

Kamera-Sensorforensik: Erkennungsraten im Kontext von Bildkompression

Martin Rosenfeld, Reiner Creutzburg, Claus Vielhauer
Fachhochschule Brandenburg, Fachbereich Informatik und Medien
PF 2132, D-14737 Brandenburg
{rosenfem,creutzburg,vielhauer}@fh-brandenburg.de

Abstract: In diesem Beitrag wird die Problematik der Kameraidentifikation anhand des Sensorrauschens nach dem Verfahren von Lukas, Fridrich et.al. behandelt. Dabei adressieren unsere experimentellen Untersuchungen drei Aspekte: Rechengenauigkeit in zwei Implementierungsvarianten, JPEG-Kompression und Bildgrößenmanipulation (Skalierung und Ausschnittbildung). Anhand einer selbst erstellten Datenbasis werden Auswirkungen dieser drei Aspekte auf die Erkennungsrate experimentell untersucht und kritisch mit anderen Arbeiten verglichen. Im Ergebnis zeigen unsere Arbeiten zum einen, dass die Erkennungsgenauigkeit sehr stark von der in der Implementierung gewählten Rechengenauigkeit abhängt. Zum anderen bestätigen unsere Experimente grundsätzlich die Erkenntnisse von Lukas et.al. und zeigen, dass das Verfahren bei Kompression und Bildgrößenmanipulationen begrenzte Robustheit aufweist.

1 Einleitung

Die Gebiete der *Computer Forensik* im Allgemeinen sowie der *Medien Forensik* im Speziellen gewinnen zunehmend an Bedeutung [1]. Durch eine stetige Weiterentwicklung der bestehenden Hard- und Softwaresysteme werden gerade im Bereich der Bildbearbeitung immer mehr Möglichkeiten geschaffen, Bilder auf eine sehr einfache Weise zu verändern. Problematisch wird es, wenn die technische Möglichkeiten dazu genutzt werden, Bilder im Rahmen der öffentlichen Medien- und Presselandschaft oder gar im Zusammenhang von Straftaten zu manipulieren. Hier müssen Möglichkeiten geschaffen werden, den Ursprung und die Glaubhaftigkeit von Bildern zu verifizieren und deren Integrität sicher zu stellen. Dabei liegt der Schwerpunkt u.a. bei der Verifikation eines digitalen Bildes in der Kamerazuzuordnung, d.h. in dem Nachweis darüber, mit welcher Kamera das Bild aufgenommen wurde.

Das Ziel dieses Beitrages ist es, einen aktuell bekannten Ansatz zur forensischen Bildanalyse, mit deren Hilfe es möglich ist, ein digitales Bild einer bestimmten Kamera zuzuordnen, vorzustellen und zu evaluieren. Obgleich das von uns untersuchte Verfahren grundsätzlich auch zur Unterscheidung von Kamerainstanzen gleichen Typs geeignet, basieren unsere Experimente auf einer gegebenen Menge von Testbildern erstellt mit unterschiedlichen Kameratypen, wobei der Fokus unserer Untersuchungen auf drei Aspekten liegt: 1) Auswirkung von Implementierungsvarianten hinsichtlich der numerischen Variablen, sowie Detektionsgenauigkeit bei 2) JPEG Komprimierung und 3) Ausschnittbildung.

2 Vorarbeiten zur Kameraidentifikation

Im Jahr 2006 veröffentlichten *Jan Lukás, Jessica Fridrich* und *Miroslav Goljan* ein eigens zu Identifikationszwecken entwickeltes Verfahren [2], um aus einem Digitalbild mittels Wavelet-Transformation und digitaler Filterung ein signifikantes Rauschmuster, ähnlich einem Fingerabdruck, zu extrahieren und auszuwerten. Im Ausgangspunkt der Betrachtungen wurde hierfür das PRNU-Rauschen genauer untersucht. Neben den bekannten Gründen für das Auftreten eines Rauschens, durch Inkonsistenzen im Siliziumhalbleiter und im Herstellungsprozess, wurden weitere Ursachen wie die Lichtbrechung auf Staubpartikeln und den Oberflächen des optischen Systems sowie die gewählte Zoomeinstellung herausgefunden [3]. Zudem konnte das originale Verfahren zwischenzeitlich durch statistische Klassifikationsverfahren verbessert werden, z.B. basierend auf Maximum-Likelihood Funktionen [4]. Neben der Analyse von Rauschmustern finden sich weitere verwandte Ansätze zur Kameraidentifikation, z.B. basierend auf Merkmalsvektoren [5].

