

Ophthalmologie 2023 · 120:382–389  
<https://doi.org/10.1007/s00347-022-01742-z>  
Eingegangen: 21. August 2022  
Überarbeitet: 15. September 2022  
Angenommen: 21. September 2022  
Online publiziert: 27. Oktober 2022  
© Der/die Autor(en) 2022



# Korneale Endothelzellfotografie: Vergleich von Smartphones

Cornelius Jakob Wiedenmann · Daniel Böhringer · Thomas Reinhard ·  
Katrin Wacker

Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg, Freiburg, Deutschland

## Zusammenfassung

**Hintergrund:** Die Dokumentation ophthalmologischer Befunde mittels Smartphone-Fotografie kann in der ambulanten Patientenversorgung Diagnosen sichern und Verlaufsbeurteilungen ermöglichen. Die korneale Endothelzellfotografie (EZF) mittels Smartphone an der Spaltlampe ist sowohl für Smartphone als auch Untersucher\*in komplex. Smartphone-Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Fähigkeit, schnell und sicher Aufnahmen des Hornhautendothels anzufertigen.

**Ziel der Arbeit:** In dieser Arbeit werden verschiedene Smartphone-Modelle hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit für die korneale EZF vorgestellt und Erfolgsfaktoren für gute Smartphone-Aufnahmen beschrieben.

**Material und Methoden:** In einer Querschnittstudie wurde eine Auswahl von 16 verschiedenen Smartphone-Modellen bezüglich des Einsatzes in der kornealen EZF miteinander verglichen. Die Smartphones wurden mittels eines verstellbaren Adapters am Okular der Spaltlampe befestigt. Es wurde getestet, ob innerhalb von 3 min qualitativ hochwertige EZF von gesunden Probanden mit der Standard-Foto-App des jeweiligen Smartphones gelang. Zusätzlich wurde die subjektive Schwierigkeit der Erstellung der Aufnahme erfasst. Faktoren, die zu einer erfolgreichen EZF beitragen, wurden in einer Abbildung zusammengefasst.

**Ergebnisse und Diskussion:** Es zeigten sich deutliche Unterschiede bei der EZF hinsichtlich Durchführbarkeit und Qualität der generierten Aufnahmen. Nicht jedes Smartphone eignet sich gleich gut für die EZF.

### Schlüsselwörter

Telemedizin · DMEK · Kornea · Fuchs-Endotheldystrophie · Digital

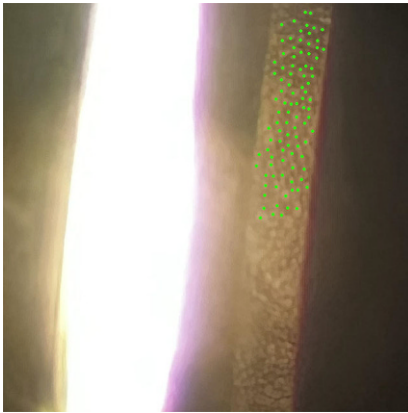
Die Dokumentation ophthalmologischer Befunde mittels Smartphone gewinnt zunehmend an Bedeutung. Unterschiedliche Anwendungsbereiche sowohl im vorderen als auch im hinteren Augenabschnitt wurden beschrieben, wie beispielsweise die Dokumentation und Gradeinteilung allergischer Konjunktivitiden und nukleären Katarakten, die korneale Endothelzellfotografie (EZF), Kammerwinkelvideografie, Beurteilung von Filterkissen nach filtrierender Chirurgie, Verlaufsbeurteilung suspekter Lidläsionen und Fundusaufnahmen [3, 8–10, 12, 15–17].

Die EZF ist wichtiger Bestandteil der ophthalmologischen Diagnostik und Verlaufsbeurteilung z. B. nach Keratoplastik. Seit Einführung der „Descemet membrane

endothelial keratoplasty“ (DMEK) nimmt die Zahl der durchgeführten Keratoplastiken stetig zu, sodass mit über ca. 9000 Keratoplastiken pro Jahr in Deutschland Verlaufscontrollen auch in der ambulanten Routineversorgung zunehmend häufig notwendig sind [14]. Eine Verlaufsbeurteilung in diesem Setting ist jedoch schwierig. Neben Faktoren wie beispielsweise Visus und Hornhautdicke stellt auch die Endothelzeldichte einen Bewertungsparameter für die Endothelfunktion dar [2]. Für die Darstellung und Vermessung der Endothelzellen (EZ) sind spezialisierte Spekularmikroskope verfügbar, deren Preis jedoch den eines Smartphones deutlich übersteigt [6]. Außerhalb spezialisierter Zentren stellt sich die Frage nach



