung und Kalibrierung der Bezugsnormale (Referenzsensitometer).....	11
6.1	Umgebungsbedingungen	12
6.2	Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung.....	12
6.3	Filmverarbeitung	13
6.4	Messung der relativen spektralen Verteilung.....	13
6.5	Messung des zeitlichen Verlaufs der Lichtemission	13
6.6	Kalibrierung.....	13
6.7	Toleranzen.....	14
6.8	Messunsicherheiten	14
7.	Prüfung und Kalibrierung der Gebrauchsnormale.....	14
7.1	Umgebungsbedingungen	14
7.2	Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung.....	14
7.3	Filmverarbeitung	14
7.4	Weitere Anforderungen	15
7.5	Kalibrierung.....	15
7.6	Toleranzen.....	16
7.7	Messunsicherheiten	16
7.8	Kennzeichnung von Sensitometern.....	17
8.	Mitgeltende Dokumente.....	17
	Anhänge: Messunsicherheiten (MU) nach DAkkS-DKD-3	18
	Anhang 1: MU für die Kenngrößen $\Delta LE_{Bez,j}$ und $\Delta LK_{Bez,j}/LK_{Pool}$ im Ringvergleich.....	18
	Anhang 2: MU für die Messung der kritischen Wellenlängen nach ISO/CD16274	27
	Anhang 3: MU für die Messung der Gesamtbelichtungszeit t_{Puls}	31
	Anhang 4: MU für die Kenngrößen ΔLE_{Geb} und $\Delta LK_{Geb}/LK_{Bez}$ im akkreditierten Laboratorium	33

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	5/47

Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert.

Die DKD-Richtlinien sollen nicht die Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren und -abläufen behindern. Abweichungen von Richtlinien und neue Verfahren sind im Einvernehmen mit der Akkreditierungsstelle zulässig, wenn fachliche Gründe dafür sprechen.

Die vorliegende Richtlinie ist aus folgenden Gründen notwendig: Die derzeit (2018) noch gültige Norm DIN V 6868-55 (Ausgabe 1996), die u. a. die Kalibrierung von Sensitometern beschreibt, soll nach einem Beschluss des verantwortlichen DIN-Normenausschusses Radiologie in dieser Form nicht mehr weiter bestehen, sondern in drei Teile geteilt werden. Die weiterhin bestehende Norm DIN 6868-55 soll nur noch die Durchführung der Funktionsprüfung der Filmverarbeitung beschreiben, eine ISO- oder EN-Norm soll die Spezifikation der Sensitometer beinhalten und der Teil in DIN V 6868-55, welcher die Kalibrierung der Sensitometer beschreibt, soll in einer DKD-Richtlinie dargestellt werden. Diesen letzten Teil in einer DKD-Richtlinie darzustellen ist sinnvoll, weil Kalibrierungen nach DIN V 6868-55 nur von akkreditierten Kalibrierlaboratorien durchgeführt werden dürfen. Die hier vorliegende DKD-Richtlinie stimmt daher inhaltlich in wesentlichen Teilen mit den entsprechenden Abschnitten aus DIN V 6868-55 überein, es ist jedoch an manchen Stellen der technischen Weiterentwicklung und den bei Kalibrierungen gemachten Erfahrungen Rechnung getragen worden.

Die technischen Spezifikationen der Sensitometer sind in wesentlichen Teilen in einem ISO-Normentwurf (ISO/CD 16274 vom 09.01.2002) enthalten. Wenn davon abgewichen wird, ist dies besonders kenntlich gemacht.

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Hochfrequenz und Optik* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 2003 erstellt.

Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum.

Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 2-1. Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 2-1 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 10/2003 veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
2. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 1. Neuauflage

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A		DKD-R 2-1	
			Ausgabe:	09/2018
			Revision:	0
			Seite:	6/47

1. Geltungsbereich

Diese Richtlinie gilt für das Kalibrieren von Sensitometern, die als Bezugsnormale (Referenzsensitometer) oder als Gebrauchsnormale dienen. Referenzsensitometer werden von akkreditierten DKD-Laboratorien zur Kalibrierung von Gebrauchsnormalen verwendet. Kalibrierte Sensitometer werden im Rahmen der Abnahmeprüfung an medizinischen Röntgeneinrichtungen für die Funktionsprüfung der Filmverarbeitung eingesetzt.

2. Begriffsbestimmung Sensitometer

Sensitometer sind gem. DIN V 6868-55 Prüfmittel, welche zur Belichtung von Filmen dienen. Kalibrierte Sensitometer belichten in definierten Spektralbereichen (grün oder blau).

3. Kalibrierhierarchie für Sensitometer

Die Kalibrierhierarchie für Sensitometer besteht aus drei Stufen, dem Primärnormal, den Bezugsnormalen und den Gebrauchsnormalen (siehe Abb. 1).

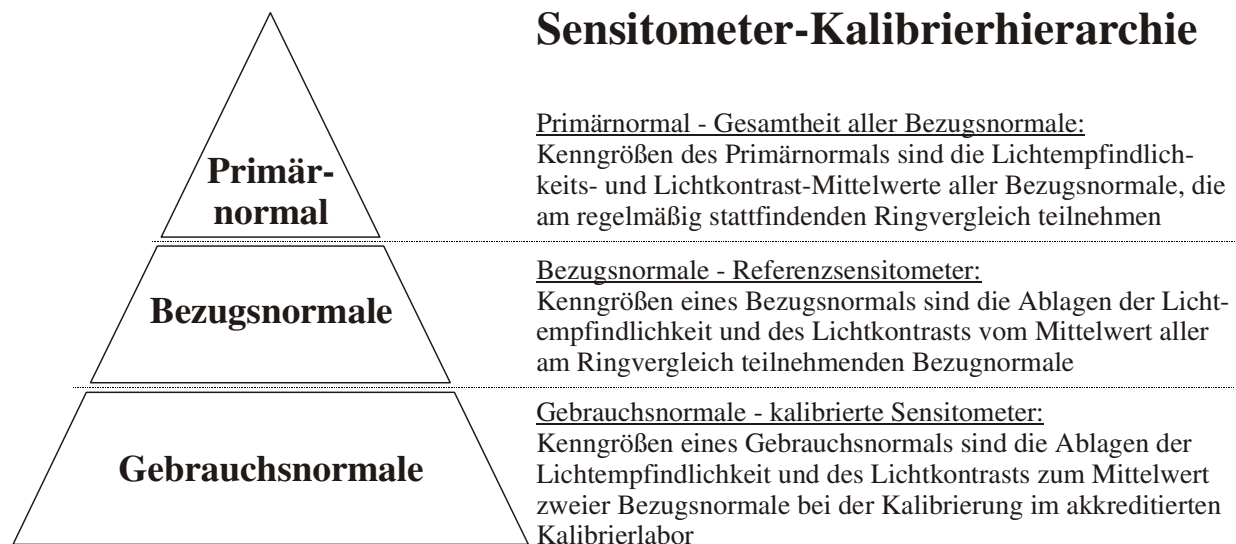


Abb. 1: Kalibrierpyramide für Sensitometer zur Funktionsprüfung der Filmverarbeitung

3.1 Primärnormal

Gemäß DKD-4 ist ein Primärnormal ein Normal, welches die höchsten metrologischen Anforderungen erfüllt oder das weitgehend als solches anerkannt ist und dessen Wert ohne Bezugnahme auf andere Normale der gleichen Messgröße anerkannt wird. Das Primärnormal für Sensitometer wird dargestellt durch die Gesamtheit aller Bezugsnormale, s. Kap. 0.

3.2 Bezugsnormal (Referenzsensitometer)

Gemäß DKD-4 ist ein Bezugsnormal ein Normal mit der höchsten verfügbaren Genauigkeit an einem betrachteten Ort oder in einer Organisation; mit Hilfe von Bezugsnormalen werden dort Messungen abgeleitet. Speziell im Rahmen dieser Richtlinie gelten solche Sensitometer als Referenzsensitometer, die von der PTB und den nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierten DKD-Kalibrierlaboratorien zur Kalibrierung von Gebrauchsnormalen dienen. Diese Referenzsensitometer sind in einem regelmäßig stattfindenden Ringvergleich miteinander zu prüfen und zu kalibrieren.

3.3 Gebrauchsnorm (Kalibriertes Sensitometer)

Gemäß DKD-4 ist ein Gebrauchsnorm ein Normal, welches selbst üblicherweise mit einem Bezugsnorm kalibriert wurde, um Maßverkörperungen, Messgeräte und Referenzmaterialien zu kalibrieren oder zu prüfen. Im Rahmen dieser Richtlinie sind Gebrauchsnormale solche Sensitometer, die von einem akkreditierten Kalibrierlaboratorium, das den in DIN EN ISO/IEC 17025 festgelegten Bedingungen entspricht, durch vergleichende sensitometrische Messungen mit zwei Referenzsensitometern kalibriert worden sind.

4. Definition verwendeter Messgrößen

4.1 Kenngrößen von Sensitometern

Kenngrößen von Röntgenfilmsensitometern für die Funktionsprüfung der Filmverarbeitung sind die Lichtempfindlichkeit (LE) und der Lichtkontrast (LK), siehe Abb. 2. LE und LK sind die Messgrößen, die beim Ringvergleich und im akkreditierten Laboratorium kalibriert werden.

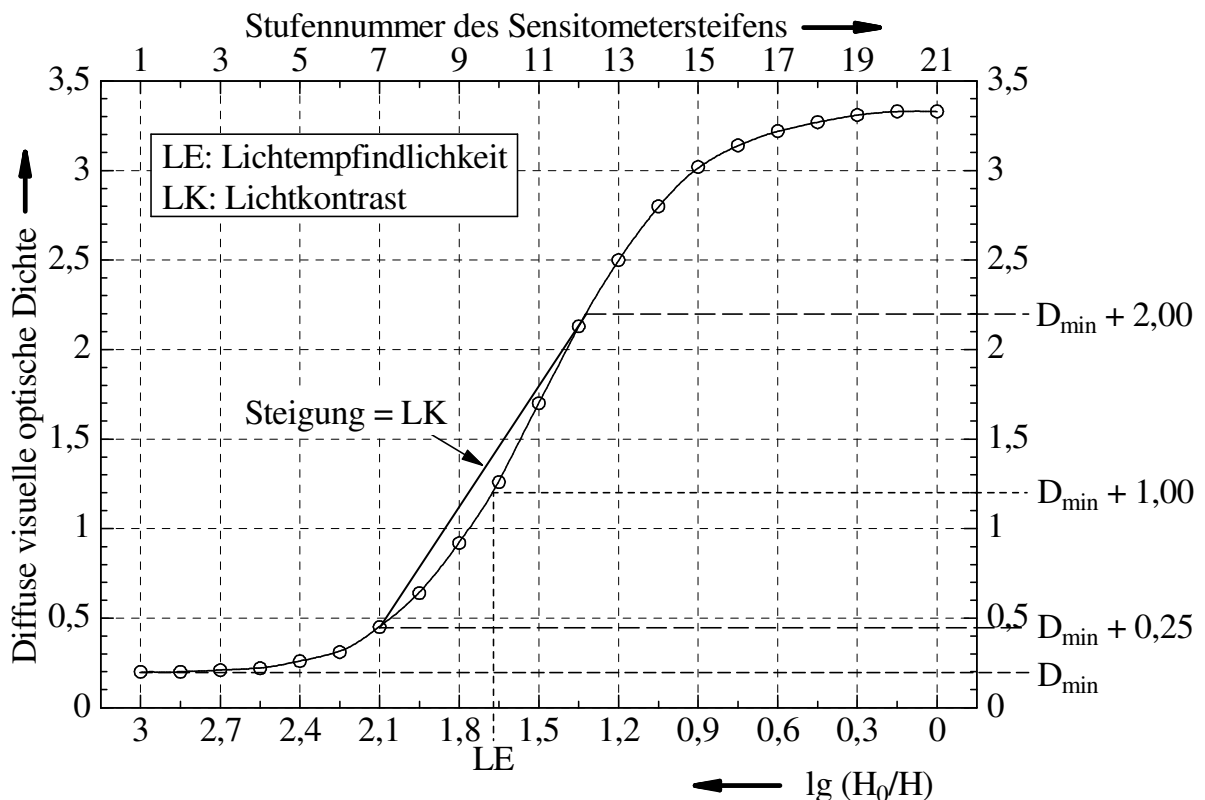


Abb. 2: Darstellung von LE und LK, nähere Erläuterungen s. Kap. 4.1.1 und Kap. 4.1.3.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8/47

4.1.1 Lichtempfindlichkeit LE

Bezieht sich auf den angegebenen Spektralbereich (blau und grün) des Sensitometers. LE wird mit Hilfe des im Sensitometer belichteten Sensitometerstreifens aus der damit erstellten Dichtekurve ermittelt. LE ist definiert durch:

$$LE = \lg \left(\frac{H_0}{H_{LE}} \right)$$

Dabei ist H_0 die Belichtung der Stufe 21 des Sensitometers und H_{LE} diejenige Belichtung, die eine Nettodichte $D_n = 1,0$ auf dem Film erzeugt.

4.1.2 Ablage der Lichtempfindlichkeit ΔLE

ΔLE ist die Ablage der Lichtempfindlichkeit des zu kalibrierenden Normals zum Primärnormal. Die Lichtempfindlichkeit des Primärnormals ($=LE_{Pool}$) ist der Mittelwert der LE-Werte aller Bezugsnormale im Ringvergleich.

4.1.2.1 Ablage der Lichtempfindlichkeit ΔLE der Bezugsnormale

Während des Ringvergleichs ermittelte Ablage der Lichtempfindlichkeit LE eines Bezugsnormals vom Primärnormal:

$$\Delta LE_{Bez} = LE_{Bez} - LE_{Pool}$$

4.1.2.2 Ablage der Lichtempfindlichkeit ΔLE der Gebrauchsnormale

Im akkreditierten Laboratorium ermittelte Ablage der Lichtempfindlichkeit LE eines Gebrauchsnormals zum Mittelwert zweier Bezugsnormale:

$$\Delta LE_{Geb} = LE_{Geb} - 0,5 \cdot (LE_{Bez1} - \Delta LE_{Bez1} + LE_{Bez2} - \Delta LE_{Bez2})$$

LE_{Bez1}, LE_{Bez2} : Gemessene LE-Werte der beiden verwendeten Bezugsnormale im akkreditierten Laboratorium

$\Delta LE_{Bez1}, \Delta LE_{Bez2}$: Ablagen der beiden verwendeten Bezugsnormale zum Primärnormal, s. 0

LE_{Geb} : Gemessener LE-Wert des Gebrauchsnormals im akkreditierten Laboratorium

4.1.3 Lichtkontrast LK

Bezieht sich auf den angegebenen Spektralbereich des Sensitometers (blau und grün) und wird mit Hilfe des im Sensitometer belichteten Sensitometerstreifens aus der damit erstellten Dichtekurve ermittelt. Der Lichtkontrast LK ist die Steigung der Geraden zwischen den Punkten dieser Dichtekurve bei den Nettodichten $D_{n,1} = 0,25$ und $D_{n,2} = 2,0$ (für Folienfilme) mit den zugehörigen Belichtungen H_1 und H_2 .

$$LK = \frac{D_{n,2} - D_{n,1}}{\lg \left(\frac{H_0}{H_1} \right) - \lg \left(\frac{H_0}{H_2} \right)}$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9/47

4.1.4 Ablage des Lichtkontrastes $\Delta LK/LK$

$\Delta LK/LK$ ist die relative Ablage des Lichtkontrasts des zu kalibrierenden Normals zum Primärnormal. Der Lichtkontrast des Primärnormal (= LK_{Pool}) ist der Mittelwert der LK -Werte aller Bezugsnormale im Ringvergleich.

4.1.4.1 Ablage des Lichtkontrastes $\Delta LK/LK$ der Bezugsnormale

Während des Ringvergleichs ermittelte relative Ablage des Lichtkontrasts eines Bezugsnormals zum Primärnormal:

$$\frac{\Delta LK_{Bez}}{LK_{Pool}} = \frac{LK_{Bez} - LK_{Pool}}{LK_{Pool}}$$

4.1.4.2 Ablage des Lichtkontrastes $\Delta LK/LK$ der Gebrauchsnormale

Im akkreditierten Laboratorium ermittelte relative Ablage des Lichtkontrastes LK eines Gebrauchsnormals zum Mittelwert zweier Bezugsnormale:

$$\frac{\Delta LK_{Geb}}{LK_{Bez}} = \frac{LK_{Geb} - 0,5 \cdot (LK_{Bez1} + LK_{Bez2})}{0,5 \cdot (LK_{Bez1} + LK_{Bez2})}$$

LK_{Bez1}, LK_{Bez2} : LK -Werte der beiden verwendeten Bezugsnormale im akkreditierten Laboratorium

LK_{Bez} : LK -Mittelwert der beiden verwendeten Bezugsnormale

LK_{Geb} : LK -Werte des Gebrauchsnormals im akkreditierten Laboratorium

Der LK -Wert für ein Bezugsnormal (hier als Beispiel für Bezugsnormal 1) im akkreditierten Laboratorium berechnet sich unter Berücksichtigung der im Ringvergleich ermittelten Abweichung (s. 0) nach der Formel:

$$LK_{Bez1} = LK_{Mess,Bez1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta LK_{Bez1}}{LK_{Pool}}}$$

bzw. bei Angabe von $\frac{\Delta LK_{Bez1}}{LK_{Pool}}$ in %:

$$LK_{Bez1} = LK_{Mess,Bez1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta LK_{Bez1}}{LK_{Pool}} \cdot \frac{1}{100}}$$

$LK_{Mess,Bez1}$: Angezeigter LK -Wert für Bezugsnormal 1 im DKD-Labor

4.2 Relative spektrale Strahlungsverteilung S

Aufteilung der Strahlungsenergie einer Lichtquelle auf kleine, gleich breite Wellenlängenbereiche. Bei der relativen spektralen Strahlungsverteilung S sind alle Strahlungswerte auf einen willkürlichen Wert bezogen.