3 Experimenteller Aufbau

Im Rahmen unserer Arbeiten [7] wurde nach Durchführung entsprechender Vorbetrachtungen ein Algorithmus in Anlehnung an [2] entwickelt, mit dessen Hilfe eine Verifikation erbracht werden kann, ob ein Bild p mit einer Kamera C aufgenommen wurde. Dieser Algorithmus wurde dann anhand einer neu erstellten Testdatenbasis evaluiert und die Ergebnisse mit denen aus [2] verglichen.

Ausgehend von den Resultaten früherer Testreihen wurde zunächst eine neue Datenbasis erstellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Kameramodelle ein unkomprimiertes Bildformat wie bspw. TIFF unterstützten. Insgesamt wurden sechs verschiedene Kameras mit unterschiedlichen Auflösungen ausgewählt. Für eine bessere Vergleichsmöglichkeit wurden anschließend mit jeder Kamera 110 unkomprimierte Bilder mit ähnlichen Motiven und Lichtverhältnissen aufgenommen.

Tabelle 1 stellt eine Übersicht der zur Erstellung der Bilddatenbank verwendeten Kameramodelle, sowie deren native Auflösung, Seitenverhältnis und Bildformat dar. Da die beiden Modelle der Marke *Canon* für unkomprimierte Aufnahmen ein herstellerspezifisches RAW-Format (*.CR2 / *.CRW) nutzten, wurden deren Bilder nachträglich mit der Software *ZoomBrowser* in das TIFF-Format konvertiert.

Kameramodell	native Auflösung	Seitenverhältnis	Bildformat
Canon EOS 20D	3504 × 2336	3 : 2	CR2
Canon EOS 300D	3072 × 2048	3 : 2	CRW
Fujifilm S5000	2048 × 1542	1024 : 771	TIFF
Olympus C-750 UZ	2288 × 1712	143 : 107	TIFF
Olympus C-2500L	1712 × 1368	214 : 171	TIFF
Panasonic DMC FZ30	3264 × 2448	4 : 3	TIFF

Tabelle 1: Für die Erstellung der Testdatenbank verwendete Kameramodelle

Bei der experimentellen Untersuchung wurden die Rauschmuster der jeweils ersten 80 Bilder der verschiedenen Kameramodelle zur Berechnung des Referenzmusters herangezogen, wohingegen die verbleibenden 30 Bilder als *unbekannt* angenommen und zur Korrelationsberechnung verwendet wurden. Um die optimalen Parametereinstellungen festzulegen, wurden erneut Berechnungen mit verschiedenen Werten für die in [2] eingeführten Verfahrensparameter *Level der Wavelet-Transformation* mit $Level \in \{2, 4, 8\}$ und *Sigma-Null* mit $\sigma_0 \in \{0.5, 1, 5\}$ durchgeführt. Dabei zeigten sich unter Verwendung von $\sigma_0 = 0.5$ sehr schlechte Gleichfehlerraten, wohingegen die Festlegung von σ_0 auf den Wert 1 bzw. 5 fast identische Ergebnisse lieferte. Das gleiche Resultat zeigte sich bei der Wahl des Levels der Wavelet-Transformation. Der kleinste Wert $Level = 2$ führte zu vergleichsweise schlechten Gleichfehlerraten, wobei die Werte 4 und 8 sehr geringe Abweichungen im Endergebnis zeigten. Letztendlich wurden die Parameter auf die Werte $Level = 4$ und $\sigma_0 = 1$ gesetzt. Diese Einstellung wurde auch für alle weiteren Experimente genutzt.

Hinsichtlich der Implementierungsvarianten wurden in unseren ersten Untersuchungen zwei Ansätze gegenübergestellt: ein erster Algorithmus, implementiert in der Programmiersprache Pascal in 32 bit Ganzzahl-Arithmetik (Integer) [6], sowie eine zweite Variante implementiert durch die Autoren in Matlab Double Arithmetik (8 Byte reele Zahl, doppelte Genauigkeit). Beide Varianten wurden dann anhand der selben Testdaten und Parametrisierungen experimentell untersucht, wobei zunächst die Korrelationswerte beim Vergleich aller sich ergebenden Bildpaare betrachtet wurden. Wie beispielhaft in Abbildung 1 gezeigt, ergaben sich dabei grundsätzlich wie in [2] beobachtet, deutliche erhöhte Korrelationswerte bei Vergleich von Bildern, die von der selben Kamera stammen.