QR-Code scannen & Beitrag online lesen



**Abb. 1** ▲ Endothelzellfotografie des iPhone 13 mit grün markierten Zellzentren

der Wirtschaftlichkeit einer Investition in ein Spekulummikroskop. Um dennoch Veränderungen des Hornhautendothels dokumentieren zu können, bietet die EZF mittels Smartphone möglicherweise eine Alternative. Toslak et al. beschrieben als Erste eine Technik zur Darstellung der EZ mittels Smartphone unter Einstellung des zweiten Purkinje-Bildes und Verwendung eines iPhone 6 [15]. Neuere Studien zur EZF verwendeten ein OnePlus 7 Pro und ein iPhone 7 Plus [5, 11]. Die in den genannten Studien verwendeten Smartphones unterscheiden sich hinsichtlich der Hard- und Software. Des Weiteren kamen unterschiedliche Aufnahmetechniken zum Einsatz. Toslak et al. erstellten die Aufnahmen mithilfe einer nicht vorinstallierten Kamera-App [15]. Angaben zur Dauer der Generierung der EZF wurden nicht genannt. Fliotos et al. nahmen ein 4K-Video von den EZ mit 30 Bildern pro Sekunde mit einer durchschnittlichen Länge von ca. 2 min und 40 s auf und durchsuchten anschließend das Video Bild für Bild, um das Bild mit der besten Aufnahmequalität zu finden [5]. Mantena et al. berichteten von einer Dauer von 2–4 min für EZF von beiden Augen mittels der Standard-Kamera-App [11].

In dieser Studie untersuchen wir, welche handelsüblichen Smartphone-Modelle sich ohne weitere Soft- und Hardwaremodifikationen für die EZF eignen.

## Methoden

### Rekrutierung

Alle ärztlichen Mitarbeiter\*innen der Klinik für Augenheilkunde des Universitätsklinikums Freiburg wurden gefragt, ob sie ihr Smartphone-Modell mitteilen und es für die EZF zur Verfügung stellen würden.

### Durchführung

Das jeweilige Smartphone wurde in einen kommerziell erhältlichen Spaltlampenadapter (oDocs Slit Lamp & Surgical Microscope Adapter, Waverley, Dunedin, New Zealand) gemäß den Vorgaben des Herstellers eingespannt. Anschließend wurde der Adapter mit Smartphone je nach Position der Hauptkamera des Smartphones an das rechte oder linke Okular der Spaltlampe (BQ 900, Haag-Streit, Köniz, Schweiz) montiert. Das Objektiv wurde zentriert und plan zur Okularebene in einem Abstand, der zur vollen Ausleuchtung des abgebildeten Bereichs führte, vor dem Okular befestigt. Nach Positionierung des Objektivs wurde der/die Proband\*in an der Spaltlampe positioniert. Der/die Proband\*in wurde gebeten, geradeaus ein Objekt zu fixieren und möglichst bewegungsarm in der Position zu verbleiben. Die Spaltlampe wurde auf einen Beleuchtungswinkel von ca. 45° eingestellt, die Lichtspalthöhe auf 1 mm reduziert und die Lichtspaltbreite so variiert, bis sich auf dem Smartphone-Display die kornealen EZ im zweiten Purkinje-Bild zeigten (■ Abb. 1). Für die Aufnahmen wurde die Standard-Kamera-App des jeweiligen Smartphones im Automatikmodus verwendet. Die Möglichkeit der meisten Kamera-Apps, durch Berührung des Displays die Beleuchtung und den Fokus einzustellen, wurde für die EZF genutzt. Sobald sich ein scharfes Bild zeigte, wurde die Aufnahme durch vorsichtiges Berühren des Displays ausgelöst. Die erzeugten Aufnahmen wurden nachträglich zugeschnitten, jedoch nicht weiter bearbeitet. Alle Aufnahmen wurden jeweils von einem in dieser Technik geübten Untersucher durchgeführt. Sofern das gleiche Smartphone-Modell von mehreren Kolleg\*innen zur Verfügung gestellt wurde, wurde jeweils nur ein Gerät für die EZF getestet.

## Auswertung

In dieser Untersuchung galt die EZF als möglich, wenn unter oben genannten Bedingungen innerhalb von 3 min eine EZF gelang. Als Erfolgskriterium mussten in den Aufnahmen mehrere nebeneinanderliegende EZ klar voneinander abgrenzbar sein. Bei erfolgreicher EZF wurde vom Untersucher ein subjektiver Gesamtschwergrad der Aufnahme in den Kategorien leicht/schwer angegeben. Die technischen Daten der Smartphones wurden den Herstellerangaben entnommen.

## Ergebnisse

Per E-Mail wurden alle 57 ärztlichen Mitarbeiter\*innen angeschrieben und um Mitteilung ihres Smartphone-Modells gebeten. Wir erhielten Rückmeldung von 35 (61 %) der angeschriebenen Mitarbeiter\*innen. Unter den 35 Rückmeldungen befanden sich 24 unterschiedliche Smartphone-Modelle. Von den 24 unterschiedlichen Smartphone-Modellen konnten 16 bezüglich der Anwendung in der EZF getestet werden.