4.3 Pulswiederholffrequenz f

Wiederholffrequenz der Lichtblitze, mit denen Sensitometer den Film belichten.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	10/47

4.4 Belichtungszeit t

Gesamtdauer der Lichtblitzfolge, mit denen Sensitometer den Film belichten.

4.5 Densitometrische Messgrößen

4.5.1 Visuelle diffuse optische Dichte bei Transmission

Logarithmus zur Basis 10 des Kehrwertes des visuellen Transmissionsfaktors (Normen s. Kap. 8). Die visuelle diffuse optische Dichte bei Transmission wird im Folgenden kurz „Dichte“ genannt.

4.5.2 Minimaldichte D_{min}

Eine nach der Verarbeitung vorhandene Dichte, die durch ungewollte Belichtung oder durch Einflüsse bei der Fabrikation, Lagerung oder Verarbeitung bedingt ist. Die Dichte der Unterlage wird der Minimaldichte zugerechnet.

4.5.3 Nettodichte D_n

Die Dichte abzüglich der Minimaldichte D_{min} .

4.5.4 Dichtekurve

Die graphische Darstellung der Dichte einer photographischen Schicht in Abhängigkeit vom Zehnerlogarithmus der Exposition.

5. Prüf- und Messmittel

Bei der Kalibrierung von Sensitometern sind die im Folgenden genannten Mess- und Prüfmittel zu verwenden, wobei die unter Kapitel 0 und 0 genannten Messmittel nur für die Schaffung und Prüfung von Referenzsensitometern im Rahmen des Ringvergleichs notwendig sind.

5.1 Densitometer

Das Densitometer dient zur Messung der Dichte der Sensitometerstreifen. Das Densitometer muss die Messung der visuellen optischen Dichte im diffusen Licht nach DIN 4512-8 und DIN 4512-9 bzw. nach ISO 5-2 und ISO 5-3 ermöglichen.

Die Wiederholstandardabweichung für die Messwerte der Dichte darf nicht größer als 0,01 sein. Die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) der Dichtemessung für Dichten $D \leq 1,0$ darf nicht größer als 0,025 sein; für Dichten $D > 1,0$ darf die Messunsicherheit nicht größer als $\Delta D/D = 0,025$ sein. Zur Kontrolle durch den Anwender muss es möglich sein, das Densitometer an zwei Stellen, z.B. bei $D = 0$ (ohne Probe im Strahlengang) und bei $D \geq 2,0$ mit einem auf nationale Normale zurückgeführten und kalibrierten Stufenkeil abzugleichen.

Die Anzeige des Densitometers muss in Abständen von höchstens sechs Wochen oder, falls Kalibrierungen in Intervallen länger als 6 Wochen durchgeführt werden, vor einem solchen Kalibrierzyklus mit einem von einem nationalen Metrologieinstitut kalibrierten Stufenkeil kontrolliert werden. Dabei ist mindestens je ein Dichtewert im unteren und oberen Dichtebereich zu messen.

5.2 Auswertung von LE und LK

Zur Bestimmung von LE und LK aus der Dichtekurve ist ein Verfahren zu wählen, welches zu keinen größeren Messunsicherheits-Beiträgen ($k = 2$) als 0,01 für LE und 2 % für LK führt.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	11/47

5.3 Prüffilm

Es wird ein UV/Blau-empfindlicher Film (für den Betriebsmodus „blau“ bzw. für den blauen Spektralbereich) und ein orthochromatischer Film (für den Betriebsmodus „grün“ bzw. für den grünen Spektralbereich) verwendet. Die jeweils zu verwendenden Filmtypen (gängige Markentypen) legen die Teilnehmer am Ringvergleich in Abstimmung mit den Arbeitskreisen AK 6868-55, bzw. AK 6868-2 fest.

5.4 Umgebungsbedingungen

Zur Messung der Umgebungstemperatur ist ein Raumluft-Thermometer zu verwenden, das eine Unsicherheit ($k=2$) von 0,5 K im Bereich von 20°C bis 26°C hat. Zur Messung der relativen Luftfeuchte ist ein Hygrometer erforderlich, dessen Anzeigewerte bei wiederholter Messung und bei konstanter Luftfeuchtigkeit um maximal $\pm 5\%$ schwanken dürfen.

5.5 Messgeräte zur Messung der Belichtungszeit und Pulsfrequenz

Zur Messung der Belichtungszeit ist ein Messgerät mit einer Unsicherheit von 1 ms ($k = 2$) in einem Messbereich von 0 ms bis 200 ms ausreichend. Das Gerät zur Messung der Pulsfrequenz sollte eine Grenzfrequenz von mindestens 10 kHz haben.

5.6 Spektrometer

Zur Messung der spektralen Verteilung des Emissionsspektrums der Sensitometer wird ein Spektrometer verwendet. Die Unsicherheiten ($k = 2$) der mit dem Spektrometer gemessenen Wellenlängen, bei denen die spektrale Verteilung bestimmte Schwellenwerte (nach ISO/CD 16274) annimmt, müssen kleiner sein als das 0,3-fache des nach ISO/CD 16274 zulässigen Toleranzbereichs für diese Wellenlängen. Um dies zu erreichen, ist das Gerät hinsichtlich der Wellenlängenskala und der relativen spektralen Empfindlichkeit zu kalibrieren. An die Gerätespezifikationen des Spektrometers werden folgende Mindestanforderungen gestellt:

- Spektral empfindlich zwischen 380 nm und 600 nm
- Wellenlängenauflösung ≤ 1 nm
- Optischer Bandpass ≤ 3 nm
- Mindest-Signal-Rausch-Verhältnis bei der Messung des Spektrums „blau“ des Sensitometers: 50:1
- ANMERKUNG: Dieses Signal-Rausch-Verhältnis sollte aus praktischen Erwägungen mit maximal 5 aufsummierten Belichtungen erreicht werden.
- Einflüsse aufgrund kosmischer Höhenstrahlung (Peaks) und Rauschanteile können durch geeignete Auswertalgorithmen reduziert werden.

6. Prüfung und Kalibrierung der Bezugsnormale (Referenzsensitometer)

Die Gesamtheit der Referenzsensitometer wird in einem regelmäßig $[(18 \pm 3)$ Monate] stattfindenden Ringvergleich geprüft und miteinander verglichen. Teilnehmer an dem Ringvergleich sind die Laboratorien, die Referenzsensitometer besitzen. Die Teilnehmer legen Ort und Zeitpunkt in eigener Verantwortung fest. Einzelheiten zur Durchführung des Ringvergleichs sind in einer Arbeitsanweisung (DKD-AA-Sen) niedergeschrieben, welche von den Teilnehmern des Ringvergleichs kontinuierlich gepflegt wird. Die Ergebnisse des Ringvergleichs sind in einem Ergebnisbericht zusammenzustellen. Dieser Ergebnisbericht enthält eine Beschreibung der verwendeten Messmittel und Messverfahren, eine Messunsicherheitsberechnung (sofern von den gültigen Dokumenten abweichend), die Messwerttabellen sowie eine Liste der als Referenzsensitometer geprüften und anerkannten Geräte.

Die Gesamtheit der Bezugsnormale muss mindestens 25 Geräte umfassen. An dem Ringvergleich müssen alle funktionsfähigen Geräte, mindestens jedoch 20, beteiligt sein. Neue

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	12/47

Bezugsnormale können nur im Rahmen des Ringvergleichs geschaffen werden, indem sie unter Bezug auf die Mittelwerte der Bezugsnormale kalibriert werden. Auf diese Weise sind auch technisch defekte Bezugsnormale durch neue zu ersetzen. Durch die Aufnahme von Neugeräten in den Pool dürfen die Pool-Mittelwerte der Kenngrößen LE und LK nicht verschoben werden.

6.1 Umgebungsbedingungen

Für die Raumtemperatur bei den Kalibrierungen ist ein Temperaturbereich von $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ einzuhalten. Die relative Luftfeuchte muss während der Messreihe in einem Bereich von $\pm 15\%$ konstant sein. Die Belichtungen dürfen nur dann erfolgen, wenn sich Film und Sensitometer im Gleichgewicht mit den in der Umgebung herrschenden klimatischen Bedingungen befinden.

6.2 Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung

Die Dunkelraumbeleuchtung wird für alle verwendeten Filmtypen geprüft. Nach Ausschalten der Dunkelraumbeleuchtung und nach Dunkeladaption des Auges wird die Verdunkelungseinrichtung visuell geprüft. Alle Störlichtquellen, die möglicherweise die Filme beeinflussen können, müssen beseitigt werden.

6.2.1 Durchführung der Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung: Methode 1

Zur Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung wird der Film am Arbeitsplatz stufenweise mit unterschiedlichen Zeiten der Dunkelraumbeleuchtung ausgesetzt. Die Prüfung muss mit einem auf Dichte $D = 0,6$ bis $1,0$ homogen vorbelichteten Film durchgeführt werden.

ANMERKUNG 1: Vorbelichtete Filme reagieren mit einem höheren Dichteanstieg.

ANMERKUNG 2: Die Vorbelichtung erfolgt am einfachsten durch Belichten eines in eine Kassette eingelegten Films mit einem Röntgengerät. Einstellwerte: Etwa 50 kV, 1 mAs bis 10 mAs je nach verwendeter Folie. Diese Aufnahme ist möglichst mit maximal einstellbarem Fokus-Film-Abstand anzufertigen um den Heel-Effekt weitestgehend zu minimieren. Ggf. ist mit einer Leeraufnahme die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung zu kontrollieren, um eventuelle Messartefakte durch die Ungleichmäßigkeit der Ausleuchtung des Strahlenfeldes festzustellen.

Der Film wird nach der Vorbelichtung bei vollständiger Dunkelheit mit einem Stück Karton abgedeckt. Nach Einschalten der Dunkelraumbeleuchtung (gegebenenfalls Konstanz der Lichtquelle abwarten) wird der Film durch Verschieben des Kartons etwa 4 cm freigegeben und 2 min belichtet. Anschließend wird der Film 1 min, 30 s und 2 x 15 s belichtet, indem der Karton jeweils etwa 4 cm verschoben wird. Nach der letzten Belichtung wird der Film mit einem Stück Karton abgedeckt und die Dunkelraumbeleuchtung ausgeschaltet. Der Film wird bei völliger Dunkelheit verarbeitet.

Die Stufe mit der ersten visuell deutlich erkennbaren zusätzlichen Dichte (entspricht etwa einer Zunahme von $D = 0,05$) wird bestimmt.

6.2.2 Durchführung der Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung: Methode 2

Zunächst werden mit einem Sensitometer bei völliger Dunkelheit auf dem zu prüfenden Filmmaterial sechs Stufenkeile aufbelichtet und lichtdicht abgedeckt. Im nächsten Schritt wird die Dunkelraumbeleuchtung eingeschaltet. Fünf der Filmstreifen werden unter typischen Arbeitsbedingungen der Dunkelraumbeleuchtung definierten Zeiten ausgesetzt, ein Streifen 4 min, einer 2 min, einer 1 min, einer 30 s und einer 15 s. Anschließend wird die Dunkelraumbeleuchtung ausgeschaltet und alle Streifen werden zeitgleich verarbeitet. Von dem Referenzstreifen (der Sensitometerstreifen, welcher der Dunkelraumbeleuchtung nicht ausgesetzt war) wird der LK-Wert, die Dichte und die Dichtestufe ermittelt, die am nächsten bei $D = 1,2$ liegt. Von den anderen entwickelten Sensitometerstreifen werden die gleichen Dichtestufen und die LK-Werte ausgemessen.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	13/47

Es wird der Streifen bestimmt, dessen Dichte bei o. g. Stufe um mehr als $D = 0,04$ gestiegen, bzw. der ermittelte LK-Wert um mehr als 10 % niedriger gegenüber denen des Referenzstreifens ist.

6.2.3 Anforderung

Die maximale Dauer, welcher der jeweilige Filmtyp vor und nach der Belichtung einer gegebenen Dunkelraumbelichtung ausgesetzt werden kann, darf nicht mehr als die halbe Belichtungszeit der in 0 ermittelten Stufe oder des in 0 ermittelten Stufenkeils sein.

6.3 Filmverarbeitung

Bei der Kalibrierung müssen für die Verarbeitung der Prüffilme die Anforderungen und Bedingungen erfüllt sein, wie sie an die Funktionsprüfung der Filmverarbeitung nach DIN V 6868-55 gestellt werden. Davon abweichende Bedingungen müssen dokumentiert werden. Insbesondere soll während des Ringvergleichs die Abweichung des LE-Wertes von den Vorgabewerten der Filmhersteller in einem Bereich von $\Delta LE = \pm 0,06$ liegen.

6.4 Messung der relativen spektralen Verteilung

Bei jedem Ringvergleich sind mit dem Spektrometer für jedes Referenzsensitometer die relativen spektralen Verteilungen der Belichtungen zu messen. Es sind die Wellenlängen zu bestimmen, bei denen das Emissionsspektrum die in ISO/CD 16274 geforderten relativen Intensitätswerte erreicht. Die Geräte, deren Spektren nicht innerhalb der in ISO/CD 16274 festgelegten Toleranzen liegen, sind aus der Gesamtheit der Bezugsnormale zu entfernen.

6.5 Messung des zeitlichen Verlaufs der Lichtemission

Bei jedem Ringvergleich sind für jedes Referenzsensitometer der zeitliche Verlauf der Lichtblitze und die Gesamtdauer der Lichtblitzfolge zu messen sowie daraus die Belichtungszeit und die Pulswiederholfrequenz zu ermitteln. Die Geräte, deren Belichtungszeit nicht innerhalb der in DIN V 6868-55 festgelegten Toleranzen liegen, sind aus der Gesamtheit der Bezugsnormale zu entfernen. Die Geräte, deren Pulswiederholfrequenz nicht innerhalb der in ISO/CD 16274 festgelegten Toleranzen liegen, sind aus der Gesamtheit der Bezugsnormale zu entfernen. Die Wiederholfrequenz der Lichtpulse kann als überprüft angesehen werden, wenn die Frequenz des AC-Erregerfeldes in einem Bereich von 0,75 kHz und 3,0 kHz liegt. Die dominierende (vorherrschende) Lichtpulsfrequenz ist maßgeblich: Es kann sein, dass eine der Harmonischen des Lichtpulssignals größer ist als die Amplitude der Grundfrequenz. Die dominierende Frequenz kann durch eine Frequenzanalyse ermittelt werden.

6.6 Kalibrierung

Beim Ringvergleich werden für jedes Bezugsnormal die Größen LE_{Bez} und LK_{Bez} gemessen und die Abweichungen zum Mittelwert über alle Sensitometer („Pool-Mittelwerte“ LE_{Pool} und LK_{Pool}) festgestellt, s. Kap. 0 und 0.

Um die Einflüsse von möglichen Schwankungen der Filmverarbeitung während der Messungen feststellen und ggf. korrigieren zu können, werden neben den Filmstreifen des jeweiligen Bezugsnormals auch Filmstreifen eines Sensitometers, des sogenannten „Driftsensitometers“, aufbelichtet und entwickelt. Dieses Driftsensitometer sollte nicht dem Pool der Bezugsnormale entstammen.

Beim Ringvergleich sind für die Messung eines Gerätes für jedes Emissionsspektrum mindestens vier Filmstreifen je Bezugsnormal und mindestens zwei Filmstreifen des Driftsensitometers zu belichten. Unmittelbar nach der Belichtung sind die Streifen dem Sensitometer zu entnehmen und spätestens fünf Minuten nach der Belichtung zu verarbeiten. Dabei ist darauf zu achten, dass die Zeit zwischen Belichtung und Verarbeitung für alle Filmstreifen gleich ist. Die belichteten Filme werden an derselben Stelle des Einlegetisches

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	14/47

der Entwicklungsmaschine immer gleich eingelegt und müssen mit der Stufe mit der geringsten Belichtung zuerst in die Entwicklungsmaschine eingegeben werden.

6.7 Toleranzen

Wenn ein Sensitometer beim Ringvergleich größere Schwankungsbreiten in LE_{Bez} als 0,03 (größter Einzelwert minus kleinstem Einzelwert für das Sensitometer) oder größere Schwankungsbreiten in LK_{Bez} als 6% (größter Einzelwert minus kleinstem Einzelwert durch kleinsten Einzelwert für das Sensitometer) zeigt, ist es aus der Gesamtheit der Referenzgeräte zu entfernen. Da auch weitere, nicht dem Sensitometer zuzurechnende Ursachen für erhöhte Schwankungsbreiten existieren (z.B. Fehlbelichtungen in der Dunkelkammer, Fehler bei der densitometrischen Auswertung), kann in einem solchen Fall eine neue Auswertung bzw. eine neue Belichtungsreihe vorgenommen werden.

Ebenso werden Referenzgeräte, deren Messwerte im Vergleich zu den Messwerten des vorhergehenden Ringvergleichs um mehr als $\pm 0,04$ in ΔLE_{Bez} bzw. $\pm 0,07$ in LK_{Bez}/LK_{Pool} abweichen, aus der Gesamtheit entfernt.

Die Referenzsensitometer müssen so kalibriert sein, dass ihre gemessenen ΔLE_{Bez} -Werte innerhalb von $\pm 0,03$ und ihre $\Delta LK_{Bez}/LK_{Pool}$ -Werte innerhalb von $\pm 0,06$ liegen.

6.8 Messunsicherheiten

In DIN V 6868-55 werden für die Kalibrierung der Bezugsnormale maximale erweiterte Messunsicherheiten bei einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ genannt:

- für ΔLE_{Bez} : $U = 0,021$
- für $\Delta LK_{Bez}/LK_{Pool}$: $U = 0,035$

Für diese Messgrößen, die Messung der relativen spektralen Verteilung des Emissionsspektrums und die Messung des zeitlichen Verlaufs der Lichtemission sind Messunsicherheitsberechnungen nach DKD-3 durchzuführen. Beispiele dafür sind in den Anhängen 1 bis 3 aufgeführt.