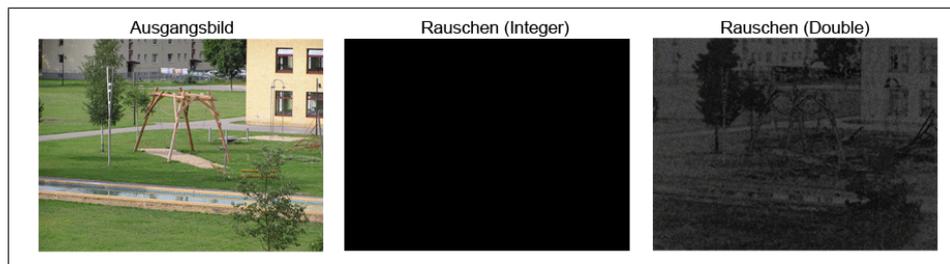


Abbildung 1: Vergleich der Rauschmuster eines Bildes der *Olympus C-750* im Integer- und Double-Bereich

Bei der Klassifikation anhand des Vergleichs der ermittelten Korrelationswerte stellt sich grundsätzlich das Problem der Falschklassifikationen ein. Dabei unterscheidet man zum Einen in die so genannten False-Positive Klassifikationen, d.h. in unserem Fall werden bei einem paarweisen Vergleich Bilder fälschlicherweise als von dem selben Kameratyp stammend zugeordnet. Zum Anderen können False-Negatives auftreten, d.h. zwei Bilder werden, obwohl sie originär von der selben Kamera stammen, nicht als solche erkannt. Die mit diesen Fehlerklassen einher gehenden Fehlerraten False-Positive-Rate (FPR) und Falsch-Negativ-Rate (FNR) sind in der Regel von einem Schwellwertparameter abhängig und z.B. werden in Form von Fehlerratendiagrammen dargestellt. Diagramme für ausgewählte Kameratypen in unseren Untersuchungen finden sich im Anhang zu diesem Artikel. Zum

vereinfachten Vergleich der Erkennungsgenauigkeiten in unseren weiteren Experimenten verwenden wir als skalare Größe die Gleichfehlerrate (engl. Equal-Error-Rate, EER), als denjenigen Wert, bei dem sich $FPR=FNR$ im Diagramm einstellt.

Eine Gegenüberstellung der in unserem ersten Experiment ermittelten Gleichfehlerraten von den Berechnungen im ganzzahligen sowie im reellen Zahlenraum kann der nachstehenden Tabelle 2 entnommen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Umstellung der Genauigkeit von Integer auf Double bei allen Kameras unserer Datenbasis eine klare Trennung zwischen den Korrelationswerten der kameraeigenen und den kamerafremden Rauschmuster bewirkt hat, da im Gegensatz zu der Ganzzahl-Implementierung hier bei allen Berechnungen die Gleichfehlerraten den Wert $ERR = 0$ angenommen haben.

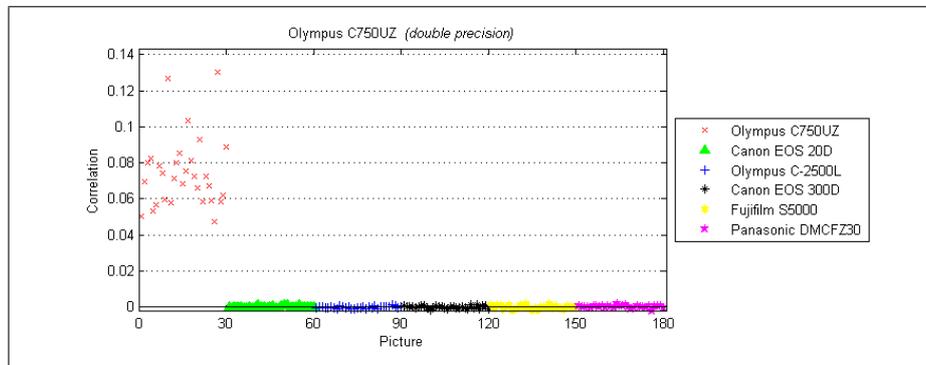


Abbildung 2: Korrelationsergebnisse der Kamera *Olympus C-750* mit einer Genauigkeit im Double-Bereich

Eine Gegenüberstellung der in unserem Experiment ermittelten Gleichfehlerraten von den Berechnungen im ganzzahligen sowie im reellen Zahlenraum kann der nachstehenden Tabelle 2 entnommen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Umstellung der Genauigkeit von Integer auf Double bei allen Kameras unserer Datenbasis eine klare Trennung zwischen den Korrelationswerten der kameraeigenen und den kamerafremden Rauschmuster bewirkt hat, da im Gegensatz zu der Ganzzahl-Implementierung hier bei allen Berechnungen die Gleichfehlerraten den Wert $ERR = 0$ angenommen haben.