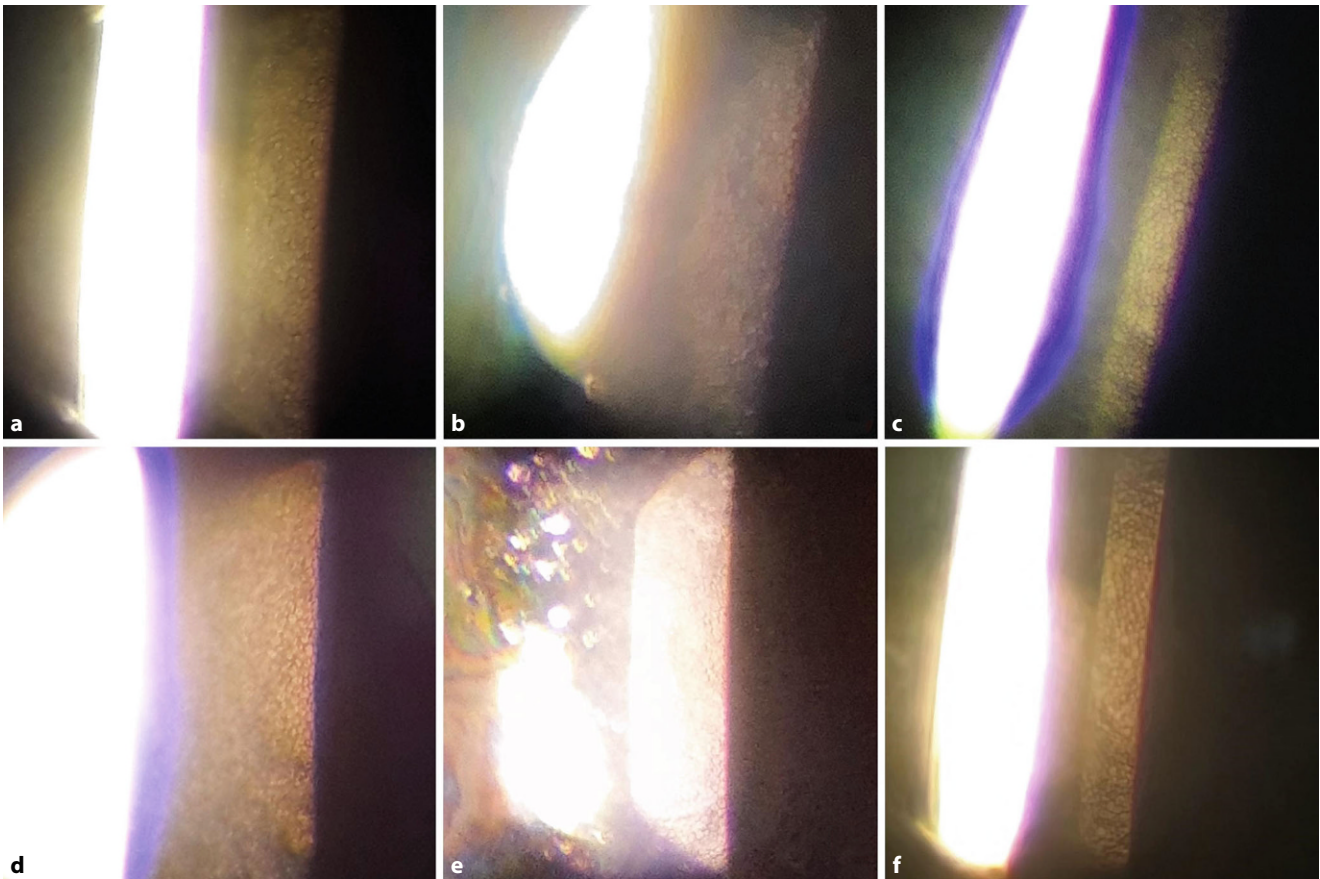
Von den 16 getesteten Smartphones gelang bei 7 Modellen innerhalb der Zeitvorgabe von 3 min eine EZF. Alle 16 Teilnehmer hatten eine klare Hornhaut und gesunde EZ.

## Technische Daten

Die getesteten Smartphones waren von insgesamt 5 unterschiedlichen Herstellern (■ Tab. 1). Das älteste getestete Smartphone erschien im September 2016 (iPhone 7), das neueste getestete Smartphone erschien im September 2021 (iPhone 13). Das älteste Smartphone, mit dem die EZF gelang, war das Galaxy A3, welches im Januar 2017 erschien.

Die Auflösung der Smartphone-Kameras lag zwischen 12 und 48 Megapixeln (MP), wobei die Mehrheit ( $n=12$ , 75 %) eine Auflösung von 12 MP aufwies. Nur 2 der 7 Smartphones (29%), mit denen sich die EZ darstellen ließen, besaßen eine Auflösung über 12 MP ( $1 \times 13$  MP und  $1 \times 48$  MP). Die Bildschirmauflösung betrug zwischen  $720 \times 1280$  Pixel (312 „pixel per inch“ [ppi]) und  $3030 \times 1440$  Pixel (551 ppi). Sowohl mit dem Smartphone mit der