7. Prüfung und Kalibrierung der Gebrauchsnormale

Gebrauchsnormale werden durch vergleichende sensitometrische Messungen mit zwei Referenzsensitometern (Bezugsnormale) in einem akkreditierten Kalibrierlaboratorium kalibriert, das den Bedingungen nach DIN EN ISO/IEC 17 025 genügt. Dabei werden die Abweichungen in der Lichtempfindlichkeit und im Lichtkontrast des Gebrauchsnormals zu den Mittelwerten der beiden verwendeten Referenzsensitometer festgestellt (ΔLE_{Geb} und $\Delta LK_{Geb}/LK_{Bez}$).

7.1 Umgebungsbedingungen

Für die Raumtemperatur bei den Kalibrierungen ist ein Temperaturbereich von $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ einzuhalten. Die relative Luftfeuchte muss während der Messreihe in einem Bereich von $\pm 15\%$ konstant sein. Die Belichtung darf nur dann erfolgen, wenn sich Film und Sensitometer im Gleichgewicht mit den in der Umgebung herrschenden klimatischen Bedingungen befinden.

7.2 Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung

Die Prüfung der Dunkelraumbeleuchtung wird entsprechend Kapitel 0 durchgeführt.

7.3 Filmverarbeitung

Es gelten die gleichen Bedingungen wie bei der Kalibrierung der Bezugsnormale, s. Kapitel 0.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	15/47

7.4 Weitere Anforderungen

Für die verwendeten Bezugsnormale und die zu kalibrierenden Sensitometer muss die Konformität mit den Anforderungen nach DIN V 6868-55 bzw. ISO/CD 16274 nachgewiesen sein. Die Bezugsnormale müssen an dem zuletzt stattgefundenen Ringvergleich teilgenommen haben und als anerkannte Referenzsensitometer eingestuft sein.

Falls der Hersteller des zu kalibrierenden Sensitometers die Konformität nur über einen Zeitraum von zwei Jahren garantiert oder über den Zeitraum der Gültigkeit der Konformitätserklärung keine Angaben macht, müssen die Sensitometer bei der Rekalibrierung auf ihre Konformität hin neu überprüft werden. Falls der Verdacht besteht, dass die Geräte nicht mehr den Anforderungen entsprechen, sind die Sensitometer auf ihre Konformität hin neu zu überprüfen. Besteht der Verdacht, dass sich das Gerät in seinen technischen Eigenschaften signifikant geändert hat oder wenn bei der Rekalibrierung im Vergleich zur vorhergehenden Kalibrierung ein Unterschied in ΔLE_{Geb} von mehr als 0,06 oder in LK_{Geb}/LK_{Bez} von mehr als 0,10 festgestellt wird, muss das Gerät auf seine Konformität hin neu überprüft werden.

7.5 Kalibrierung

Vor der Kalibrierung eines Gebrauchsnormals wird empfohlen zu prüfen, ob die Bezugsnormale noch die gleichen Abweichungen relativ zueinander wie bei dem letzten Ringvergleich haben. Dazu werden jeweils 3 Streifen der zwei zu verwendenden Bezugsnormale belichtet. Die Positionierung der gleichzeitig zu entwickelnden Filmstreifen auf dem Einlegetisch erfolgt alternierend. Sofern nach Einberechnung der Ablagen (ΔLE_{Bez} und $\Delta LK_{Bez}/LK_{Pool}$) aus dem Ringvergleich die Werte für LE_{Bez} und LK_{Bez} der beiden Bezugsnormale im Rahmen der Messunsicherheiten gleich sind, kann anschließend mit der Kalibrierung des Gebrauchsnormals begonnen werden.

Dazu werden jeweils 3 Streifen des zu kalibrierenden Gebrauchsnormals mit 3 Streifen des ersten Bezugsnormals und anschließend jeweils 3 Streifen des Gebrauchsnormals und des zweiten Bezugsnormals gleichzeitig entwickelt. Auch hier ist die Positionierung am Einlegetisch eine alternierende. Nach Auswertung aller Sensitometerstreifen ergibt sich jeweils ein Mittelwert für die Lichtempfindlichkeit und den Lichtkontrast für jedes der beiden Referenzsensitometer und für das zu kalibrierende Sensitometer. Die für jedes Referenzsensitometer bekannten Abweichungen in der Lichtempfindlichkeit und dem Lichtkontrast zu den jeweiligen Pool-Mittelwerten sind zu berücksichtigen. Stimmen die beiden LE -Werte und die beiden LK -Werte der eingesetzten Referenzsensitometer im Rahmen der Messunsicherheit überein, können die Werte beider Referenzsensitometer gemittelt werden. Zeigen sich jedoch größere Abweichungen, so ist unter Verwendung eines dritten Referenzsensitometers zu prüfen, ob sich eines der eingesetzten Referenzsensitometer verändert hat.

Bei der Kalibrierung werden die Abweichungen der mit dem zu kalibrierenden Sensitometer gemessenen Werte für die Lichtempfindlichkeit und den Lichtkontrast zu den Mittelwerten der beiden verwendeten Referenzsensitometern festgestellt (ΔLE_{Geb} und $\Delta LK_{Geb}/LK_{Bez}$).

Tabelle 1 zeigt als Beispiel die Auswertetabelle für zwei zu kalibrierende Sensitometer.

	Abweichungen zum Pool-Mittelwert		Werte am Tage der Kalibrierung		Korrigierte Werte am Tage der Kalibrierung		Abweichungen der zu kalibrierenden Sensitometer zum Mittelwert der zwei Referenzsensitometer		Anerkennung des Sensitometers als kalibriertes Sensitometer
	ΔLE_{Bez}	$\Delta LK_{Bez}/LK_{Pool}$	LE	LK	LE	LK	ΔLE_{Geb}	$\Delta LK_{Geb}/LK_{Bez}$	
Referenzsensitometer 1	+0,02	+0,03	1,42	2,74	1,40	2,66	-	-	-
Referenzsensitometer 2	-0,03	-0,04	1,38	2,57	1,41	2,68			
Mittelwerte aus 1 und 2	-	-	-	-	1,405	2,67	-	-	-
Zu kalibrierendes Sensitometer 1	-	-	1,42	2,92	-	-	+0,015	+0,094	NEIN
Zu kalibrierendes Sensitometer 2	-	-	1,38	2,60	-	-	-0,025	-0,026	JA

Tabelle 1: Beispiel für eine Auswertung bei der Kalibrierung von zwei Gebrauchsnormalen

7.6 Toleranzen

Wie in der DIN V 6868-55 beschrieben, ist ein Sensitometer dann ein kalibriertes Sensitometer (Gebrauchsnormal), wenn der gemessene ΔLE_{Geb} -Wert innerhalb von $\pm 0,04$ und der gemessene $\Delta LK_{Geb}/LK_{Bez}$ -Wert innerhalb von $\pm 0,06$ liegt. Ist ΔLE_{Geb} eines Prüflings größer als 0,04, kann durch geeignete Maßnahmen, z. B. durch die lichtmesstechnisch kontrollierte Veränderung der Belichtung mit einem photoelektrischen Empfänger, eine Justierung durchgeführt werden. Ist für einen Prüfling $\Delta LK_{Geb}/LK_{Bez}$ größer als 0,06, so ist es nur durch größere Eingriffe möglich, die Spezifikation einzuhalten. Das Ergebnis derartiger Eingriffe muss durch eine vergleichende sensitometrische Messung erneut überprüft werden.

7.7 Messunsicherheiten

Nach DIN V 6868-55 dürfen bei der Kalibrierung der Gebrauchsnormale folgende erweiterte Messunsicherheiten (für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95%) nicht überschritten werden:

- für ΔLE_{Geb} : $U = 0,032$
- für $\Delta LK_{Geb}/LK_{Bez}$: $U = 0,057$

Dafür ist eine Messunsicherheitsberechnung nach DAkkS-DKD-3 durchzuführen. Eine exemplarische Messunsicherheitsberechnung findet sich im Anhang 4.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	17/47

7.8 Kennzeichnung von Sensitometern

Kalibrierte Sensitometer sind wie folgt zu kennzeichnen:

- mit der Bezeichnung: „Kalibriertes Sensitometer nach DIN V 6868-55“, bzw. Bezugnehmend auf die jeweils gültige Nachfolgenorm der DIN V 6868-55
- dem Datum der letzten Kalibrierung
- dem Namen des Kalibrierlaboratoriums, das die Kalibrierung durchgeführt hat

8. Mitgeltende Dokumente

Normen für die diffuse optische Dichte:

- DIN 4512-8: Photographische Sensitometrie - Bestimmung der optischen Dichte - Geometrische Bedingungen für Messungen bei Transmission
- DIN 4512-9: Photographische Sensitometrie - Bestimmung der optischen Dichte - Spektrale Bedingungen
- ISO 5-2: Photography - Density measurements - Part 2: Geometrie conditions for transmission density
- ISO 5-3: Photography - Density measurements - Part 3: Spectral conditions

Normen zur Lichtsensitometrie an Röntgenfilmen:

- DIN V 6868-55 (1996): Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben Teil 55: Abnahmeprüfung an medizinischen Röntgen-Einrichtungen - Funktionsprüfung der Filmverarbeitung
- ISO/CD 16274 (2002): Photography – Specification of light sensitometers used for film processing control in medical radiography

Norm zur Qualitätssicherung:

DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

Mitgeltende DAkKS-DKD-Schriften:

- DAkKS-DKD-3: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (Deutsche Übersetzung von EA 4/02 „Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration“)
- DAkKS-DKD-3-E2: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen: Beispiele 2 (Deutsche Übersetzung von EA-4/02 „Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration“, Supplement 2)
- DAkKS-DKD-4: Rückführung von Mess- und Prüfmitteln auf nationale Normale

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	18/47

Anhänge: Messunsicherheiten (MU) nach DAkkS-DKD-3

Anhang 1: MU für die Kenngrößen $\Delta LE_{\text{Bez},J}$ und $\Delta LK_{\text{Bez},J}/LK_{\text{Pool}}$ im Ringvergleich

Messunsicherheiten für die Bestimmung von $\Delta LE_{\text{Bez},J}$ und $\Delta LK_{\text{Bez},J}/LK_{\text{Pool}}$ der Bezugsnormale im Ringvergleich

Definition der Lichtempfindlichkeit LE nach DIN V 6868-55

$$LE = \lg\left(\frac{H_0}{H_{D=1}}\right)$$

Dabei ist H_0 die Belichtung bei Stufe 21 des Stufenkeils und $H_{D=1}$ diejenige Belichtung, die benötigt wird, um eine Nettodichte von $D_n = 1$ (entspricht $D_{\min} + 1,0$) zu erzielen, siehe Bild 1. Da der Logarithmus der Belichtung, der hinter einer der Keilstufen des Sensitometers vorliegt, proportional zu den Stufennummern der Keilstufen ist, lässt sich $\lg(H_0/H_{D=1})$ auch als Funktion von $z_{D=1}$ beschreiben, wobei $z_{D=1}$ die Stufennummer ist, bei der die Nettodichte 1 vorliegt: $\lg(H_0/H_{D=1}) = 3,15 - 0,15 \cdot z_{D=1}$. Daher lautet eine andere gleichwertige Definition für LE:

$$LE = 3,15 - 0,15 \cdot z_{D=1}$$

Da bei der Messung die Nettodichte 1 praktisch nie mit einer der ganzzahligen Stufennummern des Sensitometerstreifens zusammenfällt, muss zwischen den Stufennummern interpoliert werden, um $z_{D=1}$ zu ermitteln. Der im Einzelnen verwendete Interpolationsalgorithmus ist in DIN V 6868-55 nicht festgeschrieben; die Interpolation kann z.B. grafisch, wie in Bild 1 gezeigt, erfolgen.

Definition des Lichtkontrastes LK nach DIN V 6868-55

Der Lichtkontrast LK ist die Steigung der Geraden zwischen den Punkten der Dichtekurve bei den Nettodichten $D_{n,1} = 0,25$ (entspricht $D_{\min} + 0,25$) und $D_{n,2} = 2,0$ (entspricht $D_{\min} + 2,0$) mit den zugehörigen Belichtungen H_1 und H_2 , siehe Bild 1. H_0 ist die Belichtung bei Stufe 21 des Stufenkeils. (D_{\min} : Minimaldichte)

$$\begin{aligned} LK &= \frac{D_{n,2} - D_{n,1}}{\lg(H_0/H_1) - \lg(H_0/H_2)} = \frac{(D_{\min} + 2,0) - (D_{\min} + 0,25)}{\lg(H_0/H_1) - \lg(H_0/H_2)} \\ &= \frac{1,75}{\lg(H_0/H_1) - \lg(H_0/H_2)} = \frac{1,75}{\lg H_2 - \lg H_1} \end{aligned}$$

Analog zur Definition für LE lässt sich LK auch als Funktion der Stufennummern darstellen, bei denen die Nettodichten 0,25 bzw. 2,0 erzielt werden. Analog zur obigen Diskussion, muss auch hier eine Interpolation zwischen den ganzzahligen Stufennummern vorgenommen werden.

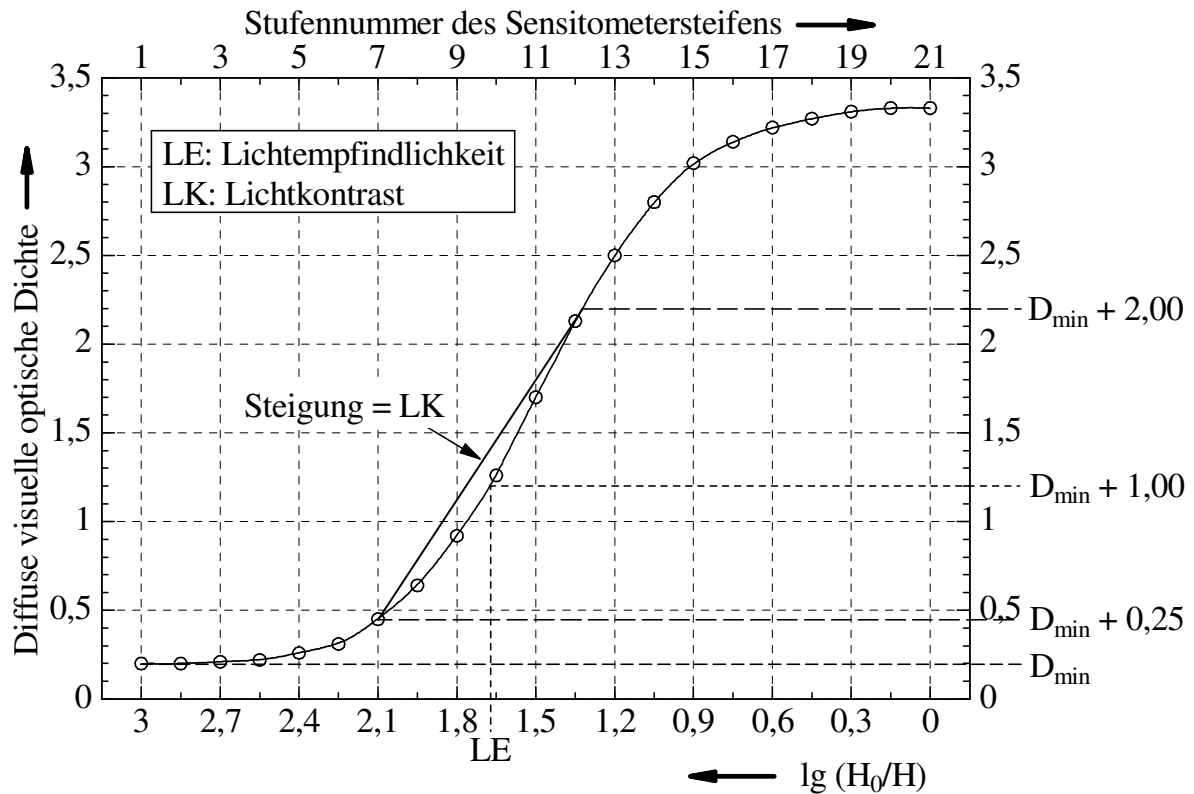


Bild 1: Darstellung von LE und LK nach DIN V 6868-55, Definitionen dieser Kenngrößen und Erläuterungen siehe oben in den Absätzen „Definition der Lichtempfindlichkeit LE nach DIN V 6868-55“ und „Definition des Lichtkontrastes LK nach DIN V 6868-55“ in diesem Anhang 1.

1 Messunsicherheit für $\Delta LE_{Bez,J}$

Entsprechend den Regeln nach DAkkS-DKD-3 werden eine Modellfunktion für $\Delta LE_{Bez,J}$ aufgestellt und die Einzelbeiträge zur Messunsicherheit abgeschätzt. Die erweiterten Messunsicherheiten werden mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ angegeben.