Kameramodell	Integer	Double
Canon EOS 20D	0.010	0
Canon EOS 300D	0.075	0
Fujifilm S5000	0	0
Olympus C-750 UZ	0.057	0
Olympus C-2500L	0.114	0
Panasonic DMC FZ30	0.019	0

Tabelle 2: Vergleich der Gleichfehlerraten ERR der neuen Datenbasis mit einer Genauigkeit im Integer- und Double-Bereich

Aufgrund der vorgenannten Beobachtungen haben wir die weiteren Experimente bezüglich Bildkomprimierung und Bildgrößenänderung ausschließlich anhand der Implementierung in Double-Arithmetik vorgenommen.

4 Auswirkung der JPG-Komprimierung auf die Berechnungen

In einem weiteren Experiment sollte genauer untersucht werden, welchen Einfluß die JPEG-Komprimierung auf die Aussagewahrscheinlichkeit einer Kameraidentifizierung hat. Das grundsätzlich eine Kamerazuordnung bei JPG-komprimierten Bildern möglich war, zeigten bereits die Berechnungen mit den Bildern der alten Datenbasis. Auf den ersten Blick gab es hier offensichtlich keine klare Trennung der kameraeigenen und kamerafremden Bilder eines Modells über alle Korrelationswerte im gesamten Testfeld. Betrachtet man jedoch nur die Modelle *Olympus C5050*, *Sony P73* und *Sony P93*, deren Bilder mit den Werten $cbpp \in \{5, 8, 8\}$ eine ähnliche Bitrate aufweisen so wird deutlich, dass zwischen den Korrelationswerten eine Trennung besteht. Diese ist zwar nicht so stark ausgeprägt wie bei den Berechnungen mit den unkomprimierten Bildern der neuen Datenbasis, jedoch zeigt die zwischen diesen Kameramodellen vorhandene Gleichfehlerrate mit einem Wert von $EEER = 0$, dass auch bei JPG-komprimierten Bildern eine eindeutige Kameraidentifizierung möglich ist. Die nachstehende Abbildung 3 stellt einen Auszug der Korrelationsgrafiken in [7] dar und verdeutlicht die bestehende Trennung der Korrelationsergebnisse zwischen den drei Kameramodellen, woraus sich der Wert $EEER = 0$ ableiten läßt.

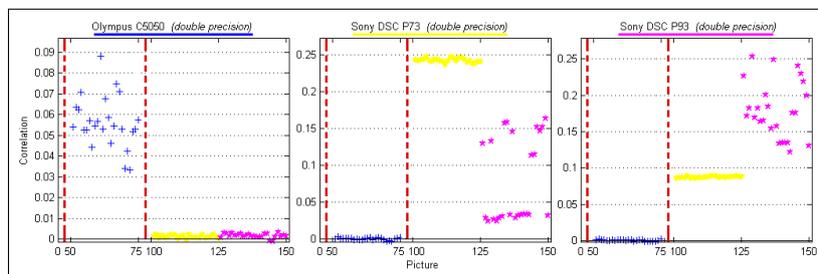


Abbildung 3: Vergleich der Korrelationsergebnisse von Kameramodellen mit einer ähnlicher Bitrate (v.l.r. $cbpp = 5, 8, 8$), die vertikal gestrichelte Linie visualisiert den von uns gewählten Entscheidungsschwellwert für identische Kameratypen)

Bereits in der Arbeit von Lukás et al. ist ein Experiment beschrieben, in dem das Verfahren auf JPG-komprimierte Bilder angewandt wurde. Dabei musste beachtet werden, dass von den Kameras die Parameter für die JPG-Komprimierung nicht bekannt waren und somit keine vergleichbaren Bilder mit den Kameras selbst erstellt werden konnten. Deshalb wurden die unkomprimierten Bilder unter kontrollierbaren Bedingungen mittels einer Software einer JPG-Komprimierung in den *Qualitätsstufen* 90, 70 und 50 unterzogen und separat gespeichert. Anschließend wurden die Referenzmuster aus den unkomprimierten Bildern berechnet und mit den Rauschmustern der komprimierten Bilder korreliert.