| Tab. 1 Getestete Smartphone-Modelle im Vergleich |            |                        |                   |                          |                          |                            |                          |      |      |                       |        |                 |                |                      |               |
|--|------------|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|------|------|-----------------------|--------|-----------------|----------------|----------------------|---------------|
| Modell   | Hersteller | Firmensitz             | Erscheinungsdatum | Auflösung Hauptkamera MP | Anzahl Kameras Rückseite | Auflösung Bildschirm Pixel | Auflösung Bildschirm ppi | OIS  | EIS  | Sensor Diagonale (mm) | Blende | Pixelgröße (µm) | Betriebssystem | Endothel darstellbar | Leicht/schwer |
| iPhone 7   | Apple      | Cupertino, CA, USA     | 09.2016           | 12                       | 1                        | 1334 × 750                 | 326                      | Ja   | NA   | 5                     | 1,8    | 1,1             | IOS            | Nein                 | NA            |
| OnePlus 3T                                       | One Plus   | Shenzhen, China        | 11.2016           | 16                       | 1                        | 1920 × 1080                | 401                      | Ja   | Ja   | 6                     | 2      | 1,1             | Android        | Nein                 | NA            |
| Galaxy A3  | Samsung    | Suwon, Südkorea        | 01.2017           | 13                       | 1                        | 720 × 1280                 | 312                      | Nein | Nein | 5                     | 1,9    | 1,1             | Android        | Ja                   | Schwer        |
| iPhone 8   | Apple      | Cupertino, CA, USA     | 09.2017           | 12                       | 1                        | 1334 × 750                 | 326                      | Ja   | Ja   | 5,5                   | 1,8    | 1,2             | IOS            | Nein                 | NA            |
| Galaxy S9+                                       | Samsung    | Suwon, Südkorea        | 02.2018           | 12                       | 1                        | 2960 × 1440                | 531                      | Ja   | Ja   | 6,4                   | 1,5    | 1,4             | Android        | Ja                   | Schwer        |
| Galaxy S10                                       | Samsung    | Suwon, Südkorea        | 03.2019           | 12                       | 3                        | 3030 × 1440                | 551                      | Ja   | Ja   | 6,4                   | 1,5    | 1,4             | Android        | Ja                   | Leicht        |
| Galaxy S10e                                      | Samsung    | Suwon, Südkorea        | 03.2019           | 12                       | 2                        | 2280 × 1080                | 435                      | Ja   | Ja   | 6,4                   | 1,5    | 1,4             | Android        | Ja                   | Leicht        |
| P30 Pro  | Huawei     | Shenzhen, China        | 03.2019           | 40                       | 3                        | 2340 × 1080                | 398                      | Ja   | Ja   | 9,1                   | 1,8    | 1,0             | Android        | Nein                 | NA            |
| Pixel 3a   | Google     | Mountain View, CA, USA | 05.2019           | 12                       | 1                        | 2220 × 1080                | 441                      | Ja   | Ja   | 6,4                   | 1,8    | 1,4             | Android        | Nein                 | NA            |
| iPhone 11  | Apple      | Cupertino, CA, USA     | 09.2019           | 12                       | 2                        | 1792 × 828                 | 326                      | Ja   | Ja   | 6,2                   | 1,8    | 1,4             | IOS            | Ja                   | Schwer        |
| 11 Pro max                                       | Apple      | Cupertino, CA, USA     | 09.2019           | 12                       | 3                        | 2688 × 1242                | 458                      | Ja   | Ja   | 6,2                   | 1,8    | 1,4             | IOS            | Nein                 | NA            |
| iPhone 12 mini                                   | Apple      | Cupertino, CA, USA     | 11.2020           | 12                       | 2                        | 2340 × 1080                | 476                      | Ja   | Ja   | 6,2                   | 1,6    | 1,4             | IOS            | Nein                 | NA            |
| iPhone 12 Pro Max                                | Apple      | Cupertino, CA, USA     | 11.2020           | 12                       | 3                        | 2778 × 1242                | 458                      | Ja   | Ja   | 8,5                   | 1,6    | 1,7             | IOS            | Nein                 | NA            |
| Galaxy S21                                       | Samsung    | Suwon, Südkorea        | 01.2021           | 12                       | 3                        | 2400 × 1080                | 424                      | Ja   | Ja   | 9,1                   | 1,8    | 1,8             | Android        | Nein                 | NA            |
| OnePlus 9  | One Plus   | Shenzhen, China        | 03.2021           | 48                       | 2                        | 2400 × 1080                | 402                      | Ja   | Ja   | 8,9                   | 1,8    | 1,6             | Android        | Ja                   | Leicht        |
| iPhone 13  | Apple      | Cupertino, CA, USA     | 09.2021           | 12                       | 2                        | 2532 × 1170                | 460                      | Ja   | Ja   | 8,5                   | 1,6    | 1,7             | IOS            | Ja                   | Leicht        |



**Abb. 2** ▲ Endothelzellfotografie unterschiedlicher Smartphone-Modelle. **a** Galaxy A3, **b** iPhone 11, **c** OnePlus 9, **d** Galaxy S10, **e** Galaxy S9+, **f** iPhone 13. (Herstellerangaben siehe **Tab. 1**)

geringsten als auch mit der höchsten Bildschirmauflösung war die EZF möglich.