1.1 Modellgleichung

Bei der Kalibrierung im Ringvergleich werden die Ablagen der Bezugsnormale ($J = 1, N$) zum Mittelwert der Bezugsnormale, d.h. zum „Pool“-Mittelwert, festgestellt. Es gelten folgende Beziehungen für das Bezugsnormal J bei der Kalibrierung im Ringvergleich:

$\Delta LE_{Bez,J} = LE_{Bez,J} - LE_{Pool} \quad (1)$	$LE_{Bez,J}$: LE-Wert für Bezugsnormal J LE_{Pool} : „Pool“-Mittelwert $\Delta LE_{Bez,J}$: Ablage des Bezugsnormals J vom „Pool“-Mittelwert
$LE_{Bez,J} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LE_{Bez,J,i} - \Delta LE_{Drift} \quad (2)$	$LE_{Bez,J,i}$: i -ter LE-Wert für Bezugsnormal J n : Anzahl Einzel-Messungen im Ringvergleich für Bezugsnormal, $n=4$ ΔLE_{Drift} : Korrektur aufgrund der Drift der Filmverarbeitung
$\Delta LE_{Drift} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m LE_{Drift,k} - LE_{Drift,Anf} \quad (3)$	$LE_{Drift,k}$: k -ter LE-Wert des „Driftsensitometers“ bei Verarbeitung der Filmstreifen für Bezugsnormal J m : Anzahl Einzel-Messungen für Driftsensitometer, $m=2$ $LE_{Drift,Anf}$: Anfangs-LE-Wert (Bezugswert) für Driftsensitometer
$LE_{Pool} = \frac{1}{N} \sum_{J=1}^N LE_{Bez,J} \quad (4)$	N : Anzahl der Bezugsnormale im Ringvergleich

Tabelle 1

Die Ergebnisgleichung für $\Delta LE_{Bez,J}$ ergibt sich durch Einsetzen der Gleichungen (2) und (3) in Gl.(1):

$$\Delta LE_{Bez,J} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LE_{Bez,J,i} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m LE_{Drift,k} + LE_{Drift,Anf} - LE_{Pool} \quad (5)$$

$$= \overline{LE_{Bez,J}} - LE_{Pool} - (\overline{LE_{Drift}} - LE_{Drift,Anf})$$

Die überstrichenen Größen in Gl.(5) deuten die Mittelwertbildung an. Als Modellgleichung für die mit dem Bezugsnormal und dem „Driftsensitometer“ gemessenen LE-Werte kann man allgemein schreiben:

$$LE = LE_{Mess} + \delta LE_{Filmtyp} + \delta LE_{Filmemuls} + \delta LE_{Filmblatt} + \delta LE_{Verarb} + \delta LE_{Densi} + \delta LE_{Auswert} \quad (6)$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	21/47

Hierbei ist LE_{Mess} der vom Auswertprogramm angezeigte LE-Messwert. Die Größen in Gl.(6), denen ein „ δ “ vorangestellt ist, sind mögliche Messabweichungen, die von unterschiedlichen Einflüssen herrühren können:

$\delta LE_{\text{Filmtyp}}$	Einfluss unterschiedlicher Filmtypen
$\delta LE_{\text{Filmemuls}}$	Einfluss unterschiedlicher Filmemulsionen
$\delta LE_{\text{Filmbblatt}}$	Empfindlichkeitsunterschiede von Filmbblatt zu Filmbblatt von Filmen gleicher Emulsion
$\delta LE_{\text{Verarb}}$	Einfluss der Filmverarbeitung (Zustand der Chemie, Temperatur des Entwicklerbades, etc.)
δLE_{Densi}	Einfluss des Densitometers (systematische Dichtemessabweichungen)
$\delta LE_{\text{Auswert}}$	Einfluss des Auswertalgorithmus
δLE_{Umgeb}	Einfluss Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte)

Tabelle 2

Für jeden „LE“-Wert, der in Gl.(5) eingeht (z.B. $LE_{\text{Bez},J,i}$ oder $LE_{\text{Drift},J,k}$), gilt die in Gl.(6) dargestellte Gleichung. Die gesuchte Modellgleichung für $\Delta LE_{\text{Bez},J}$ ergibt sich also durch Einsetzen von Gl.(6) in Gl.(5), wobei die Indizes für jede Einflussgröße und jedes Sensitometer mitgeführt werden müssen. Die dabei entstehende, umfangreiche Gleichung vereinfacht sich jedoch wesentlich, da viele der möglichen Messabweichungen jeweils in gleicher Quantität, aber mit unterschiedlichen Vorzeichen auftreten und sich daher gegenseitig aufheben (s.u.).

Von den in Tabelle 2 genannten möglichen Messabweichungen wirken manche aufgrund des spezifischen Vorgehens beim Ringvergleich für alle im Ringvergleich verwendeten Sensitometer in gleicher Weise oder haben die gleiche Wirkung für alle Filmstreifen, die gleichzeitig verarbeitet wurden:

Gleiche Wirkung	Größe	Begründung
für alle im Ringvergleich verwendeten Sensitometer:	$\delta LE_{\text{Filmtyp}}$ $\delta LE_{\text{Filmemuls}}$ δLE_{Densi} δLE_{Umgeb}	gleicher Filmtyp gleiche Filmemulsion gleiches Densitometer gleiche Umgebungsbedingungen
für alle gleichzeitig verarbeiteten Filmstreifen:	$\delta LE_{\text{Verarb}}$	zeitgleiche Filmverarbeitung

Tabelle 3

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	22/47

In Gl.(5) werden Differenzen zwischen LE-Werte berechnet, wobei die betreffenden LE-Werte allein von Messungen im Ringvergleich mit den im Ringvergleich verwendeten Sensitometern herrühren. Daher werden sich die in Tabelle 3 in der ersten Zeile aufgelisteten möglichen Messabweichungen im Ergebnis, d.h. in der Differenz, aufheben. Da diejenigen Filmstreifen, die mit dem Bezugsnormal J und dem Driftsensitometer aufbelichtet wurden, gleichzeitig verarbeitet wurden, fallen auch die möglichen Messabweichungen aufgrund von Verarbeitungsschwankungen ($\delta LE_{\text{Verarb}}$) heraus. Relevant für die Messunsicherheitsbetrachtung bleiben allein die Anteile, die durch Schwankungen der LE-Messwerte selbst (d.h. von Bezugsnormal und Driftsensitometer), durch die Empfindlichkeitsunterschiede der Filmblätter, durch einen nicht idealen Auswertalgorithmus und der Unsicherheit des Pool-Mittelwerts herrühren. Man erhält dann als Modellgleichung:

$$\Delta LE_{\text{Bez},J} = \overline{LE_{\text{Mess,Bez},J}} - LE_{\text{Mess,Pool}} - (\overline{LE_{\text{Mess,Drift}}} - LE_{\text{Mess,Drift,Anf}}) + \delta LE_{\text{Auswert,Bez},J} + \delta LE_{\text{Filmblatt,Bez},J} - \delta LE_{\text{Filmblatt,Drift}} \quad (7)$$

Der drittletzte Term in Gl.(7) beschreibt eine mögliche Abweichung aufgrund des Rechenalgorithmus bei der Berechnung von LE. Die beiden letzten Terme in der Gleichung beschreiben den Einfluss möglicher unterschiedlicher Filmempfindlichkeiten derjenigen Filmblätter, die bei der Messung mit dem Bezugsnormal J bzw. dem Driftsensitometer vorlagen.

Die in Gl.(7) vorhandene geringe Korrelation aufgrund der Tatsache, dass der LE-Wert des hier betrachteten Bezugsnormals auch den Pool-Mittelwert zu etwa 1/30 mitbestimmt, ist in ihrer Wirkung auf die Messunsicherheit vernachlässigbar, so dass die der Ergebnisgröße $\Delta LE_{\text{Bez},J}$ beigeordnete Messunsicherheit sich durch einfache quadratische Addition der Einzelbeiträge zur Messunsicherheit ergibt.

1.2 Einzelbeiträge zur Messunsicherheit

Empirische Standardabweichung Bezugsnormal

Die empirische Standardabweichung s für die Messung von LE für ein Bezugsnormal (beinhaltet Belichtungs-, Verarbeitungs-, Dichtemess- und Auswertungsschwankungen) beträgt (angegeben sind typische Werte):


$s = 0,004$ (Belichtung „grün“)

$s = 0,006$ (Belichtung „blau“)

Da beim Ringvergleich 4 gleichartige Messungen je Bezugsnormal durchgeführt werden, kann die Unsicherheit für den Mittelwert von $LE_{\text{Mess,Bez},J}$ wie folgt angegeben werden (hier wird auf 1/1000 aufgerundet, für die Berechnung der kombinierten Messunsicherheit wird genau gerechnet):

$$u(\overline{LE_{\text{Mess,Bez},J}}) = 0,004/\sqrt{4} = 0,0020 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(\overline{LE_{\text{Mess,Bez},J}}) = 0,006/\sqrt{4} = 0,0030 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	23/47

Empirische Standardabweichung „Driftsensitometer“

Der Zustand der Filmverarbeitung wird während des Ringvergleichs mit einem ausgewählten Sensitometer kontrolliert und bei einer etwaigen Drift werden die Messwerte entsprechend Gl.(5) bzw. (7) korrigiert. Diese Korrektur ist aber mit gewissen Unsicherheiten behaftet, da auch dieses Sensitometer eine gewisse Standardabweichung zeigt. Die empirische Standardabweichung s für die Messung von LE für das Sensitometer, welches zur Messung des Zustands der Filmverarbeitung eingesetzt wird, beträgt:

$$s = 0,004 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$s = 0,006 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Da beim Ringvergleich jeweils 2 Messungen mit dem Driftsensitometer durchgeführt werden, kann die Unsicherheit für den Mittelwert von $LE_{\text{Mess,Drift}}$ wie folgt angegeben werden:

$$u(\overline{LE_{\text{Mess,Drift}}}) = 0,004/\sqrt{2} = 0,0028 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(\overline{LE_{\text{Mess,Drift}}}) = 0,006/\sqrt{2} = 0,0042 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Der Bezugswert für die Driftmessungen ($LE_{\text{Mess,Drift,Anf}}$) ist ein fester Startwert; ihm ist daher keine Unsicherheit zuzuordnen ($u(LE_{\text{Mess,Drift}}) = 0$).

Einfluss des Auswertalgorithmus

Die Auswertung der Dichtekurven geschieht mit einem Algorithmus, bei dem zwischen benachbarten Datenpunkten linear interpoliert wird. Da jedoch die Dichtekurven nicht linear sind, können sich systematische Abweichungen ergeben. Wenn diese Abweichungen für alle Dichtekurven gleich wären, ergäben sich keine zu berücksichtigenden Anteile. Dies ist jedoch nicht der Fall, da die Mess-Stützstellen nicht für jedes Gerät an immer den gleichen Stellen liegen. Auswertungsunsicherheiten des Driftsensitometers sind immer nahezu gleich und können vernachlässigt werden. Untersuchungen des Algorithmus führten zu einem Einfluss von

$$u(\delta LE_{\text{Auswert,Bez,J}}) = 0,002$$

Filmempfindlichkeiten

Mögliche Schwankungen der Filmempfindlichkeit von Filmblatt zu Filmblatt einer Filmpackung betragen etwa 1 %. Das führt zu einem Unsicherheitsbeitrag für $\delta LE_{\text{Filmblatt}}$ von etwa $u = 0,004$. Da aber beim Ringvergleich die Filmstreifen, die für ein Bezugsnormale verwendet werden, aus verschiedenen Filmblättern ausgeschnitten wurden, ist der Unsicherheitsbeitrag kleiner. Bei vier Filmstreifen für das Bezugsnormale reduziert sich die Unsicherheit auf

$$u(\overline{\delta LE_{\text{Filmblatt,Bez,J}}}) = 0,004/\sqrt{4} = 0,0020$$

Bei zwei Filmstreifen für die Driftmessung erhält man

$$u(\overline{\delta LE_{\text{Filmblatt,Drift}}}) = 0,004/\sqrt{2} = 0,0028$$

Unsicherheit für $LE_{\text{Mess,Pool}}$

Da $LE_{\text{Mess,Pool}}$ der Mittelwert der LE -Werte aller am Ringvergleich teilnehmenden Bezugsnormale ist (25 bis 30 Geräte) und die Unsicherheiten der Bezugsnormale sich in etwa gleichen, beträgt die dem Pool-Mittelwert von LE beigeordnete Unsicherheit etwa $1/\sqrt{\text{Anzahl der Bezugsnormale}}$ der Unsicherheit für die Bezugsnormale, d.h. etwa 0,0004 (grün), bzw. 0,0006 (blau).

Messunsicherheitsbudget

Die Tabelle 4 zeigt das Messunsicherheitsbudget

Größe	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$\overline{LE}_{\text{Mess, Bez., } J}$	0,0020 (grün)	1	0,0020 (grün)
	0,0030 (blau)	1	0,0030 (blau)
$LE_{\text{Mess, Pool}}$	0,0004 (grün)	1	0,0004 (grün)
	0,0006 (blau)	1	0,0006 (blau)
$\overline{LE}_{\text{Mess, Drift}}$	0,0028 (grün)	1	0,0028 (grün)
	0,0042 (blau)	1	0,0042 (blau)
$\overline{\delta LE}_{\text{Filmbblatt, Bez., } J}$	0,0020	1	0,0020
$\overline{\delta LE}_{\text{Filmbblatt, Drift}}$	0,0028	1	0,0028
$\delta LE_{\text{Auswert, Bez., } J}$	0,0020	1	0,0020
$\Delta LE_{\text{Bez., } J}$	0,0053 (grün)		
	0,0065 (blau)		

Tabelle 4

Die erweiterten Messunsicherheiten für $\Delta LE_{\text{Bez., } J}$ mit $k = 2$ betragen:

$$U = 2 \cdot u(\Delta LE_{\text{Bez., } J}) = 0,011 \quad (\text{Belichtung „grün“})$$

$$U = 2 \cdot u(\Delta LE_{\text{Bez., } J}) = 0,013 \quad (\text{Belichtung „blau“})$$

2 Messunsicherheit für $\Delta LK_{\text{Bez., } J} / LK_{\text{Pool}}$

Entsprechend den Regeln nach DAkKS-DKD-3 wird die Modellfunktion für $\Delta LK_{\text{Bez., } J} / LK_{\text{Pool}}$ aufgestellt und die Einzelbeiträge zur Messunsicherheit abgeschätzt. Die erweiterten Messunsicherheiten werden mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ angegeben.

2.1 Modellgleichung

Bei der Kalibrierung im DKD-Ringvergleich wird die relative Ablage des LK-Werts des Bezugsnormals zum Pool-Mittelwert bestimmt.

Es werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

$LK_{\text{Bez., } J}$: LK-Wert des Bezugsnormals J , gemessen im Ringvergleich

LK_{Pool} : LK-Wert des Pool-Mittelwerts, gemessen im Ringvergleich

Berechnung von $\Delta LK_{\text{Bez., } J} / LK_{\text{Pool}}$ nach DIN V 6868-55:

$$\frac{\Delta LK_{\text{Bez., } J}}{LK_{\text{Pool}}} = \frac{LK_{\text{Bez., } J} - LK_{\text{Pool}}}{LK_{\text{Pool}}} \quad (8)$$

Die Gleichungen (1) bis (4) aus dem Abschnitt 1 in diesem Anhang können hier analog übertragen werden, man braucht nur „LE“ durch „LK“ zu ersetzen. Die entsprechenden Formeln sollen hier nicht angegeben werden. Als Ergebnisgleichung für $\Delta LK_{\text{Bez., } J}$ ergibt sich analog zu Gl.(5) im Abschnitt 1 dieses Anhangs:

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	25/47

$$\begin{aligned} \Delta LK_{\text{Bez},J} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LK_{\text{Bez},J,i} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m LK_{\text{Drift},k} + LK_{\text{Drift, Anf}} - LK_{\text{Pool}} \\ &= \overline{LK_{\text{Bez},J}} - LK_{\text{Pool}} - (\overline{LK_{\text{Drift}}} - LK_{\text{Drift, Anf}}) \end{aligned} \quad (9)$$

Als Modellgleichung für die mit dem Bezugsnorm und dem „Driftsensitometer“ gemessenen LK-Werte kann man allgemein schreiben:

$$LK = LK_{\text{Mess}} + \delta LK_{\text{Filmtyp}} + \delta LK_{\text{Filmemuls}} + \delta LK_{\text{Verarb}} + \delta LK_{\text{Densi}} + \delta LK_{\text{Auswert}} \quad (10)$$

Hierbei ist LK_{Mess} der vom Auswertprogramm angezeigte LK-Messwert. Die Größen in Gl.(10), denen ein „ δ “ vorangestellt ist, sind mögliche Messabweichungen, die von unterschiedlichen Einflüssen herrühren können (Ursachen sind analog zu Tabelle 2 im Abschnitt 1 dieses Anhangs).

Für jeden „LK“-Wert, der in Gl.(9) eingeht (z.B. $LK_{\text{Bez},J,i}$ oder $LK_{\text{Drift},k}$), gilt die in Gl.(10) dargestellte Gleichung. Die gesuchte Modellgleichung für $\Delta LK_{\text{Bez},J}$ ergibt sich also durch Einsetzen von Gl.(10) in (9), wobei die Indizes für jede Einflussgröße und jedes Sensitometer mitgeführt werden müssen. Die dabei entstehende umfangreiche Gleichung vereinfacht sich jedoch wesentlich, da viele der möglichen Messabweichungen jeweils in gleicher Quantität, aber mit unterschiedlichen Vorzeichen auftreten und sich daher gegenseitig aufheben (s. u.). Von den in Gl.(10) aufgeführten möglichen Messabweichungen wirken manche aufgrund des spezifischen Vorgehens beim Ringvergleich für alle im Ringvergleich verwendeten Sensitometer in gleicher Weise oder haben die gleiche Wirkung für alle Filmstreifen, die gleichzeitig verarbeitet wurden. Es gilt für LK das Gleiche, was auch für LE gilt; d.h. die Tabelle 3 in Abschnitt 1 dieses Anhangs gilt analog auch für LK. Es ergibt sich folgende Modellgleichung für $\Delta LK_{\text{Bez},J}$:

$$\Delta LK_{\text{Bez},J} = \overline{LK_{\text{Mess, Bez},J}} - LK_{\text{Mess, Pool}} + \delta LK_{\text{Auswert},J} - (\overline{LK_{\text{Mess, Drift}}} - LK_{\text{Mess, Drift, Anf}}) \quad (11)$$

Die in Gl.(7) vorhandene geringe Korrelation aufgrund der Tatsache, dass der LK-Wert des hier betrachteten Bezugsnormals auch den Pool-Mittelwert zu etwa 1/30 mitbestimmt, ist in ihrer Wirkung auf die Messunsicherheit vernachlässigbar, so dass die der Ergebnisgröße $\Delta LK_{\text{Bez},J}$ beigeordnete Messunsicherheit sich durch einfache quadratische Addition der Einzelbeiträge zur Messunsicherheit ergibt.