Das Experiment von Lukás et al. sollte zunächst mittels der MATLAB-Implementierung wiederholt werden. Hierfür wurden alle Bilder der neuen Datenbasis mit dem Programm *XnView* in den leicht abweichenden Qualitätsstufen 90, 80 und 50 als JPG-komprimierte Bilder abgespeichert. Neben der Qualitätsstufe wurde im Programm der Parameter *DCT-Methode* auf den Wert *Langsam*, der Parameter *Glättungsfaktor* auf den Wert *Null* und der Parameter *Subsampling-Rate* auf den Wert $2 \times 2, 1 \times 1, 1 \times 1$ (*Standard*) eingestellt. Anschließend wurde das Referenzmuster aus 80 unkomprimierten Bildern des jeweiligen Kameramodells berechnet und mit den Rauschmustern von 30 mit den entsprechenden Qualitätsstufen komprimierten *unbekannten* Bildern korreliert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der nachstehender Tabelle 3 (linker Teil, TIF-Referenzmuster) aufgeführt.

Kameramodell	EER (TIF-Referenzmuster)			EER (JPG90-Referenzmuster)		
	JPG90	JPG80	JPG50	JPG90	JPG80	JPG50
Canon EOS 20D	0	0	0	0	0	0.142
Canon EOS 300D	0	0	0	0.033	0.067	0.171
Fujifilm S5000	0	0	0	0	0	0
Olympus C-750 UZ	0	0	0	0	0	0.111
Olympus C-2500L	0	0	0	0	0	0
Panasonic DMC FZ30	0	0	0	0	0	0.053

Tabelle 3: Vergleich der Gleichfehlerraten bei JPG-komprimierten Rauschmustern

Wie anhand der Werte $EER = 0$ der jeweiligen Gleichfehlerraten zu erkennen, konnte unter Verwendung eines unkomprimierten Referenzmusters über alle Kameramodelle und allen JPEG-Qualitätsstufen hinweg eine eindeutige Bildzuordnung vorgenommen werden. Damit decken sich die Ergebnisse mit denen von Lukás et al. Neben dieser einfachen Wiederholung des Experimentes sollte in einem zweiten Schritt mittels der MATLAB-Implementierung ein weiterer Sachverhalt, der über die Idealbedingungen hinausgeht, untersucht werden.

Da ein Großteil der sich im Umlauf befindlichen Kameramodelle die Funktion, Bilder in einem unkomprimierten Dateiformat wie bspw. *.TIF oder *.RAW zu speichern, gar nicht unterstützen sondern sämtliche Bilder einer JPEG-Kompression unterziehen, stellte sich die Frage nach der Anwendbarkeit des Identifizierungsalgorithmus beim Vergleich solcher Kameramodelle. In einem solchen Fall liegt die Problematik in der Berechnung des jeweiligen Referenzmusters, da hierfür keine unkomprimierten Bilder herangezogen werden können. In der Regel bieten solche Kameras jedoch die Möglichkeit, die Qualität der Bilder über ein Menü einzustellen. Dabei werden die Qualitätsstufen mit Begriffen wie bspw. *Super Fein*, *Fein* oder *Normal* bezeichnet. Wo diese Begriffe auf einer Qualitätsskala von 0 bis 100 genau einzuordnen sind, kann allerdings nicht gesagt werden, da die Hersteller keine weiteren Angaben zur implementierten JPEG-Komprimierung und insbesondere den verwendeten Quantisierungstabellen machen. Vergleicht man aber die aufgenommenen Bilder unter Verwendung der jeweils besten Qualitätsstufe von verschiedenen Kameras mit Bildern, die nachträglich am Computer komprimiert wurden, so kann den Kamerabildern in etwa ein Qualitätsfaktor von 95 zugeordnet werden.