Bis auf ein Smartphone (Galaxy A3) besitzen alle getesteten Smartphones eine optische Bildstabilisierung (OIS). Das gleiche Smartphone (Galaxy A3) weist als einziges auch keine elektronische Bildstabilisierung (EIS) auf. Für das iPhone 7 liegen keine Angaben bezüglich der EIS vor. Auch mit dem Galaxy A3 war die EZF trotz fehlender OIS und EIS möglich.

Die Sensorgröße reichte von 5,0 mm Sensordiagonale bis 9,1 mm. Die EZF war mit Sensordiagonalen unterschiedlicher Größe (5,0 mm bis 8,9 mm) möglich. Die Blende reichte von Größe 2,0 bis 1,5. Die Pixelgröße lag zwischen 1,0 und 1,8  $\mu\text{m}$ . Die EZF war mit Blenden von 1,9 bis 1,5 möglich. Sieben der getesteten Smartphones (44%) liefen unter dem Betriebssystem iOS (Apple), 9 (56%) unter Android (Google). Zwei von 7 Smartphones, mit denen die EZF möglich war, liefen unter iOS (29%) und 5 unter Android (71%). Bei 4 von 7 Smartphones (58%) wurde die Schwierigkeit

der EZF mit leicht und bei 3 von 7 (42%) mit schwer eingestuft.

### Hürden und Erfolgsfaktoren bei der Anwendung

#### Belichtung

Die richtige Belichtungseinstellung ist Voraussetzung für die EZF. Nur bei der richtigen Belichtung ist der Kontrast zwischen EZ und Zellgrenzen ausreichend, um sichtbar zu werden. Es lassen sich grob 3 Helligkeitszonen bei der EZF unterscheiden: 1. ein relativ großer, dunkler Bereich, der um den kleinen durch die Spaltlampe beleuchteten Bereich der Hornhaut zu sehen ist, 2. ein heller Streifen, das erste Purkinje-Bild, das durch die Reflexion des Spaltlampenlichts auf der Hornhautoberfläche entsteht, 3. ein Streifen mittlerer Lichtintensität, das zweite Purkinje-Bild, das durch die Reflexion des Spaltlampenlichts auf den EZ entsteht und auf dem die EZ zu sehen sind. Die Schwierigkeit bei der Wahl der richtigen Belichtung besteht

darin, dass die EZ im Bereich der mittleren Lichtintensität zu sehen sind. Die Belichtungsautomatik der Kameras tendiert jedoch häufig dazu, entweder die dunklen Bereiche hell darzustellen, sodass die EZ überbelichtet erscheinen und nicht voneinander abgegrenzt werden können, oder die hellsten Bereiche innerhalb des Dynamikbereichs darzustellen, sodass, die EZ zu dunkel erscheinen (vgl. **Abb. 1** und **2**). Bei den meisten Aufnahmen muss daher die Belichtung manuell angepasst werden. Dies gelingt zwischen den unterschiedlichen Smartphone-Modellen jedoch nicht gleich gut. Das Misslingen der richtigen Belichtungseinstellung war einer der häufigsten Gründe, weshalb keine EZF gelang.

#### Fokus

Die Spaltlampe ist so konstruiert, dass der Untersucher ins Unendliche fokussiert, um eine scharfe Abbildung zu erhalten [7]. Daher muss der Fokus der Smartphone-Kamera ebenfalls auf unendlich eingestellt sein. Einige Kamera-Apps verfügen über



### Befestigung des Smartphones am Spaltlampenadapter

1. Positionierung des Objektivs der Kamera zentral vor der Öffnung des Spaltlampenadapters
2. Bei mehreren Objektiven darauf achten, dass das richtige Objektiv vor der Öffnung montiert wird

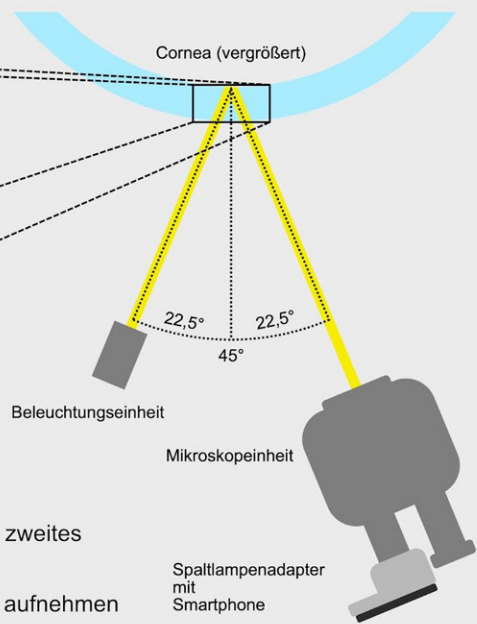
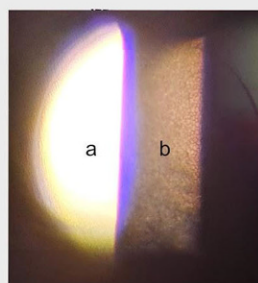
### Befestigung des Spaltlampenadapters an der Spaltlampe