2.2 Einzelbeiträge zur Messunsicherheit

Empirische Standardabweichung Bezugsnorm

Die empirische Standardabweichung s für die Messung von LK für ein Bezugsnorm (beinhaltet Belichtungs-, Verarbeitungs-, Dichtemess- und Auswertungsschwankungen) beträgt (angegeben sind typische Werte):

$s = 0,026$ (Belichtung „grün“)

$s = 0,033$ (Belichtung „blau“)

Da beim Ringvergleich 4 gleichartige Messungen je Bezugsnorm durchgeführt werden, kann die Unsicherheit für den Mittelwert von $LK_{\text{Mess, Bez},J}$ wie folgt angegeben werden:

$$u(\overline{LK_{\text{Mess, Bez},J}}) = 0,026/\sqrt{4} = 0,0130 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(\overline{LK_{\text{Mess, Bez},J}}) = 0,033/\sqrt{4} = 0,0165 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	26/47

Einfluss des Auswertalgorithmus

Untersuchungen des Algorithmus führten zu einer Unsicherheit von

$$u(\delta LK_{\text{Auswert,Bez.,J}}) = 0,020$$

Empirische Standardabweichung „Driftsensitometer“

Der Zustand der Filmverarbeitung wird während des Ringvergleichs mit einem ausgewählten Sensitometer kontrolliert und bei einer etwaigen Drift werden die Messwerte entsprechend Gl.(9) bzw. (11) korrigiert. Diese Korrektur ist aber mit gewissen Unsicherheiten behaftet, da auch dieses Sensitometer eine gewisse Standardabweichung zeigt. Die empirische Standardabweichung s für die Messung von LK beträgt:

$$s = 0,026 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$s = 0,033 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Da beim Ringvergleich jeweils 2 Messungen mit dem Driftsensitometer durchgeführt werden, kann die Unsicherheit für den Mittelwert von $LK_{\text{Mess,Drift}}$ wie folgt angegeben werden:

$$u(\overline{LK}_{\text{Mess,Drift}}) = 0,026/\sqrt{2} = 0,0184 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(\overline{LK}_{\text{Mess,Drift}}) = 0,033/\sqrt{2} = 0,0233 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Der Bezugswert für die Driftmessungen ($LK_{\text{Mess,Drift,Anf}}$) ist ein fester Startwert; ihm ist daher keine Unsicherheit zuzuordnen.

Unsicherheit für $LK_{\text{Mess,Pool}}$

Da $LK_{\text{Mess,Pool}}$ der Mittelwert der LK-Werte aller am Ringvergleich teilnehmenden Bezugsnormale ist (25 bis 30 Geräte), und die Unsicherheiten der Bezugsnormale sich in etwa gleichen, beträgt die dem Pool-Mittelwert von LK beigeordnete Unsicherheit etwa $1/\sqrt{\text{(Anzahl der Bezugsnormale)}}$ der Unsicherheit für die Bezugsnormale, d.h. etwa 0,0025 (grün), bzw. 0,0031 (blau).

Messunsicherheitsbudget

Die Tabelle 5 zeigt das Messunsicherheitsbudget.

Größe	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$\overline{LK}_{\text{Mess, Bez.,J}}$	0,013 (grün)	1	0,0130 (grün)
	0,0165 (blau)	1	0,0165 (blau)
$\delta LK_{\text{Auswert,Bez.,J}}$	0,020	1	0,0200
$\overline{LK}_{\text{Mess, Drift}}$	0,0184 (grün)	1	0,0184 (grün)
	0,0233 (blau)	1	0,0233 (blau)
$LK_{\text{Mess, Pool}}$	0,0025 (grün)	1	0,0025 (grün)
	0,0031 (blau)	1	0,0031 (blau)
$\Delta LK_{\text{Bez.,J}}$	0,0302 (grün)		
	0,0350 (blau)		

Tabelle 5

Die erweiterten Messunsicherheiten für $\Delta LK_{\text{Bez.,J}}/LK_{\text{Pool}}$ (wobei für LK_{Pool} ein typischer Wert von 2,57 (grün) und 2,56 (blau) angesetzt ist) betragen daher:

$$U = 2 \cdot u(\Delta LK_{\text{Bez.,J}}) / 2,57 = 0,024 \text{ bzw. } 2,4 \% \text{ („grün“)}$$

$$U = 2 \cdot u(\Delta LK_{\text{Bez.,J}}) / 2,56 = 0,027 \text{ bzw. } 2,7 \% \text{ („blau“)}$$

Anhang 2: MU für die Messung der kritischen Wellenlängen nach ISO/CD16274

Gemessen werden die Wellenlängen nach ISO/CD16274, bei denen das Maximum und bestimmte Schwellenwerte der relativen spektralen Verteilung $S(\lambda)_{\text{rel}}$ der Sensitometer-Emissionsspektren vorliegen. Mit dem eingesetzten Messmittel und Messverfahren berechnen sich die in der unten aufgeführten Tabelle genannten Messunsicherheiten. Eine ausführliche Berechnung der Messunsicherheit wird an dem Beispiel des 50%-Schwellenwertes auf der Blau-Flanke des Grün-Spektrums dargestellt.

Spektrum	Schwellenwert	Wellenlänge in nm	$U (k = 2)$ in nm
Grün	25 %	488	2,1
	50 %	496	1,7
	75 %	501	1,7
	100 %	512	1,0
	75 %	529	2,2
Blau	50 %	543	2,3
	25 %	559	3,0
	25 %	421	1,9
	50 %	429	1,8
	75 %	438	1,9
	100 %	454	1,0
	70 %	479	2,6
	30 %	537	3,9

1 Modellgleichung

Die gesuchte Wellenlänge an dem Schwellenwert ($=\lambda_{\text{Sch}}$) ergibt sich aus den vom Spektrometer angezeigten Wellenlängenwerten λ_{Anz} und möglichen Messabweichungen $\delta\lambda_2$ bis $\delta\lambda_8$:

$$\lambda_{\text{Sch}} = \lambda_{\text{Anz}} + \delta\lambda_2 + \delta\lambda_3 + \delta\lambda_4 + \delta\lambda_5 + \delta\lambda_6 + \delta\lambda_7 + \delta\lambda_8 \quad (1)$$

λ_{Anz} : Angezeigter Messwert

$\delta\lambda_2$: Wellenlängenauflösung der angezeigten kritischen Schwellenwertwellenlängen

$\delta\lambda_3$: Wellenlängenkalisierung

$\delta\lambda_4$: Einfluss Kalibrierung der relativen spektralen Empfindlichkeit des Spektrometers

$\delta\lambda_5$: Einfluss Linearität des Spektrometers

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	28/47

$\delta\lambda_6$: Streulicht im Spektrometer

$\delta\lambda_7$: Wellenlängenverschiebung aufgrund schräger Lichteinkopplung ins Spektrometer

$\delta\lambda_8$: Einfluss digitales Glättungsfilter

Bei der Bestimmung der Wellenlängen für den 50%-Schwellenwert hängen die möglichen Messabweichungen $\delta\lambda_4$ bis $\delta\lambda_6$ von der Form des Spektrums ab; genauer gesagt, von der Ableitung g des Spektrums S nach der Wellenlänge λ bei den Wellenlängen λ_{Sch} . Diese Steigung g des auf 1 normierten Spektrums beträgt bei der „Blau“-Flanke ca. 0,04/nm.

$$\delta\lambda_4 = (\delta S_{\text{rel,Wi41G}}) / g + (\delta\tau_{\text{rel,BG34KG3}}) / g + (\delta S_{\text{rel,korrFak}}) / g \quad (2)$$

$$\delta\lambda_5 = (\delta S_{\text{rel,IS}}) / g \quad (3)$$

$$\delta\lambda_6 = (\delta S_{\text{rel,Streu}}) / g \quad (4)$$

Der erste Term in (2) beschreibt den Einfluss einer möglichen Abweichung des Emissionsspektrums der Kalibrierlampe (Wi41G) von ihrem Soll-Spektrum, der zweite Term den Einfluss einer möglichen Messabweichung der spektralen Transmission des bei der Kalibrierung verwendeten Blauglases (Kombination aus BG34- und KG3-Filtergläsern), der dritte Term eine Wellenlängenverschiebung aufgrund von Schwankungen bei der Bestimmung des wellenlängenabhängigen Kalibrierfaktors. In Gleichung (3) sind $\delta S_{\text{rel,IS}}$ die möglichen relativen Abweichungen des Spektrometersignals aufgrund von Nichtlinearitäten. In (4) ist $\delta S_{\text{rel,Streu}}$ ein möglicher relativer Streulichtanteil im Spektrum. Setzt man Gl. (2), (3) und (4) in Gl. (1) ein, so ergibt sich für die Modellgleichung:

$$\lambda_{\text{Sch}} = \lambda_{\text{Anz}} + \delta\lambda_2 + \delta\lambda_3 + (\delta S_{\text{rel,Wi41G}} + \delta\tau_{\text{rel,BG34KG3}} + \delta S_{\text{rel,korrFak}} + \delta S_{\text{rel,IS}} + \delta S_{\text{rel,Streu}}) / g + \delta\lambda_7 + \delta\lambda_8 \quad (5)$$

2 Standardunsicherheiten für die Eingangsgrößen

λ_{Anz} : angezeigter Wert der Wellenlänge

Dieser Wert wird von der Messeinrichtung mit der Präzision einer Gleitkommazahl angegeben. Daher ist die diesem Wert beizuordnende Messunsicherheit im Vergleich zu den anderen Messunsicherheitsbeiträgen vernachlässigbar (Standardunsicherheit ca. 0,001 nm).

$\delta\lambda_2$: Wellenlängenauflösung

Die ausgewerteten Wellenlängen werden mit einer Auflösung von 1 nm angezeigt (0,5 nm Halbwertsbreite).

$\delta\lambda_3$: Wellenlängenkalibrierung

Die Wellenlängenkalibrierung des Spektrometers erfolgt mit einer Hg-Spektrallampe. Die mit dem Spektrometer gemessenen Schwerpunktswellenlängen der Hg-Linien weichen um maximal $\pm 0,7$ nm von den Literaturwerten ab (Annahme: Rechteckverteilung).

$\delta S_{\text{rel,Wi41G}}$: Relative spektrale Verteilung der Wi41G-Lampe

Das Spektrum der Lampe ergibt sich aus der Verteilungstemperatur. Die Verteilungstemperatur hat laut Kalibrierschein einen Wert von (2856 ± 6) K. Diese Unsicherheit bezieht sich auf eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95%; d.h. die Standardunsicherheit beträgt 3 K. Nach dem Planck-Gesetz ergeben sich aus diesen Zahlen Unsicherheiten in der spektralen Emission von 1,5% bei 360 nm und 0,8% bei 680 nm; im Wellenlängenbereich dazwischen kann man näherungsweise linear interpolieren. Der angegebene Wellenlängenbereich

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	29/47

(380 nm bis 680 nm) überstreicht den gesamten Bereich, der bei der Messung der relativen spektralen Verteilung des Sensitometerlichts maßgebend ist. Da es bei der Kalibrierung des Spektrometers aber nur auf die Relativ-Lage des Spektrums (und nicht auf die absolut abgegebene Strahlungsleistung) in dem Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 680 nm ankommt, sind die möglichen Abweichungen in der relativen spektralen Strahlungsverteilung in dem hier angegebenen Wellenlängenbereich kleiner. Wenn man sich z.B. auf den Wert des Spektrums bei 380 nm bezieht, wird die relative Abweichung des Spektrums bei 680 nm nur 0,7% (= 1,5% - 0,8%) betragen. Bezieht man sich auf die Mitte zwischen 380 nm und 680 nm, d.h. 530 nm, so wird die Abweichung an den Rändern des Wellenlängenbereichs 0,4% betragen.

$\delta\tau_{\text{rel,BG34KG3}}$: Relative spektrale Transmission des BG34KG3-Blaufilters

Die spektrale Transmission des BG34KG3-Filters liegt im o. g. Wellenlängenbereich zwischen 5% und 50%. Die Standardunsicherheit für die relative spektrale Transmission beträgt 0,75% für $\tau = 5\%$ und 0,4% für $\tau = 50\%$. D.h., die Unsicherheit der relativen spektralen Transmission ist abhängig von der Transmission des Blau-Filters und damit auch wellenlängenabhängig. Um die Rechnung zu vereinfachen, wird hier mit dem größten Unsicherheitsbeitrag weitergerechnet, d.h. mit einer Unsicherheit von 0,0075 für die relative spektrale Transmission des Blaufilters.

$\delta\tau_{\text{rel,korrFak}}$: Linearität des IS-Spektrometers

Wellenlängenverschiebung aufgrund von Schwankungen bei der Bestimmung des wellenlängenabhängigen Kalibrierfaktors

$\delta\tau_{\text{rel,IS}}$: Linearität des IS-Spektrometers

Die Linearitätsabweichungen des CCD-Empfängers und des nachgeschalteten Verstärkers sind nach einer Messung des Herstellers kleiner als $\pm 1\%$ (Annahme: Rechteckverteilung).

$\delta\tau_{\text{rel,Streu}}$: Streulicht im IS-Spektrometer

Rest-Streulicht-Anteile bzw. Abweichungen im Dunkelstromsignal führen zu einem Untergrund-Signal, welches kleiner als 1% des Messsignals ist (Annahme: Rechteckverteilung).

$\delta\lambda_7$: Lichteinkopplung

Die Einkopplung des diffusen Lichts aus dem Sensitometer hat einen Einfluss auf die Apparatefunktion des Spektrometers (siehe Messungen an Hg-Linien vom 20.2.02, PTB 4.22): Bei schräger Lichteinkopplung kann sich das Maximum der Durchlasskurve leicht verschieben. Die erweiterte Messunsicherheit für diesen Effekt beträgt 0,5 nm.

$\delta\lambda_8$: Glättungsfilter

Das Rauschen und auch Spikes im gemessenen Spektrum werden durch Filteralgorithmen (Median- und Binomialfilter) geglättet. Die Lage des Maximums wird durch die Filterung nicht beeinflusst. Allerdings können sich die Flankenpositionen um einen Betrag verschieben, der zwischen 0 nm und etwa 1 nm liegt. Die Unsicherheit aufgrund dieses Effekts kann daher abgeschätzt werden zu $1/\sqrt{3}$ nm = 0,577 nm.

3 Messunsicherheitsbudget am Beispiel des 50%-Schwellenwertes („Blau“-Flanke des Grün-Spektrums) (Auszug aus dem Messunsicherheitsberechnungsprogramm GUM-Workbench):

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Freiheitsgrad	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
λ_{Anz}	496,0 nm	$577 \cdot 10^{-6}$ nm	∞	1,0	$580 \cdot 10^{-6}$ nm	0,0 %
$\delta\lambda_2$	0,0 nm	0,289 nm	∞	1,0	0,29 nm	11,8 %
$\delta\lambda_3$	0,0 nm	0,289 nm	∞	1,0	0,29 nm	11,8 %
$\delta S_{\text{rel,Wi41G}}$	0,0	$4,00 \cdot 10^{-3}$	50	25	0,099 nm	1,4 %
$\delta \tau_{\text{rel,BG34KG3}}$	0,0	$7,50 \cdot 10^{-3}$	50	25	0,18 nm	4,8 %
$\delta S_{\text{rel,korrFak}}$	0,0	0,0100	50	25	0,25 nm	8,6 %
$\delta S_{\text{rel,IS}}$	0,0	$5,77 \cdot 10^{-3}$	∞	25	0,14 nm	2,9 %
$\delta S_{\text{rel,Streu}}$	0,0	$5,77 \cdot 10^{-3}$	∞	25	0,14 nm	2,9 %
g	$0,0406 \text{ nm}^{-1}$	$0,0100 \text{ nm}^{-1}$	91	0,0	0,0 nm	0,0 %
$\delta\lambda_7$	0,0 nm	0,250 nm	50	1,0	0,25 nm	8,8 %
$\delta\lambda_8$	0,0 nm	0,577 nm	∞	1,0	0,58 nm	47,1 %
λ_{Sch}	496,00 nm	0,841 nm	2800			

Tabelle: Messunsicherheitsbudget

Ergebnis:

Größe: λ_{Sch}

Wert: 496,0 nm

Erweiterte Messunsicherheit (bei $k = 2$): 1,7 nm

Erweiterungsfaktor: 2,0

Überdeckung: t-Tabelle 95 %

Anhang 3: MU für die Messung der Gesamtbelichtungszeit t_{Puls}

Nachfolgend eine exemplarische Messunsicherheitsberechnung für die Messung der Gesamtbelichtungszeit t_{Puls} .

Beim DKD-Ringvergleich muss die Gesamtbelichtungszeit des vom Röntgenfilmsensitometer abgegebenen Lichts gemessen werden. Mit dem in Kap. 0 beschriebenen Messmittel berechnen sich die in der unten aufgeführten Tabelle genannten Messunsicherheiten.

Das für die Darstellung der Lichtpulse verwendete Oszilloskop wird standardmäßig im Messbereich 10 ms/Div, bzw. 20 ms/Div verwendet. Das erlaubt eine Zeitmessung des Oszilloskops über 100 ms, bzw. 200 ms mit jeweils 2000 diskreten Einzelwerten. Für die weiteren Betrachtungen wird der ungenauere, jedoch häufigere Fall, die Messung der Pulslänge in einem Messbereich von 20 ms/Div, betrachtet. Als Modellfunktion kann folgende Formel angenommen werden:

$$t_{\text{Puls}} = t_1 + \delta t_2 + \delta t_3 + \delta t_4 + \delta t_5 + \delta t_6 + \delta t_7$$

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
t_1	200 ms	0,010 ms	Normal	1,0	0,010 ms
δt_2	0 ms	0,029 ms	Rechteck	1,0	0,029 ms
δt_3	0 ms	0,029 ms	Rechteck	1,0	0,029 ms
δt_4	0 ms	0,115 ms	Rechteck	1,0	0,115 ms
δt_5	0 ms	0,115 ms	Rechteck	1,0	0,115 ms
δt_6	0 ms	0,003 ms	Rechteck	1,0	0,003 ms
δt_7	0 ms	0,003 ms	Rechteck	1,0	0,003 ms
t_{Puls}	200 ms	0,169 ms			

1. Angezeigter Messwert t_1 :

Die Genauigkeit der Zeitablenkung in vertikaler Richtung wird vom Hersteller des Oszilloskops bei einer Zeitablenkung von 20 ms/Div mit einer Toleranz von 0,01% angegeben. Da weitere erläuternde Angaben fehlen, wird für diese Unsicherheit eine Normalverteilung mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ angenommen. D.h. für 200 ms eine Unsicherheit von

$$u(t_1) = 200 \text{ ms} \cdot 0,0001 / 2 = 0,01 \text{ ms.}$$

2. Auflösung $\delta t_2, \delta t_3$:

Aus den o. g. Werten ergibt sich eine mögliche Auflösung von
 $200 \text{ ms} / 2000 = 0,1 \text{ ms.}$

Nach DAkkS-DKD-3 folgt für Pulsanfang und -ende:

$$u(\delta t_2) = u(\delta t_3) = ((0,1 \text{ ms})^2 / 12)^{1/2} = 0,029 \text{ ms}$$

3. Einstellgenauigkeit des Cursors (Rasterung) $\delta t_4, \delta t_5$:

Für o. g. Messbereich bietet das Digitaloszilloskop eine maximale Zeitauflösung von 0,4 ms.