Vor diesem Hintergrund wurde das Experiment erneut durchgeführt, wobei die Referenzmuster nicht aus den unkomprimierten Bildern gewonnen wurden, sondern aus den mit einem Qualitätsfaktor von 90 komprimierten Bildern. Hierbei wurde bewusst eine Qualität von 90 ausgewählt, um mit einem geringen Abstand definitiv unterhalb der unteren Grenze der besten Qualitätseinstellung einer Kamera zu liegen. Anschließend wurden die neu berechneten Referenzmuster mit den Rauschmustern der verbliebenen komprimierten Bilder korreliert. Wie an den Ergebnissen in Tabelle 3 (JPG90-Referenzmuster) zu erkennen, weist nur das Kameramodell *Canon EOS 300D* bei den Rauschmustern, welche aus den mit einer Qualitätsstufe von 80 bzw. 90 komprimierten Bildern gewonnen wurden, eine Gleichfehlerrate ungleich Null auf. Bei allen anderen Kameras zeigte sich das gleiche Ergebnis wie bei den Berechnungen mit den Referenzmustern aus den unkomprimierten Bildern. Erst im Bereich einer Qualitätsstufe von 50 traten starke Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Testreihen auf.

Betrachtet man die nachstehende Korrelationsgrafik, bei welcher sowohl das Referenzmuster als auch die übrigen Rauschmuster aus JPEG-komprimierten Bildern mit der Qualitätsstufe 90 berechnet wurden genauer, so ist zu erkennen, dass fast alle Korrelationswerte der *Canon EOS 300D* sehr eng beieinander liegen. Lediglich zwei Ausreißerwerte verursachen die Gleichfehlerrate von 3.3%. Weitere Detailergebnisse für ausgewählte Kameratypen finden sich im Anhang zu diesem Artikel.

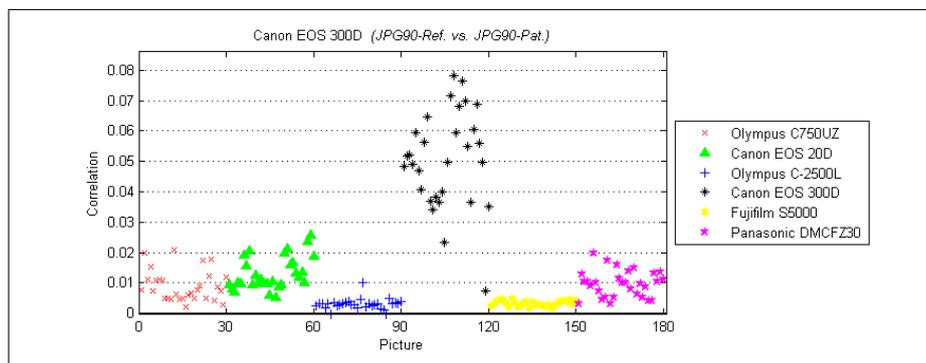


Abbildung 4: Korrelationswerte der *Canon EOS 300D* bei einer JPEG-Qualitätsstufe von 90

Unter Berücksichtigung des Testumfeldes, bei dem lediglich 80 Bilder für die Berechnung des Referenzmusters, 30 *unbekannte* Bilder und nur 6 Kameras verwendet wurden, wird grundsätzlich das Potential des Identifikationsalgorithmus sehr deutlich. Allerdings kann aufgrund der begrenzten Datenmenge an dieser Stelle keine hohe statistische Signifikanz erwartet werden.

5 Skalierung und Bildausschnitte

Nachdem die Anwendbarkeit des Identifizierungsalgorithmus auf JPEG-komprimierte Bilder genauer untersucht worden war, sollte in einer weiteren Testreihe der Einfluß einer zusätzlichen Skalierung sowie eines Bildzuschchnittes auf die Berechnungen analysiert werden. Eine erste Grundlage lieferte auch hier die Arbeit von Lukás et al. In dem darin beschriebenen Experiment wurde die Auswirkung von Aufnahmen mit einer geringeren Bildauflösung auf die Ergebnisse der Berechnungen am Kameramodell *Canon G2* untersucht. Hierbei ging man dem Sachverhalt nach, dass viele Kameramodelle neben der vollen (nativen) Auflösung auch kleinere Bildformate unterstützen. In einem solchen Fall werden die Bilder innerhalb der Kamera meist mit einer kleineren Skalierung in komprimierter Form abgespeichert. Im Ergebnis der Korrelation zwischen 84 Rauschmustern, welche aus separat aufgenommenen Bildern mit einer verringerten Auflösung von 1600×1200 Pixeln berechnet wurden, und 6 unkomprimierten Referenzmustern von Kameramodellen mit einem gleichen Seitenverhältnis konnte bei fast allen Bildern eine eindeutige Kamera-zuordnung verzeichnet werden.