1. Befestigung der Öffnung des Spaltlampenadapters und des Objektivs zentral vor dem Okular
2. Auf parallele Ausrichtung des Smartphones mit der Okularebene achten
3. Auf richtigen Abstand zwischen Okular und Objektiv achten
4. Ausleuchtung und scharfe Abbildung des Beobachtungsbereichs überprüfen



### Spekularmikroskopie

Spalthöhe 1 mm  
 Erstes (a) und zweites  
 (b) Purkinje-Bild  
 Endothelzellen im  
 zweiten Purkinje-Bild



1. Kopf an Stirn- und Kopfstütze positionieren und in Geradeausblick Objekt fixieren lassen
2. Beleuchtungswinkel von ca. 45° einstellen
3. Lichtspalthöhe auf 1 mm reduzieren
4. Lichtspaltbreite so einstellen, dass sich erstes und zweites Purkinjebild nicht überlagern
5. Endothelzellen darstellen und mittels Kamera-App aufnehmen

**Abb. 3** ◀ Anleitung für die erfolgreiche Endothelzellfotografie

einen Profimodus, der eine manuelle Einstellung des Fokus zulässt. Der Vergleichbarkeit wegen wurde in dieser Studie jedoch die Standardkameraeinstellung gewählt. Hierbei zeigte sich, dass der Autofokus einiger Kameras nicht zuverlässig auf die EZ einstellt. Als zusätzliche Schwierigkeit tritt hinzu, dass die EZ anhand der Darstellung auf dem Display mit der Spalt-

lampe fokussiert werden müssen. Zeigen sich keine scharfen EZ auf dem Display, kann dies entweder daran liegen, dass die Fokusebene der Spaltlampe nicht auf Höhe der EZ liegt oder am falsch eingestellten Fokus der Kamera. Unzuverlässige Autofokussierung erschwert so die EZF.

### Bildverarbeitung

Bei einzelnen Smartphones zeigte sich kein flüssiges Live-Bild der Kamera auf dem Bildschirm. Durch eine Zeitverzögerung zwischen Aufnahme und Darstellung des Bildes auf dem Display oder einer ruckeligen Darstellung ist es schwierig, die häufig nur kurzen Momente einer scharfen EZ-Darstellung zu erwischen. Probleme bei

der Darstellung lassen sich möglicherweise durch Unterschiede hinsichtlich Grafikkarten und Prozessoren erklären.

### Mehrere Kameras

Einige der getesteten Smartphones verfügen über mehrere Kameras. Smartphones mit mehr als einer Kamera haben meist eine Hauptkamera und eine weitere Weitwinkel- und/oder Telekamera. Bei manchen Smartphones lässt sich die eingesetzte Kamera auswählen, bei anderen Smartphones wechselt das Smartphone beim Zoomen automatisch von der einen zur anderen Kamera. Je nach Bauweise und Anordnung der Kameras kann bereits die Montage des Smartphones am Spaltlampenadapter schwierig sein. Es kann jeweils nur eine Kamera vor dem Okular befestigt werden. Ein spontanes Wechseln der verwendeten Kamera bei der Aufnahme ist daher nicht möglich. Prinzipiell waren Smartphones mit maximal 2 Kameras den Smartphones mit 3 Kameras überlegen bei der EZF.

### Diskussion

Mehrere Smartphones bieten die Möglichkeit in Kombination mit einer Spaltlampe Aufnahmen von kornealen EZ zu erstellen. Erste Ansätze, die EZF automatisiert auszuwerten und beispielsweise die Endothelzelldicke zu berechnen, wurden bereits beschrieben [1, 11, 13]. Für eine weiterführende Analyse ist jedoch eine qualitativ hochwertige Darstellung der EZ Voraussetzung. In unserem Vergleich gelang mit 7 von 16 Smartphones (44%) eine Aufnahme in zufriedenstellender Qualität innerhalb von 3 min.

Prinzipiell ist eine Auflösung von 12 MP für die EZF ausreichend. Bildschirmgröße und -auflösung entscheiden nicht grundsätzlich, ob die EZF möglich ist. Für leicht presbyope Untersucher\*innen kann ein großer Bildschirm jedoch unter Umständen hilfreich sein. Die meisten getesteten Smartphones verfügen sowohl über eine optische als auch eine elektronische Bildstabilisierung. Die Qualität der Bildstabilisierung variiert zwischen den Modellen. Genaue technische De-

tails hierzu sind jedoch nicht öffentlich zugänglich und können daher nur sehr eingeschränkt miteinander verglichen werden. Sensordiagonale, Blende und Pixelgröße bestimmen, wie viel Licht von der Kamera eingefangen werden kann. Neben neuerer Hard- und Software fällt bei den iPhones eine Entwicklung zu größeren Sensoren und größeren Pixeldurchmessern bei gleichbleibender Auflösung auf. Dies kann möglicherweise als Hinweis darauf gewertet werden, dass sich eine bessere Lichtausbeute positiv auf die EZF auswirkt. Jedoch lässt sich keiner der untersuchten technischen Parameter als einziges prospektives Differenzierungskriterium für die EZF nutzen, weshalb keine Aussagen über nicht getestete Smartphones getroffen werden können. Auch kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass die Smartphones mit negativem Testergebnis nicht mit einer anderen App oder einem anderen Setting zumindest eingeschränkt zur EZF geeignet sind. Alternativ zur direkten Fotografie wurde auch eine EZF mittels Videofunktion beschrieben [5]. Hierbei kann bei erneutem

Hier steht eine Anzeige.