Nach DAkkS-DKD-3 folgt für Pulsanfang und -ende:

$$u(\delta t_4) = u(\delta t_5) = ((0,4 \text{ ms})^2 / 12)^{1/2} = 0,115 \text{ ms}$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	32/47

4. Anstiegszeiten und Abfallzeiten $\delta\alpha_6, \delta\alpha_7$:

Die gemessenen Anstiegs-, bzw. Abfallzeiten eines Rechtecksignals einer LED-Blink-schaltung, betrieben von einem genauen Frequenzgenerator bei der I/U -Konverter-einstellung 2/2 sind kleiner als 0,02 ms. Für die Messunsicherheit folgt für Pulsanfang und -ende:

$$u(\delta\alpha_6) = u(\delta\alpha_7) = ((0,02 \text{ ms} / 2)^2 / 12)^{1/2} = 0,003 \text{ ms}$$

Für die Messunsicherheit der Zeitmessung errechnet sich demnach:

$$u(t_{\text{Puls}}) = 0,17 \text{ ms},$$

Bei Normalverteilung und einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ ergibt sich: $U = 0,34 \text{ ms}$, gerundet auf 1/10 ms ergibt sich:

$$U = 0,4 \text{ ms}$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	33/47

Anhang 4: MU für die Kenngrößen ΔLE_{Geb} und $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$ im akkreditierten Laboratorium

Nachfolgend eine exemplarische Messunsicherheitsberechnung für die Kalibrierung von Sensitometern nach DIN V 6868-55 im DKD-Laboratorium.

1 Zusammenfassung

Bei der Kalibrierung von Sensitometern („Gebrauchsnormalen“) nach DIN V 6868-55 werden zwei Messgrößen ermittelt: die Ablage des LE-Werts des Gebrauchsnormals zum Mittelwert der beiden Bezugsnormale (ΔLE_{Geb}) und die relative Ablage des LK-Werts des Gebrauchsnormals zum Mittelwert der beiden Bezugsnormale ($\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$). Diesen beiden Messgrößen ist jeweils eine Messunsicherheit beigeordnet, die in diesem Bericht abgeleitet und abgeschätzt ist.

Entsprechend den Regeln nach DAkkS-DKD-3 werden Modellfunktionen für ΔLE_{Geb} und $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$ aufgestellt. Die den verschiedenen Einflussgrößen beigeordneten Messunsicherheiten werden abgeleitet und quantitativ abgeschätzt. Die erweiterten Messunsicherheiten werden mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ angegeben. Die hier dargestellte Messunsicherheitsberechnung stellt insofern ein Beispiel dar, da die den Eingangsgrößen beigeordneten Unsicherheiten z. T. Schätzwerte bzw. typische Werte sind. Im konkreten Einzelfall müssen diese Schätzwerte durch die tatsächlich vorliegenden Zahlenwerte ersetzt werden. Diese Beispiel-Berechnung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

In den Tabellen 1 und 2 sind als Ergebnis die erweiterten Messunsicherheiten ($k = 2$, Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95%) für die Messgrößen ΔLE_{Geb} und $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$ angegeben. Ebenfalls aufgeführt sind die kleinsten Messunsicherheiten, die mit den zur Verfügung stehenden Normalen und aufgrund des Messverfahrens erreicht werden können, wobei ein ideales Gebrauchsnormal vorausgesetzt ist. **Diese Messunsicherheiten gelten unter den in Abschnitt 2.2 und 3.2 gemachten Voraussetzungen. Wenn diese Voraussetzungen nicht zutreffen, ist mit höheren Messunsicherheiten zu rechnen.**

	U für ΔLE_{Geb} , Belichtung „grün“	U für ΔLE_{Geb} , Belichtung „blau“
Messunsicherheit	0,019	0,021
Kleinste Messunsicherheit	0,018	0,019

Tabelle 1

	U für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$, Belichtung „grün“	U für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$, Belichtung „blau“
Messunsicherheit	0,031	0,033
Kleinste Messunsicherheit	0,029	0,031

Tabelle 2

Es ist zu beachten, dass diese Messunsicherheiten nicht die Beiträge beinhalten, die beim Gebrauch des kalibrierten Sensitometers im Rahmen der Abnahmeprüfung zusätzlich berücksichtigt werden müssen. Dazu gehören insbesondere:

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	34/47

1. Abweichungen des Emissionsspektrums vom Sollspektrum (dies spielt eine wichtige Rolle, wenn Filme mit anderer spektraler Empfindlichkeit belichtet werden)
2. Belichtungszeit und Pulsfolgefrequenz (Kurzzeit- und Intermittenzeffekt)
3. Drift des Gebrauchsnormals in der Zeitspanne zwischen Kalibrierung im DKD-Laboratorium und Gebrauch
4. Umgebungsbedingungen (bei Abnahmeprüfungen werden nicht notwendig die Standard-Klimabedingungen eingehalten)
5. Densitometrie und Auswertverfahren vor Ort

2 Lichtempfindlichkeit LE

2.1 Allgemeine Modellgleichung für ΔLE_{Geb}

Bei der Kalibrierung im akkreditierten Laboratorium wird die Ablage ΔLE_{Geb} des zu kalibrierenden Sensitometers (Gebrauchsnormal) zum Mittelwert der beiden Bezugsnormale festgestellt. Dazu werden Messungen von LE mit dem Gebrauchsnormal und den zwei Bezugsnormalen durchgeführt. Als Film wird der gleiche Filmtyp verwendet, der auch beim regelmäßig stattfindenden Ringvergleich verwendet wird.

Gl.(1) stellt die allgemeine Modellgleichung für die im akkreditierten Laboratorium mit einem Bezugsnormal gemessenen LE-Werte des Prüffilms dar, wobei zur Unterscheidung zwischen den Bezugsnormalen Nr.1 und Nr.2 der Index 1 bzw. 2 verwendet wird. Die Modellgleichung (1) wird hier nur für Bezugsnormal Nr.1 dargestellt, sie gilt analog ebenso für Bezugsnormal Nr.2:

$$\begin{aligned}
 LE_{\text{Bez1}} = & LE_{\text{Mess,Bez1}} - \Delta LE_{\text{Bez1}} + \delta LE_{\text{Drift,Bez1}} + \delta LE_{\text{Filmemuls,Bez1}} \\
 & + \delta LE_{\text{Filmsblatt,Bez1}} + \delta LE_{\text{Verarb,Bez1}} + \delta LE_{\text{Densi,Bez1}} + \delta LE_{\text{Pos,Bez1}} \\
 & + \delta LE_{\text{Keil,Bez1}} + \delta LE_{\text{Auswert,Bez1}} + \delta LE_{\text{Umgeb,Bez1}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Die Größen auf der rechten Seite in Gl.(1) haben folgende Bedeutung:

$LE_{\text{Mess, Bez1}}$	vom Auswerteprogramm angezeigter LE-Messwert: Mittelwert aus 5 Einzelmessungen
ΔLE_{Bez1}	Ablage des LE-Werts des Bezugsnormals vom Pool-Mittelwert, gemessen im regelmäßig stattfindenden Ringvergleich, siehe in den PTB-Abschlussberichten der Ringvergleiche
$\delta LE_{\text{Drift, Bez1}}$	mögliche Drift des Bezugsnormals seit der letzten Kalibrierung im Ringvergleich
$\delta LE_{\text{Filmemuls, Bez1}}$	Einfluss unterschiedlicher Filmemulsionen auf LE-Wert des Bezugsnormals
$\delta LE_{\text{Filmbblatt, Bez1}}$	Einfluss unterschiedlicher Empfindlichkeiten der Filmbblätter bei Filmen gleicher Emulsion auf LE-Wert des Bezugsnormals
$\delta LE_{\text{Verarb, Bez1}}$	Einfluss der Filmverarbeitung (Zustand der Chemie, Temperatur des Entwicklerbades, etc.) auf LE-Wert des Bezugsnormals
$\delta LE_{\text{Densi, Bez1}}$	Einfluss des Densitometers (systematische Dichtemessabweichungen) auf LE-Wert des Bezugsnormals
$\delta LE_{\text{Pos, Bez1}}$	Einfluss Inhomogenität/Positionierungsunsicherheit einer Keilstufe bei Dichtemessung auf LE-Wert des Bezugsnormals
$\delta LE_{\text{Keil, Bez1}}$	Wenn unterschiedliche LE-Werte beim Ringvergleich und im akkreditierten Laboratorium vorliegen, sind andere Keilstufen für Bestimmung des LE-Werts beteiligt. In dem Fall können Messabweichungen entstehen, wenn die Dichtestufung des Stufenkeils nicht ideal (d.h. Keilkonstante $\neq 0,15$) ist.
$\delta LE_{\text{Auswert, Bez1}}$	Einfluss des Auswertalgorithmus auf LE-Wert des Bezugsnormals
$\delta LE_{\text{Umgeb, Bez1}}$	Einfluss Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) auf LE-Wert des Bezugsnormals

Tabelle 3

Die sogenannten δ -Terme, d.h. die Terme in Gl.(1), denen ein „ δ “ vorangestellt ist, haben im Allgemeinen den Erwartungswert Null, können aber zur Messunsicherheit beitragen.


Bei der Kalibrierung des Gebrauchsnormals wird der Mittelwert der LE-Werte der beiden Bezugsnormale berechnet:

$$LE_{\text{Bez}} = 0,5 \cdot (LE_{\text{Bez1}} + LE_{\text{Bez2}}) \quad (2)$$

Eine zu Gl.(1) analoge Modellgleichung gilt für das Gebrauchsnormal:

$$LE_{\text{Geb}} = LE_{\text{Mess, Geb}} - \Delta LE_{\text{Geb}} + \delta LE_{\text{Filmemuls, Geb}} + \delta LE_{\text{Filmbblatt, Geb}} + \delta LE_{\text{Verarb, Geb}} + \delta LE_{\text{Densi, Geb}} + \delta LE_{\text{Auswert, Geb}} + \delta LE_{\text{Umgeb, Geb}} \quad (3)$$

In Gl.(3) ist ΔLE_{Geb} die gesuchte Ablage des LE-Werts des Gebrauchsnormals. Die Bedeutungen der übrigen Terme auf der rechten Seite in Gl.(3) sind analog zu den Bedeutungen der entsprechenden Terme in Gl.(1), nur ist Bezugsnormal durch Gebrauchsnormal zu ersetzen.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	36/47

Man beachte, dass in diesen Modellgleichungen keine Terme auftreten, die mit dem Emissionsspektrum, der Pulsfrequenz oder der Belichtungszeit der Sensitometer zusammenhängen. Dies liegt zum einen daran, dass bei der Kalibrierung im DKD-Laboratorium der gleiche Filmtyp mit den gleichen Eigenschaften verwendet wird wie bei der Messung im Ringvergleich, so dass mögliche Einflüsse der genannten Größen beim Einsatz im DKD-Laboratorium in gleicher Weise wirken wie bei den Messungen während des Ringvergleichs und sie daher bereits in der im Ringvergleich bestimmten Ablage vom Pool-Mittelwert, d.h. in ΔLE_{Bez} , berücksichtigt sind. Zum anderen werden bei der Kalibrierung des Gebrauchsnormals solche Einflüsse, die mit den genannten Größen wie Spektrum oder Belichtungszeit zusammenhängen, in der gesuchten Ablage ΔLE_{Geb} enthalten sein. Bei der späteren Anwendung des Gebrauchsnormals bei der Abnahmeprüfung können diese Einflüsse allerdings eine große Rolle spielen.

Die gesuchte Modellgleichung für ΔLE_{Geb} ergibt sich durch Gleichsetzen der beiden Gl.(2) und (3) und anschließendes Auflösen der entstehenden Gleichung nach ΔLE_{Geb} . In der folgenden Gleichung werden für LE_{Bez1} und LE_{Bez2} die Ausdrücke aus Gl.(1) verwendet:

$$\begin{aligned}
 \Delta LE_{Geb} = & LE_{Mess,Geb} - 0,5 \cdot (LE_{Mess,Bez1} + LE_{Mess,Bez2}) + 0,5 \cdot (\Delta LE_{Bez1} + \Delta LE_{Bez2}) \\
 & + \delta LE_{Filmemuls,Geb} - 0,5 \cdot (\delta LE_{Filmemuls,Bez1} + \delta LE_{Filmemuls,Bez2}) \\
 & + \delta LE_{Filmbblatt,Geb} - 0,5 \cdot (\delta LE_{Filmbblatt,Bez1} + \delta LE_{Filmbblatt,Bez2}) \\
 & + \delta LE_{Verarb,Geb} - 0,5 \cdot (\delta LE_{Verarb,Bez1} + \delta LE_{Verarb,Bez2}) \\
 & + \delta LE_{Densi,Geb} - 0,5 \cdot (\delta LE_{Densi,Bez1} + \delta LE_{Densi,Bez2}) \\
 & + \delta LE_{Auswert,Geb} - 0,5 \cdot (\delta LE_{Auswert,Bez1} + \delta LE_{Auswert,Bez2}) \\
 & + \delta LE_{Umgeb,Geb} - 0,5 \cdot (\delta LE_{Umgeb,Bez1} + \delta LE_{Umgeb,Bez2}) \\
 & - 0,5 \cdot (\delta LE_{Pos,Bez1} + \delta LE_{Pos,Bez2}) - 0,5 \cdot (\delta LE_{Keil,Bez1} + \delta LE_{Keil,Bez2}) \\
 & - 0,5 \cdot (\delta LE_{Drift,Bez1} + \delta LE_{Drift,Bez2})
 \end{aligned} \tag{4}$$

2.2 Spezielle Modellgleichung für ΔLE_{Geb}

Es wird im Folgenden vorausgesetzt, dass die zu kalibrierenden Gebrauchsnormale von dem gleichen Typ und der gleichen Bauart sind wie die Bezugsnormale, so dass z.B. gleiche Wiederholstandardabweichungen vorliegen und die Einflüsse der Umgebungsbedingungen für Gebrauchsnormal und Bezugsnormale in gleicher Weise wirken. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass bei der Kalibrierung die gleiche Filmemulsion, die gleiche Filmverarbeitung, das gleiche kalibrierte Densitometer und der gleiche Auswertealgorithmus für alle Messungen verwendet werden. Diese Voraussetzungen treffen bei vielen Kalibrierungen zu bzw. sind aufgrund des Kalibrierverfahrens zwingend vorgeschrieben. Dann vereinfacht sich die Modellgleichung erheblich, da viele der möglichen Messabweichungen mit gleichem Betrag, aber mit unterschiedlichen Vorzeichen auftreten und sich daher gegenseitig aufheben. Wenn diese Voraussetzungen nicht zutreffen, ist mit deutlich größeren Messunsicherheiten als hier angegeben zu rechnen.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	37/47

Tabelle 4 beinhaltet die möglichen Messabweichungen, die aufgrund der o. g. Voraussetzungen für alle verwendeten Sensitometer in gleicher Weise wirken, bzw. für alle gleichzeitig bzw. nahezu gleichzeitig verarbeiteten Filmstreifen in gleicher Weise wirken.

Gleiche Wirkung auf LE-Werte der Bezugsnormale und Gebrauchsnormale	
Größe	Begründung
$\delta LE_{\text{Filmemuls}}$	gleiche Filmemulsion bei Belichtung mit Bezugs- und Gebrauchsnormalen
δLE_{Densi}	gleiches Densitometer, Voraussetzung: Densitometer linear bei Nettodichten im Bereich von $1 \pm 0,1$, d.h. Kalibrierung mit kalibriertem Stufenkeil
δLE_{Umgeb}	gleiche Umgebungsbedingungen bei Belichtung, Verarbeitung und Auswertung für Bezugs- und Gebrauchsnormale
$\delta LE_{\text{Verarb}}$	praktisch zeitgleiche Filmverarbeitung in gleicher Maschine

Tabelle 4

Relevant für die Messunsicherheitsbetrachtung bleiben allein die Anteile, die durch Schwankungen der LE-Messwerte selbst, durch eine mögliche Drift der Bezugsnormale seit dem letzten Ringvergleich, durch – im Vergleich zum Ringvergleich – abweichende Messpositionen bei der Messung der Filmdichten in Verbindung mit Inhomogenitäten auf den Keilstufen, durch Keilstufenfehler in Verbindung mit Unterschieden in den LE-Werten zwischen den Messungen im Ringvergleich und im akkreditierten Laboratorium und durch mögliche Empfindlichkeitsunterschiede der Filmblätter untereinander herrühren. Man erhält dann als spezielle Modellgleichung anstelle von Gl.(4):

$$\begin{aligned}
\Delta LE_{\text{Geb}} = & LE_{\text{Mess, Geb}} - 0,5 \cdot (LE_{\text{Mess, Bez1}} + LE_{\text{Mess, Bez2}}) + 0,5 \cdot (\Delta LE_{\text{Bez1}} + \Delta LE_{\text{Bez2}}) \\
& + \delta LE_{\text{Filmblatt, Geb}} - 0,5 \cdot (\delta LE_{\text{Filmblatt, Bez1}} + \delta LE_{\text{Filmblatt, Bez2}}) \\
& + \delta LE_{\text{Auswert, Geb}} - 0,5 \cdot (\delta LE_{\text{Auswert, Bez1}} + \delta LE_{\text{Auswert, Bez2}}) \\
& - 0,5 \cdot (\delta LE_{\text{Pos, Bez1}} + \delta LE_{\text{Pos, Bez2}}) - 0,5 \cdot (\delta LE_{\text{Keil, Bez1}} + \delta LE_{\text{Keil, Bez2}}) \\
& - 0,5 \cdot (\delta LE_{\text{Drift, Bez1}} + \delta LE_{\text{Drift, Bez2}})
\end{aligned} \tag{5}$$

2.3 Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen

Die im Folgenden angegebenen Werte der den Eingangsgrößen beigeordneten Standardunsicherheiten beruhen z. T. auf den Ergebnissen aus den regelmäßig stattfindenden Ringvergleichen, auf Erfahrungen mit diesen Sensitometern und sind z. T. geschätzt. Sie sind hier entsprechend den Regeln nach DAkkS-DKD-3 auf 0,001 in LE gerundet. Bei der Berechnung der kombinierten bzw. erweiterten Messunsicherheit in Abschnitt 2.4 wird genau gerechnet und anschließend gerundet.