Im Gegensatz zu dem exemplarischen Test von Lukás et al. mit nur einer einzelnen Kamera sollte mit Hilfe der MATLAB-Implementierung eine Testreihe über alle Bilder durchgeführt werden. Dabei stand auch bei diesem Experiment die Praxistauglichkeit des Verfahrens im Vordergrund. In einem hypothetischen Szenario könnte beispielsweise der Nachweis über die Zugehörigkeit eines im Internet veröffentlichten Fotos zu einer bestimmten Kamera zu erbringen sein. Ausgehend von dem Umstand, dass viele Bilder vor der Veröffentlichung im Internet sowohl einer nachträglichen JPEG-Komprimierung als auch einer Skalierung durch ein Computerprogramm unterzogen werden, sollte analysiert werden, ob und unter welchen Rahmenbedingungen das Identifikationsverfahren verwertbare Ergebnisse liefert. Zur Vereinfachung der Berechnungen wurde zunächst angenommen, dass die Bilder in ihrer Größe ausschließlich skaliert und nicht beschnitten wurden, was ein gleiches Seitenverhältnis zwischen den Rauschmustern und den Referenzmustern voraussetzte. Unter Betrachtung der verschiedenen Kameras im Testfeld konnten somit nur die Bilder der *Canon Eos 20D* und *Canon EOS 300D* verwendet werden, da beide Kameras ein identisches Seitenverhältnis von 3 : 2 (vgl. Tabelle 1) aufwiesen.

In Vorbereitung der Berechnungen wurden zunächst jeweils 30 unkomprimierte Bilder beider Kameramodelle in den Skalierungen 75%, 50% und 25% mit einer JPEG-Komprimierung in der Qualitätsstufe 90 mit Hilfe des Programms *XnView* separat gespeichert. Eine Auflistung der resultierenden Auflösungen findet sich in folgender Tabelle 4.

Kameramodell	100 % (nativ)	75 %	50 %	25 %
Canon EOS 20D	3504×2336	2628×1752	1752×1168	876×584
Canon EOS 300D	3072×2048	2304×1536	1536×1024	768×512

Tabelle 4: Auflösungen in den jeweiligen Skalierungsstufen

Für die Neuberechnung der Bilder wurde die *Lanczos-Interpolation* gewählt, welche als Standard für die JPEG-Komprimierung in *XnView* eingestellt ist und sehr gute Ergebnisse liefert. Nach Abschluss der Vorbereitungen wurden die Rauschmuster von den skalierten

Bildern berechnet. Anschließend wurden die aus den nicht skalierten Bildern berechneten Referenzmuster mit den skalierten Rauschmustern korreliert, wobei die Rauschmuster vor jeder Korrelation auf die Größe des zu vergleichenden Referenzmusters mittels einer *bilinearen Interpolation* in MATLAB skaliert wurden. Ähnlich wie auch schon im Experiment zur JPEG-Komprimierung kam für die Berechnungen sowohl das unkomprimierte als auch das JPEG-komprimierte (Qualitätsstufe 90) Referenzmuster zum Einsatz, wobei durch letzteres auch der Fall einer Kamera ohne die Unterstützung eines unkomprimierten Dateiformats simuliert werden sollte. Wie die Ergebnisse der Gleichfehlerraten in Tabelle 5 zeigen, konnten unter Verwendung des unkomprimierten Referenzmusters alle Bilder bis zu einem Skalierungsfaktor von 0.5, was einer Bildgröße von 50% der nativen Auflösung entspricht, eindeutig identifiziert werden. Bei einem Skalierungsfaktor von 0.25 kam es dann allerdings zu Überschneidungen der Korrelationswerte zwischen den kameraeigenen und kamerafremden Bildern. Auffällig waren jedoch die Ergebnisse der Berechnungen mit den komprimierten Referenzmustern. Hier konnten beim Modell *Canon EOS 300D* unter Verwendung der nativ aufgelösten Rauschmuster zunächst nicht alle Bilder eindeutig identifiziert werden. Dieser Umstand änderte sich jedoch bei einer Skalierung der Bilder mit den Faktoren 0.75 und 0.5, wo mit einem Wert von $EER = 0$ bei den Gleichfehlerraten wieder eine eindeutige Identifizierung aller Bilder möglich war. Offensichtlich wurden die geringfügig positiven Korrelationswerte der kamerafremden Bilder durch den Interpolationsprozess bei der Skalierung stärker unterdrückt, wodurch die kameraeigenen Rauschmuster besser zu bestimmen waren.