Abspielen der Videosequenz an der Stelle mit dem besten Bild gestoppt und ein Screenshot davon angefertigt werden. Diese Methode erhöht die Wahrscheinlichkeit, kurze Momente, in denen die EZ scharf abgebildet sind, einzufangen. Allerdings besteht ein unter Umständen großer zeitlicher Aufwand, die mit hoher Bildrate aufgenommene Sequenz Bild für Bild auszuwerten.

Grundvoraussetzung für die EZF mittels Smartphone ist eine präzise und sichere Befestigung des Smartphones am Okular der Spaltlampe. Daher nimmt der Spaltlampenadapter eine wichtige Funktion ein. Da sich die Abmessungen und die Position der Kamera der verschiedenen Smartphones unterscheiden, entschieden wir uns dazu, einen kommerziell erhältlichen verstellbaren Spaltlampenadapter zu erwerben (oDocs Slit Lamp & Surgical Microscope Adapter, Waverley, Dunedin, New Zealand). Alle getesteten Smartphones ließen sich mittels dieses Adapters am Okular der Spaltlampe befestigen. Die Bedienung war unkompliziert, die Metallkonstruktion robust. Der Adapter kostet 200,00 Neuseeland Dollar, was ca. 120,00 € entspricht.

Die wichtigsten Schritte für eine erfolgreiche EZF mittels Smartphone sind in **Abb. 3** aufgeführt.

Über die Beurteilung der Morphologie hinaus besteht potenziell die Möglichkeit, die erstellten Aufnahmen hinsichtlich der Endothelzellzahl und -dichte auszuwerten. Neben einer manuellen Auswertung kann dies auch mittels neuronaler Netzwerke erfolgen [4]. Für die Bestimmung der Endothelzelldichte sind jedoch zunächst weitere Kalibrierungsschritte und Vergleichsmessungen erforderlich.

Die American Academy of Ophthalmology hat Hinweise und Tipps zur Smartphone-Funduskopie zusammengestellt [18]. Viele der dort genannten Hinweise können auch auf die Smartphone-EZF übertragen werden.

Wir konnten in dieser Untersuchung zeigen, dass sich verschiedene Smartphone-Modelle für die EZF eignen. Unsere Untersuchungsergebnisse können eine Orientierung bei der Auswahl eines geeigneten Smartphones bieten. Neben Smartphone und Smartphone-Adapter spielen die richtige Vorgehensweise und Erfahrung in der Untersuchungsmethode eine

zentrale Rolle bei der Smartphone-EZF. Aufgrund der wachsenden Zahl verfügbarer Smartphone-Apps sind in Zukunft möglicherweise auch weiterführende automatisierte Auswertungen der EZF möglich.

### Fazit für die Praxis

- Die EZF mittels Smartphones ist mit vielen, aber nicht allen Smartphones möglich.
- Anhand der technischen Daten lässt sich keine sichere Aussage darüber treffen, ob sich ein Smartphone für die EZF eignet.
- Wir präsentieren eine unvollständige Auswahl von Smartphones, die sich für die EZF eignen.
- Das hier beschriebene Vorgehen bietet eine Basis, auf der die Smartphone-EZF erlernt werden kann.
- Die Smartphone-EZF kann das diagnostische Spektrum in der ambulanten Routineversorgung erweitern.

### Korrespondenzadresse



**Dr. med. Cornelius Jakob Wiedenmann**  
Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg  
Kilianstr. 5, 79106 Freiburg, Deutschland  
cornelius.wiedenmann@uniklinik-freiburg.de

**Funding.** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

### Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** K. Wacker entwickelte V-FUCHS, der durch Mayo Clinic lizenziert an Aerie Pharmaceuticals, Inc., Iris Medicine, Trefoil, Inc. und Santen Inc. lizenziert ist. K. Wacker entwickelte das Prädiktions-tool für Hornhautödem, das durch die Universität Freiburg an Oculus Optikgeräte GmbH lizenziert ist. C.J. Wiedenmann, D. Böhringer und T. Reinhard geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