Empirische Standardabweichung des Gebrauchsnormals

Die Standardabweichung bei der Bestimmung von LE für das Gebrauchsnormale bei der Kalibrierung im akkreditierten Laboratorium - beinhaltet Belichtungs-, Verarbeitungs-, Messwertschwankungen - beträgt:

$$\begin{aligned}
s &= 0,006 \text{ (Belichtung „grün“)} \\
s &= 0,009 \text{ (Belichtung „blau“)}
\end{aligned}$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	38/47

Dieser Wert ist genauso groß wie der entsprechende Wert für Bezugsnormale (s. u.) aufgrund der Voraussetzung, dass Bezugsnormale und Gebrauchsnormale von gleicher Bauart sind. Da nach DIN V 6868-55 für Gebrauchsnormale größeren Toleranzen als für die Bezugsnormale hinsichtlich der Stabilität der Belichtung H gelten, können für andere Gebrauchsnormale größere Unsicherheiten gelten. Da bei der Kalibrierung im akkreditierten Laboratorium 5 gleichartige Messungen je Gebrauchsnormal durchgeführt werden, wird die Unsicherheit für den Mittelwert für $LE_{\text{Mess, Geb}}$ entsprechend kleiner sein:

$$u(LE_{\text{Mess, Geb}}) = 0,006 / \sqrt{5} = 0,0027 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(LE_{\text{Mess, Geb}}) = 0,009 / \sqrt{5} = 0,0040 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Empirische Standardabweichung der Bezugsnormale Nr.1 und Nr.2

Die empirische Standardabweichung s für die Messung von LE für ein Bezugsnormal (beinhaltet Belichtungs-, Verarbeitungs-, Dichtemessschwankungen) im akkreditierten Laboratorium beträgt (angegeben sind typische Werte):

$$s = 0,006 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$s = 0,009 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Diese Werte sind etwas größer als die entsprechenden Werte beim Ringvergleich, da angenommen wird, dass z.B. die Verarbeitung nicht so stabil ist wie bei der sehr gut kontrollierten und eingestellten Verarbeitungsmaschine, die beim Ringvergleich zur Verfügung steht. Da bei der Kalibrierung 5 gleichartige Messungen je Bezugsnormal durchgeführt werden, kann die Unsicherheit für den Mittelwert von $LE_{\text{Mess, Bez1}}$ bzw. $LE_{\text{Mess, Bez2}}$ wie folgt angegeben werden:

$$u(LE_{\text{Mess, Bez1}}) = u(LE_{\text{Mess, Bez2}}) = 0,006 / \sqrt{5} = 0,0027 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(LE_{\text{Mess, Bez1}}) = u(LE_{\text{Mess, Bez2}}) = 0,009 / \sqrt{5} = 0,0040 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Ablage der LE-Werte der Bezugsnormale vom Pool-Mittelwert

Nach Anhang 1.2 ergeben sich folgende Standardunsicherheiten für die Ablagen der LE-Werte der Bezugsnormale vom Pool-Mittelwert: $u(\Delta LE_{\text{Bez}}) = 0,0053$ (Belichtung „grün“) und $u(\Delta LE_{\text{Bez}}) = 0,0065$ (Belichtung „blau“). Es wird angenommen, dass diese Unsicherheiten für beide Bezugsnormale gelten:

$$u(\Delta LE_{\text{Bez1}}) = u(\Delta LE_{\text{Bez2}}) = 0,0053 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(\Delta LE_{\text{Bez1}}) = u(\Delta LE_{\text{Bez2}}) = 0,0065 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Filmempfindlichkeiten

Mögliche Schwankungen der Filmempfindlichkeit von Filmblatt zu Filmblatt einer Filmpackung betragen etwa 1%. Das führt zu einem Unsicherheitsbeitrag für $\delta LE_{\text{Filmblatt}}$ von etwa $u = 0,004$:

$$u(\delta LE_{\text{Filmblatt, Bez1}}) = u(\delta LE_{\text{Filmblatt, Bez1}}) = u(\delta LE_{\text{Filmblatt, Geb}}) = 0,004 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

Einfluss des Auswertalgorithmus

Die Auswertung der Dichtekurven geschieht mit einem Algorithmus, bei dem zwischen benachbarten Datenpunkten linear interpoliert wird. Da jedoch die Dichtekurven nicht linear sind, können sich systematische Abweichungen ergeben. Wenn diese Abweichungen für alle Dichtekurven gleich wären, ergäben sich keine zu berücksichtigenden Anteile. Dies ist jedoch nicht der Fall, da die Mess-Stützstellen nicht für jedes Gerät an immer den gleichen Stellen liegen (für

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	39/47

jedes Gerät selbst allerdings schon). Untersuchungen des Algorithmus führten zu einem Einfluss von:

$$u(\delta LE_{\text{Auswert, Bez1}}) = u(\delta LE_{\text{Auswert, Bez2}}) = u(\delta LE_{\text{Auswert, Geb}}) = 0,002 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

Ablagen der Messpositionen bei der Messung der Dichtestufen für Bezugsnormale

Die relative Position der Messapertur des Densitometers auf einer jeden Keilstufe kann einen Einfluss auf den gemessenen Dichtewert haben, wenn die Dichte z.B. aufgrund von räumlichen Inhomogenitäten der Belichtung innerhalb einer Keilstufe variiert. Da bei der Dichtemessung im akkreditierten Laboratorium und bei der Messung während des Ringvergleichs systematisch andere Messpositionen vorliegen können, ergeben sich entsprechende Unterschiede in den Messwerten für die Dichte. Nach DIN V 6868-55 ist eine Inhomogenität der Keilstufen von $\Delta \lg(H) < 0,015$ zulässig. Darüber hinaus gibt es Inhomogenitäten in den entwickelten Dichtestufen aufgrund von Streulicht benachbarter Stufen. Die Keilstufen sind 5 mm breit. Die aus einer geschätzten Positionierungsunsicherheit von $\pm 0,5$ mm resultierende Unsicherheit kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$u(\delta LE_{\text{Pos, Bez1}}) = u(\delta LE_{\text{Pos, Bez2}}) = 0,003 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

Keilstufenfehler in Verbindung mit unterschiedlichen LE-Werten

Wenn unterschiedliche LE-Werte beim Ringvergleich und im akkreditierten Laboratorium vorliegen, ändert sich die Gewichtung der Keilstufen, die das Ergebnis für LE bestimmen. Es können in einem solchen Fall Messabweichungen in LE entstehen, wenn die Dichtestufung des Stufenkeils nicht ideal (Keilkonstante $\neq 0,15$) ist. Da in den Bezugsnormalen ein sogenannter 1%-Stufenkeil eingebaut ist und die maßgebenden Keilstufennummern bei etwa 10 liegen (d.h. die Dichte der Keilstufe etwa 1,5 ist), beträgt die maximale Abweichung vom Soll-Dichte-Unterschied von 0,15 zwischen zwei benachbarten Stufen des Stufenkeils $\pm 0,015$. Nach DIN V 6868-55 ist eine maximale Ablage von 0,09 in LE möglich, was einer Verschiebung in $\lg H$ um 0,09 entspricht. Diese Verschiebung in $\lg H$ entspricht einem Bruchteil von $0,09/0,15$ einer Keilstufe. Entsprechend dieser Verschiebung erhöht sich der Einfluss benachbarter Keilstufen auf das LE-Ergebnis. Wenn der Stufenkeil ideal ist, d.h. wenn die Dichteunterschiede zwischen benachbarten Keilstufen exakt 0,15 sind, ergibt sich aus dieser Verschiebung keine Messabweichung für LE. Sind allerdings die oben genannten maximalen Abweichungen im Dichteunterschied zwischen zwei benachbarten Keilstufen (d.h. $\pm 0,015$) vorhanden, ergibt sich eine maximale Ablage von $\pm 0,015 \cdot 0,09 / 0,15 = \pm 0,009$ des gemessenen $\lg H$ -Werts vom richtigen Wert. Daraus ergibt sich ein maximale Messabweichung von $\pm 0,009$ in LE. Nimmt man eine Rechteck-Verteilung für diese Messabweichung an, so ergibt sich eine Standardunsicherheit von $0,009 / \sqrt{3} = 0,0052$:

$$u(\delta LE_{\text{Keil, Bez1}}) = u(\delta LE_{\text{Keil, Bez2}}) = 0,0052 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

Mögliche Drift des Bezugsnormals im Zeitraum seit dem letzten Ringvergleich

Eine mögliche Drift der Bezugsnormale kann nur geschätzt werden. Grundlage der Schätzung ist die Forderung in DIN V 6868-55, dass die maximal zulässige Drift der Belichtung $\lg H$ kleiner als 0,01 betragen muss. Nimmt man eine rechteckförmige Verteilung der möglichen Driften an, so ergibt sich eine Standardunsicherheit von $0,01 / \sqrt{3} = 0,0058$:

$$u(\delta LE_{\text{Drift, Bez1}}) = 0,0058 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

$$u(\delta LE_{\text{Drift, Bez2}}) = 0,0058 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

2.4 Messunsicherheitsbudget

Die folgende Tabelle zeigt das Messunsicherheitsbudget für ΔLE_{Geb} .

Größe	Standardunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$LE_{\text{Mess, Geb}}$	0,0027 (grün)	1	0,0027 (grün)
	0,0040 (blau)	1	0,0040 (blau)
$LE_{\text{Mess, Bez1}}$	0,0027 (grün)	-0,5	-0,0013 (grün)
	0,0040 (blau)	-0,5	-0,0020 (blau)
$LE_{\text{Mess, Bez2}}$	0,0027 (grün)	-0,5	-0,0013 (grün)
	0,0040 (blau)	-0,5	-0,0020 (blau)
ΔLE_{Bez1}	0,0053 (grün)	0,5	0,0026 (grün)
	0,0065 (blau)	0,5	0,0032 (blau)
ΔLE_{Bez2}	0,0053 (grün)	0,5	0,0026 (grün)
	0,0065 (blau)	0,5	0,0032 (blau)
$\delta LE_{\text{Filmlatt, Geb}}$	0,0040 (grün und blau)	1	0,0040 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Filmlatt, Bez1}}$	0,0040 (grün und blau)	-0,5	-0,0020 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Filmlatt, Bez2}}$	0,0040 (grün und blau)	-0,5	-0,0020 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Auswert, Geb}}$	0,0020 (grün und blau)	1	0,0020 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Auswert, Bez1}}$	0,0020 (grün und blau)	-0,5	-0,0010 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Auswert, Bez2}}$	0,0020 (grün und blau)	-0,5	-0,0010 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Pos, Bez1}}$	0,0030 (grün und blau)	-0,5	-0,0015 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Pos, Bez2}}$	0,0030 (grün und blau)	-0,5	-0,0015 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Keil, Bez1}}$	0,0052 (grün und blau)	-0,5	-0,0026 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Keil, Bez2}}$	0,0052 (grün und blau)	-0,5	-0,0026 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Drift, Bez1}}$	0,0058 (grün und blau)	-0,5	-0,0029 (grün und blau)
$\delta LE_{\text{Drift, Bez2}}$	0,0058 (grün und blau)	-0,5	-0,0029 (grün und blau)
ΔLE_{Geb}	0,0095 (grün)		
	0,0105 (blau)		

Tabelle 5

Die erweiterten Messunsicherheiten mit $k = 2$ betragen

- für ΔLE_{Geb} : $U = 2 \cdot u(\Delta LE_{\text{Geb}}) = 0,019$ (Belichtung „grün“)
- für ΔLE_{Geb} : $U = 2 \cdot u(\Delta LE_{\text{Geb}}) = 0,021$ (Belichtung „blau“)

Als kleinste angebbare Messunsicherheit für ideale Gebrauchsnormale ergibt sich mit $k = 2$:

- für ΔLE_{Geb} : $U_{\text{kleinst}} = 0,018$ (Belichtung „grün“)
- für ΔLE_{Geb} : $U_{\text{kleinst}} = 0,019$ (Belichtung „blau“)

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	41/47

3 Lichtkontrast LK

3.1 Allgemeine Modellgleichung für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$

Bei der Kalibrierung im DKD-Ringvergleich wird die relative Ablage des LK-Werts des Gebrauchsnormals zum Mittelwert der beiden Bezugsnormale bestimmt.

Gl.(7) stellt die allgemeine Modellgleichung für die im akkreditierten Laboratorium mit einem Bezugsnormal gemessenen LK-Werte des Prüffilms dar, wobei zur Unterscheidung zwischen den Bezugsnormalen Nr.1 und Nr.2 der Index 1 bzw. 2 verwendet wird. Die Modellgleichung (7) wird hier nur für Bezugsnormal Nr.1 dargestellt, sie gilt analog ebenso für Bezugsnormal Nr.2:

$$\begin{aligned}
 LK_{\text{Bez1}} = & LK_{\text{Mess,Bez1}} / (1 + \Delta LK_{\text{Bez1}}/LK_{\text{Pool}}) + \delta LK_{\text{Filmemuls,Bez1}} \\
 & + \delta LK_{\text{Verarb,Bez1}} + \delta LK_{\text{Densi,Bez1}} + \delta LK_{\text{Pos,Bez1}} \\
 & + \delta LK_{\text{Keil,Bez1}} + \delta LK_{\text{Auswert,Bez1}} + \delta LK_{\text{Umgeb,Bez1}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Die Größen auf der rechten Seite in Gl.(7) haben folgende Bedeutung:

$LK_{\text{Mess,Bez1}}$	vom Auswerteprogramm angezeigter LK-Messwert: Mittelwert aus 5 Einzelmessungen
$\Delta LK_{\text{Bez1}}/LK_{\text{Pool}}$	Relative Ablage des LK-Werts des Bezugsnormals vom Pool-Mittelwert LK_{Pool} , gemessen im regelmäßig stattfindenden Ringvergleich, siehe in den PTB-Abschlussberichten der Ringvergleiche
$\delta LK_{\text{Filmemuls,Bez1}}$	Einfluss unterschiedlicher Filmemulsionen auf LK-Wert des Bezugsnormals
$\delta LK_{\text{Verarb,Bez1}}$	Einfluss der Filmverarbeitung (Zustand der Chemie, Temperatur des Entwicklerbades, etc.) auf LK-Wert des Bezugsnormals
$\delta LK_{\text{Densi,Bez1}}$	Einfluss des Densitometers (systematische Dichtemessabweichungen) auf LK-Wert des Bezugsnormals
$\delta LK_{\text{Pos,Bez1}}$	Einfluss Inhomogenität/Positionierungsunsicherheit einer Keilstufe bei Dichtemessung auf LK-Wert des Bezugsnormals
$\delta LK_{\text{Keil,Bez1}}$	Wenn unterschiedliche LK-Werte beim Ringvergleich und im akkreditierten Laboratorium vorliegen, können andere Keilstufen für Bestimmung des LK-Werts beteiligt sein. In dem Fall können Messabweichungen entstehen, wenn die Dichtestufung des Stufenkeils nicht ideal (d.h. Keilkonstante $\neq 0,15$) ist.
$\delta LK_{\text{Auswert,Bez1}}$	Einfluss des Auswertealgorithmus auf LK-Wert des Bezugsnormals
$\delta LK_{\text{Umgeb,Bez1}}$	Einfluss Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) auf LK-Wert des Bezugsnormals

Tabelle 6

Die sogenannten δ -Terme, d.h. die Terme in Gl.(7), denen ein „ δ “ vorangestellt ist, haben im Allgemeinen den Erwartungswert Null, tragen aber zur Messunsicherheit bei.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	42/47

Bei der Kalibrierung des Gebrauchsnormals werden zwei Bezugsnormale verwendet und der Mittelwert der LK-Werte der beiden Bezugsnormale berechnet:

$$LK_{Bez} = 0,5 \cdot (LK_{Bez1} + LK_{Bez2}) \quad (8)$$

Eine zu Gl.(7) analoge Modellgleichung gilt für das Gebrauchsnormal:

$$LK_{Geb} = LK_{Mess,Geb} / (1 + \Delta LK_{Geb} / LK_{Bez}) + \delta LK_{Filmemuls,Geb} + \delta LK_{Verarb,Geb} + \delta LK_{Densi,Geb} + \delta LK_{Auswert,Geb} + \delta LK_{Umgeb,Geb} \quad (9)$$

In Gl.(9) ist $\Delta LK_{Geb} / LK_{Bez}$ die gesuchte relative Ablage des LK-Werts des Gebrauchsnormals zum Mittelwert der beiden Bezugsnormale. Die Bedeutungen der übrigen Terme auf der rechten Seite in Gl.(9) sind analog zu den Bedeutungen der entsprechenden Terme in Gl.(7), nur ist Bezugsnormal durch Gebrauchsnormal zu ersetzen.

Man beachte, dass in diesen Modellgleichungen keine Terme auftreten, die mit dem Emissionsspektrum, der Pulsfrequenz oder der Belichtungszeit der Sensitometer zusammenhängen. Dies liegt zum einen daran, dass bei der Kalibrierung im akkreditierten Laboratorium der gleiche Filmtyp mit den gleichen Eigenschaften verwendet wird wie bei der Messung im Ringvergleich, so dass mögliche Einflüsse der genannten Größen beim Einsatz im akkreditierten Laboratorium in gleicher Weise wirken wie bei den Messungen während des Ringvergleichs und sie daher bereits in der im Ringvergleich bestimmten Ablage vom Pool-Mittelwert, d.h. in ΔLK_{Bez} , berücksichtigt sind. Zum anderen werden bei der Kalibrierung im akkreditierten Laboratorium mit dem Gebrauchsnormal solche Einflüsse, die mit den genannten Größen wie Spektrum oder Belichtungszeit zusammenhängen, in der gesuchten Ablage ΔLK_{Geb} enthalten sein. Bei der späteren Anwendung des Gebrauchsnormals bei der Abnahmeprüfung können diese Einflüsse allerdings eine große Rolle spielen. Im Vergleich zu den entsprechenden Modellgleichungen für LE fällt auf, dass hier keine Terme auftreten, die mit einer möglichen Drift oder einem Einfluss unterschiedlicher Gradienten der Filmblätter zusammenhängen. Dies liegt daran, dass keine zuverlässige Informationen darüber vorliegen, ob und in welchem Ausmaß derartige Einflüsse vorhanden sind.

Die gesuchte Modellgleichung für die relative Ablage des LK-Werts des Gebrauchsnormals zum Mittelwert der beiden Bezugsnormale ergibt sich durch Gleichsetzen der beiden Gl.(8) und (9) und anschließendes Auflösen der entstehenden Gleichung nach der gesuchten relativen Ablage $\Delta LK_{Geb} / LK_{Bez}$. Die folgende Gleichung zeigt das Ergebnis, wobei für LK_{Bez1} und LK_{Bez2} die Ausdrücke aus Gl.(7) verwendet wurden:

$$\frac{\Delta LK_{Geb}}{LK_{Bez}} = \frac{LK_{Mess,Geb}}{0,5 \cdot \left(\frac{LK_{Mess,Bez1}}{(1 + \Delta LK_{Bez1} / LK_{Pool})} + \frac{LK_{Mess,Bez2}}{(1 + \Delta LK_{Bez2} / LK_{Pool})} \right) + \delta - \text{Terme}} - 1 \quad (10)$$

Für die in Gl.(10) aufgeführten δ -Terme gilt:

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	43/47

$$\begin{aligned}
 \delta - \text{Terme} = & 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Filmemuls, Bez1}} + \delta LK_{\text{Filmemuls, Bez2}}) - \delta LK_{\text{Filmemuls, Geb}} \\
 & + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Verarb, Bez1}} + \delta LK_{\text{Verarb, Bez2}}) - \delta LK_{\text{Verarb, Geb}} \\
 & + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Densi, Bez1}} + \delta LK_{\text{Densi, Bez2}}) - \delta LK_{\text{Densi, Geb}} \\
 & + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Auswert, Bez1}} + \delta LK_{\text{Auswert, Bez2}}) - \delta LK_{\text{Auswert, Geb}} \\
 & + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Umgeb, Bez1}} + \delta LK_{\text{Umgeb, Bez2}}) - \delta LK_{\text{Umgeb, Geb}} \\
 & + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Pos, Bez1}} + \delta LK_{\text{Pos, Bez2}}) \\
 & + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Keil, Bez1}} + \delta LK_{\text{Keil, Bez2}})
 \end{aligned} \tag{11}$$

3.2 Spezielle Modellgleichung für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$

Unter den gleichen Voraussetzungen, wie sie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben wurden, vereinfacht sich die Modellgleichung erheblich, da viele der möglichen Messabweichungen für das Gebrauchsnormale und für die beiden Bezugsnormale in gleicher Quantität, aber mit unterschiedlichen Vorzeichen auftreten und sich daher in der Summe wegheben. Tabelle 7 beinhaltet die möglichen Messabweichungen, die aufgrund der o. g. Voraussetzungen für alle verwendeten Sensitometer in gleicher Weise wirken, bzw. für alle gleichzeitig bzw. nahezu gleichzeitig verarbeiteten Filmstreifen in gleicher Weise wirken.

Gleiche Wirkung auf LK-Werte der Bezugsnormale und Gebrauchsnormal	
Größe	Begründung
$\delta LK_{\text{Filmemuls}}$	gleiche Filmemulsion bei Belichtung mit Bezugs- und Gebrauchsnormalen
δLK_{Densi}	gleiches Densitometer Voraussetzung: Densitometer linear bei Nettodichten im Bereich um $0,25 \pm 0,1$ und $2 \pm 0,1$, d.h. Kalibrierung mit kalibriertem Stufenkeil
δLK_{Umgeb}	gleiche Umgebungsbedingungen bei Belichtung, Verarbeitung und Auswertung für Bezugs- und Gebrauchsnormale
$\delta LK_{\text{Verarb}}$	praktisch zeitgleiche Filmverarbeitung in gleicher Maschine

Tabelle 7

Relevant für die Messunsicherheitsbetrachtung bleiben allein die Anteile, die durch Schwankungen der LK-Messwerte selbst, durch – im Vergleich zum Ringvergleich – abweichende Messpositionen bei der Messung der Filmdichten in Verbindung mit Inhomogenitäten auf den Keilstufen, durch Keilstufenfehler in Verbindung mit Unterschieden in den LK-Werten zwischen den Messungen im Ringvergleich und im akkreditierten Laboratorium herrühren. Dann vereinfacht sich Gl.(11) zu:

$$\begin{aligned}
 \delta - \text{Terme} = & 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Auswert, Bez1}} + \delta LK_{\text{Auswert, Bez2}}) - \delta LK_{\text{Auswert, Geb}} \\
 & + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Pos, Bez1}} + \delta LK_{\text{Pos, Bez2}}) + 0,5 \cdot (\delta LK_{\text{Keil, Bez1}} + \delta LK_{\text{Keil, Bez2}})
 \end{aligned} \tag{12}$$

Gl.(12) stellt zusammen mit Gl.(10) die gesuchte Modellgleichung dar.

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	44/47

3.3 Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen

Die im Folgenden angegebenen Werte der den Eingangsgrößen beigeordneten Standardunsicherheiten beruhen z. T. auf den Ergebnissen aus den regelmäßig stattfindenden Ringvergleichen, auf Erfahrungen mit diesen Sensitometern und sind z. T. geschätzt. Sie sind hier entsprechend den Regeln nach DAkkS-DKD-3 auf 0,001 in LK gerundet.

Empirische Standardabweichung des Gebrauchsnormals

Die Standardabweichung bei der Bestimmung von LK für das Gebrauchsnormal bei der Kalibrierung im DKD-Laboratorium - beinhaltet Belichtungs-, Verarbeitungs-, Messwertschwankungen - beträgt:

$$s = 0,030 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$s = 0,035 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Dieser Wert ist genauso groß wie der entsprechende Wert für Bezugsnormale (s. u.) aufgrund der Voraussetzung, dass Bezugsnormale und Gebrauchsnormale von gleicher Bauart sind. Da bei der Kalibrierung 5 gleichartige Messungen je Gebrauchsnormal durchgeführt werden, wird die Unsicherheit für den Mittelwert für $LE_{\text{Mess, Geb}}$ entsprechend kleiner sein:

$$u(LK_{\text{Mess, Geb}}) = 0,030 / \sqrt{5} = 0,014 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(LK_{\text{Mess, Geb}}) = 0,035 / \sqrt{5} = 0,016 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Empirische Standardabweichung der Bezugsnormale Nr.1 und Nr.2

Die Standardabweichung bei der Bestimmung von LK für das Bezugsnormal bei der Kalibrierung im akkreditierten Laboratorium – beinhaltet Belichtungs-, Verarbeitungs-, Messwertschwankungen – beträgt:

$$s = 0,030 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$s = 0,035 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Diese Werte sind etwas größer als die entsprechenden Werte beim Ringvergleich, da angenommen wird, dass z.B. die Verarbeitung nicht so stabil ist wie bei der sehr gut kontrollierten und eingestellten Verarbeitungsmaschine, die beim Ringvergleich zur Verfügung steht. Da bei der Kalibrierung 5 gleichartige Messungen je Gebrauchsnormal durchgeführt werden, wird die Unsicherheit für den Mittelwert für $LE_{\text{Mess, Geb}}$ entsprechend kleiner sein:

$$u(LK_{\text{Mess, Bez1}}) = u(LK_{\text{Mess, Bez2}}) = 0,030 / \sqrt{5} = 0,014 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(LK_{\text{Mess, Bez1}}) = u(LK_{\text{Mess, Bez2}}) = 0,035 / \sqrt{5} = 0,016 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Relative Ablage der LK-Werte der Bezugsnormale vom Pool-Mittelwert

Nach Anhang 2.2 ergeben sich folgende Standardunsicherheiten für die relativen Ablagen der LK-Werte der Bezugsnormale vom Pool-Mittelwert: 0,012 (Belichtung „grün“) und 0,014 (Belichtung „blau“). Es wird angenommen, dass diese Unsicherheiten für beide Bezugsnormale gelten:

$$u(\Delta LK_{\text{Bez1}}/LK_{\text{Pool}}) = u(\Delta LK_{\text{Bez2}}/LK_{\text{Pool}}) = 0,012 \text{ (Belichtung „grün“)}$$

$$u(\Delta LK_{\text{Bez1}}/LK_{\text{Pool}}) = u(\Delta LK_{\text{Bez2}}/LK_{\text{Pool}}) = 0,014 \text{ (Belichtung „blau“)}$$

Einfluss des Auswertalgorithmus

Untersuchungen des Algorithmus führten zu einer Unsicherheit von:

$$u(\delta LK_{\text{Auswert, Bez1}}) = u(\delta LK_{\text{Auswert, Bez2}}) = u(\delta LK_{\text{Auswert, Geb}}) = 0,020$$

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	45/47

Ablagen der Messpositionen bei der Messung der Dichtestufen für Bezugsnormale

Die relative Position der Messapertur des Densitometers auf einer jeden Keilstufe kann einen Einfluss auf den gemessenen Dichtewert haben, wenn die Dichte z.B. aufgrund von räumlichen Inhomogenitäten der Belichtung innerhalb einer Keilstufe variiert. Da bei der Dichtemessung im akkreditierten Laboratorium und bei der Messung während des Ringvergleichs systematisch andere Messpositionen vorliegen können, ergeben sich entsprechende Unterschiede in den Messwerten für die Dichte. Nach DIN V 6868-55 ist eine Inhomogenität der Keilstufen von $\Delta \lg(H) < 0,015$ zulässig. Darüber hinaus gibt es Inhomogenitäten in den entwickelten Dichtestufen aufgrund von Streulicht benachbarter Stufen. Die Keilstufen sind 5 mm breit. Die daraus resultierende Unsicherheit für LK kann wie folgt abgeschätzt werden. Nach Abschnitt 2.3 beträgt die durch die Positioniergenauigkeit hervorgerufene Unsicherheit für $\lg H$ etwa 0,003. Für die Bestimmung von LK gehen zwei verschiedene Keilstufen ein, d.h. es ist mit einer Unsicherheit von 0,003 für $\lg H_1$ und $\lg H_2$ zu rechnen.

Nach DIN V 6868-55 gilt folgender Zusammenhang zwischen LK und den beiden Belichtungen H :

$$LK = \frac{1,75}{\lg H_2 - \lg H_1} \quad (13)$$

Daraus folgt für $u^2(LK)$:

$$u^2(LK) = \left(\frac{LK^2}{1,75} \right)^2 \cdot (u^2(\lg H_1) + u^2(\lg H_2)) \quad (14)$$

Als typischer Wert für LK wird 2,6 angesetzt, so dass sich hier eine Unsicherheit von 0,016 ergibt:

$$u(\delta LK_{\text{Pos, Bez1}}) = u(\delta LK_{\text{Pos, Bez2}}) = 0,016 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

Keilstufenfehler in Verbindung mit unterschiedlichen LK-Werten

Wenn unterschiedliche LK-Werte beim Ringvergleich und im DKD-Laboratorium vorliegen, sind andere Keilstufen bzw. dieselben Keilstufen mit anderer Gewichtung für die Bestimmung des LK-Werts beteiligt. In diesem Fall können Messabweichungen entstehen, wenn die Dichtestufung des Stufenkeils nicht ideal (d.h. Keilkonstante $\neq 0,15$) ist. Da in den Bezugsnormalen ein sogenannter 1%-Stufenkeil eingebaut ist und die beiden maßgebenden Keilstufennummern etwa 8 bzw. 12 sind (d.h. die Dichten der beiden Keilstufen etwa 1,2 bzw. 1,8 betragen), sind die beiden maximalen Abweichungen vom Soll-Dichte-Unterschied von 0,15 zwischen jeweils zwei benachbarten Stufen des Stufenkeils $\pm 0,012$ bzw. $\pm 0,018$.

Nach DIN V 6868-55 ist eine maximale Ablage von 11% in LK möglich, d.h. die Differenz zwischen $\lg H_1$ und $\lg H_2$ darf sich maximal um etwa 0,07 ändern (bei einem typischen Wert von $LK = 2,6$). Teilt man diese zulässige Ablage in der Differenz von $\lg H_1$ und $\lg H_2$ auf die beiden $\lg H$ -Werte jeweils zur Hälfte auf, so ergibt sich eine Verschiebung von jeweils etwa 0,04 in $\lg H_1$ und $\lg H_2$, was jeweils einem Bruchteil von $0,04/0,15$ Keilstufen entspricht. Entsprechend dieser Verschiebung erhöht sich der Einfluss benachbarter Keilstufen auf das LK-Ergebnis. Wenn der Stufenkeil ideal ist, d.h. wenn die Dichteunterschiede zwischen benachbarten Keilstufen exakt 0,15 sind, ergibt sich aus dieser Verschiebung keine Messabweichung für LK. Sind allerdings die oben genannten maximalen Abweichungen im Dichteunterschied zwischen zwei benachbarten Keilstufen (d.h. $\pm 0,012$ bzw. $\pm 0,018$) vorhanden, ergibt sich eine maximale Ablage von $\pm 0,012 \cdot 0,04 / 0,15 = \pm 0,003$ bzw. $\pm 0,018 \cdot 0,04 / 0,15 = \pm 0,005$ der gemessenen

	Kalibrierung von Sensitometern zur Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben https://doi.org/10.7795/550.20180823A	DKD-R 2-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	46/47

$\lg H_1$ - bzw. $\lg H_2$ -Werte von den richtigen Werten. Nimmt man Rechteck-Verteilungen für diese Ablagen an, so ergeben sich Standardunsicherheiten von 0,002 bzw. 0,003 für $u(\lg H_1)$ bzw. $u(\lg H_2)$. Bei $LK = 2,6$ ergibt sich daraus ein Unsicherheitsbeitrag für $\delta LK_{\text{Keil, Bez1}}$ von $\pm 0,014$ (Berechnung analog zu Gl.(14)):

$$u(\delta LK_{\text{Keil, Bez1}}) = u(\delta LK_{\text{Keil, Bez2}}) = 0,014 \text{ (Belichtung „grün“ und „blau“)}$$

3.4 Messunsicherheitsbudget

Die folgende Tabelle zeigt das Messunsicherheitsbudget für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$. Bei der Berechnung der Sensitivitätskoeffizienten ist ein LK-Wert von 2,6 angenommen worden.

Größe	Standardunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$LK_{\text{Mess, Geb}}$	0,014 (grün)	1/2,6	0,0054 (grün)
	0,016 (blau)	1/2,6	0,0062 (blau)
$LK_{\text{Mess, Bez1}}$	0,014 (grün)	-0,5/2,6	-0,0027 (grün)
	0,016 (blau)	-0,5/2,6	-0,0031 (blau)
$LK_{\text{Mess, Bez2}}$	0,014 (grün)	-0,5/2,6	-0,0027 (grün)
	0,016 (blau)	-0,5/2,6	-0,0031 (blau)
$\Delta LK_{\text{Bez1}}/LK_{\text{Pool}}$	0,012 (grün)	0,5	0,0060 (grün)
	0,014 (blau)	0,5	0,0070 (blau)
$\Delta LK_{\text{Bez2}}/LK_{\text{Pool}}$	0,012 (grün)	0,5	0,0060 (grün)
	0,014 (blau)	0,5	0,0070 (blau)
$\delta LK_{\text{Auswert, Bez1}}$	0,020 (grün und blau)	-0,5/2,6	-0,0038 (grün und blau)
$\delta LK_{\text{Auswert, Bez2}}$	0,020 (grün und blau)	-0,5/2,6	-0,0038 (grün und blau)
$\delta LK_{\text{Auswert, Geb}}$	0,020 (grün und blau)	1/2,6	0,0077 (grün und blau)
$\delta LK_{\text{Pos, Bez1}}$	0,016 (grün und blau)	-0,5/2,6	-0,0031 (grün und blau)
$\delta LK_{\text{Pos, Bez2}}$	0,016 (grün und blau)	-0,5/2,6	-0,0031 (grün und blau)
$\delta LK_{\text{Keil, Bez1}}$	0,014 (grün und blau)	-0,5/2,6	-0,0027 (grün und blau)
$\delta LK_{\text{Keil, Bez2}}$	0,014 (grün und blau)	-0,5/2,6	-0,0027 (grün und blau)
$\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$	0,0154 (grün) 0,0166 (blau)		

Tabelle 8

Die erweiterten Messunsicherheiten mit $k = 2$ betragen:

für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$: $U = 0,031$ oder 3,1% (Belichtung „grün“)

für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$: $U = 0,033$ oder 3,3% (Belichtung „blau“)

Als kleinste angebbare Messunsicherheit mit $k = 2$ für ideale Gebrauchsnormale ergibt sich:

für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$: $U_{\text{kleinst}} = 0,029$ oder 2,9% (Belichtung „grün“)

für $\Delta LK_{\text{Geb}}/LK_{\text{Bez}}$: $U_{\text{kleinst}} = 0,031$ oder 3,1% (Belichtung „blau“)



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de