**Open Access.** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

### Literatur

1. Al-Fahdawi S, Qahwaji R, Al-Waisy AS et al (2018) A fully automated cell segmentation and morphometric parameter system for quantifying corneal endothelial cell morphology. *Comput Methods Programs Biomed* 160:11–23. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.03.015>
2. Böhringer D, Böhringer S, Poxleitner K et al (2010) Long-term graft survival in penetrating keratoplasty: the biexponential model of chronic endothelial cell loss revisited. *Cornea* 29:1113–1117. <https://doi.org/10.1097/ICO.0b013e3181d21d07>
3. Chen D, Ho Y, Sasa Y et al (2021) Machine learning-guided prediction of central anterior chamber depth using slit lamp images from a portable Smartphone device. *Biosensors*. <https://doi.org/10.3390/bios11060182>
4. Daniel MC, Atzrodt L, Bucher F et al (2019) Automated segmentation of the corneal endothelium in a large set of “real-world” specular microscopy images using the U-Net architecture. *Sci Rep* 9:4752. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41034-2>
5. Fliotos MJ, Deljookorani S, Dzhaber D et al (2020) Qualitative and quantitative analysis of the corneal endothelium with Smartphone specular microscopy. *Cornea* 39:924–929. <https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000002277>
6. Gasser L, Reinhard T, Böhringer D (2015) Comparison of corneal endothelial cell measurements by two non-contact specular microscopes. *BMC Ophthalmol* 15:87. <https://doi.org/10.1186/s12886-015-0068-1>
7. Gellrich M-M (2011) Die Spaltlampe: Konstruktionsgeschichte, Untersuchungsmethoden, Videografie. Kaden
8. Haddock LJ, Kim DY, Mukai S (2013) Simple, inexpensive technique for high-quality smartphone fundus photography in human and animal eyes. *J Ophthalmol*. <https://doi.org/10.1155/2013/518479>
9. Kalra G, Ichhpurani P, Thakur S, Sharma U (2021) Ideal illumination for Smartphone-based trabeculectomy bleb photography. *J Ophthalmic Vis Res* 16:357–366. <https://doi.org/10.18502/jovr.v16i3.9432>

10. Kilduff CLS, Deshmukh M, Guevara G et al (2022) Creating a secure clinical "Bring Your Own Device" BYOD photography service to document and monitor suspicious lesions in the lid oncology clinic. *Eye*. <https://doi.org/10.1038/s41433-022-02049-8>
11. Mantena S, Chandra J, Pecyna E et al (2021) Low-cost, Smartphone-based specular imaging and automated analysis of the corneal endothelium. *Transl Vis Sci Technol* 10:4. <https://doi.org/10.1167/tvst.10.4.4>
12. Pujari A, Behera AK, Agarwal D et al (2020) A new technique of iPhone 11 Pro Max Smartphone-aided angle video and standstill image documentation. *J Glaucoma* 29:e28–e30. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001479>
13. Qu J-H, Qin X-R, Peng R-M et al (2022) A fully automated segmentation and morphometric parameter estimation system for assessing corneal endothelial cell images. *Am J Ophthalmol* 239:142–153. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2022.02.026>
14. Seitz B (2020) Deutsches-Keratoplastik-Register
15. Toslak D, Thapa D, Ero I MK et al (2017) Smartphone-based imaging of the corneal endothelium at sub-cellular resolution. *J Mod Opt* 64:1229–1232. <https://doi.org/10.1080/09500340.2016.1267815>
16. Yazu H, Shimizu E, Okuyama S et al (2020) Evaluation of nuclear cataract with Smartphone-attachable slit-lamp device. *Diagnostics*. <https://doi.org/10.3390/diagnostics10080576>
17. Yazu H, Shimizu E, Sato S et al (2021) Clinical observation of allergic conjunctival diseases with portable and recordable slit-lamp device. *Diagnostics*. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11030535>
18. (2018) Smartphone Funduscopy: A High-Tech, Low-Cost Imaging Alternative. <https://www.aao.org/eyenet/article/smartphone-funduscopy>. Zugegriffen: 16. Febr. 2020

## Corneal endothelial cell photography: comparison of smartphones

**Background:** The documentation of ophthalmologic findings using smartphone photography can confirm diagnoses and enable follow-up assessments in outpatient care. Photographing corneal endothelial cells using a smartphone on a slit lamp is complex for both smartphone and examiner. Smartphone models differ in their ability to quickly and safely take images of the corneal endothelium.

**Aim of this work:** In this paper different smartphone models are presented with respect to their applicability for corneal endothelial cell photography and success factors for good smartphone imaging are described.

**Material and methods:** In a cross-sectional study, a selection of 16 different smartphone models were compared with respect to their use in corneal endothelial cell photography. The smartphones were attached to the slit lamp eyepiece using an adjustable adapter. It was tested whether high-quality endothelial cell images of healthy subjects could be obtained within 3 min using the standard photo app of the respective smartphone. In addition, the subjective difficulty of creating the image was recorded. Factors contributing to successful imaging of corneal endothelial cells were summarized in a figure.

**Results and discussion:** Distinct differences regarding feasibility and quality of endothelial cell photography were detected between the different smartphones. Not every smartphone is suitable for endothelial cell photography.

### Keywords

Telemedicine · DMEK · Cornea · Fuchs-Endothelial corneal dystrophy · Digital