Kameramodell	EER (TIF-Ref. vs. JPG90)				EER (JPG90-Ref. vs. JPG90)			
	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
Canon EOS 20D	0	0	0	0.075	0	0	0	0.133
Canon EOS 300D	0	0	0	0.317	0.058	0	0	0.192

Tabelle 5: EER-Vergleich (volle Auflösung) mit komprimierten und skalierten Rauschmustern

Im zweiten Teil des Experimentes sollte das hypothetische Szenario um einen Zuschnitt der Bilder erweitert werden. Der Grund hierfür lag einerseits in der Tatsache, dass gerade im Internet viele Bilder neben einer skalierten und komprimierten Kopie oftmals nur einen Ausschnitt des ursprünglichen Bildes darstellen. Zum anderen bestand durch das Zuschneiden der Bilder auf eine definierte Größe die Möglichkeit auch das Seitenverhältnis zu beeinflussen, wodurch wiederum alle Bilder des Testfeldes miteinander verglichen werden konnten. Um zunächst nur den Einfluß eines Bildzuschnittes beurteilen zu können, sollten in einer ersten Testreihe alle Berechnungen mit unkomprimierten Bildern durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden alle unkomprimierten Bilder der Datenbasis auf eine Größe von 1712×1284 Pixel zugeschnitten, was einem Seitenverhältnis von 4 : 3 entspricht, und separat gespeichert. Die folgende Abbildung stellt ein Größenvergleich zwischen den nativen Auflösungen der jeweiligen Kameramodelle des Testfeldes und der Zuschnitte dar.

Darauf aufbauend wurden die Rauschmuster der Kameras wie in den vorhergehenden Experimenten aus den ersten 80 Bildern des jeweiligen Modells unter Verwendung der zugeschnittenen Bilder berechnet. Danach erfolgte die Korrelation der neuen Referenz-

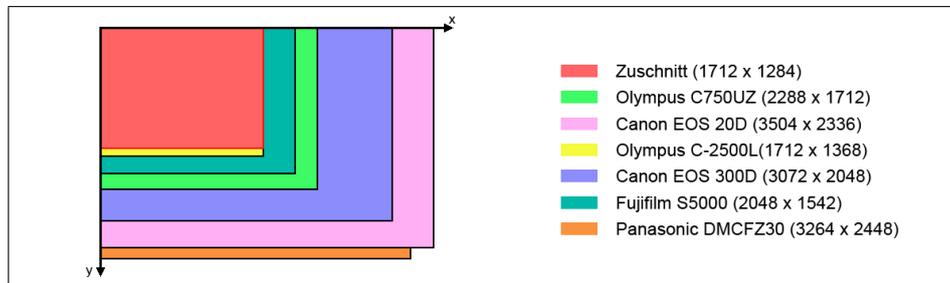


Abbildung 5: Vergleich der verschiedenen Bildgrößen

muster mit den Rauschmustern aus den pro Kamera verbliebenen 30 Bildern. Bei einer anschließenden Gegenüberstellung der Ergebnisgrafiken, wie bspw. von der in Abbildung 6 gezeigten *Canon EOS 20D*, konnte zwischen der Streuungswolke der Korrelationswerte aus den Berechnungen mit den zugeschnittenen Bildern (rechter Graph) und der Streuungswolke der Korrelationswerte aus den Berechnungen mit den vollaufgelösten Bildern (linker Graph) eine nur geringfügige Abweichung festgestellt werden. Mit einem maximalen Wert von 0.02 gab es beim Vergleich der Korrelationsgrafiken über alle Kameras des Testfeldes höchstens eine leichte Verschiebung der oberen bzw. unteren Korrelationsgrenzen. Der Versuch schloss mit der Erkenntnis, dass eine Reduzierung der Pixelanzahl durch das Beschneiden der Bilder auf ca. 2.2 Mio. Pixel, was bei der *Canon EOS 20D* etwa einem Viertel der Ausgangsfläche entspricht, keinen nennenswerten Einfluß auf den Identifizierungsalgorithmus hat. Die Charakteristik des Rauschmusters einer Kamera ist somit schon in Teilen eines Bildes vorhanden und kann zur Identifizierung beitragen. Damit war die Grundlage für den zweiten Teil des Experimentes geschaffen, in dem alle Bilder des Testfeldes miteinander verglichen werden sollten.

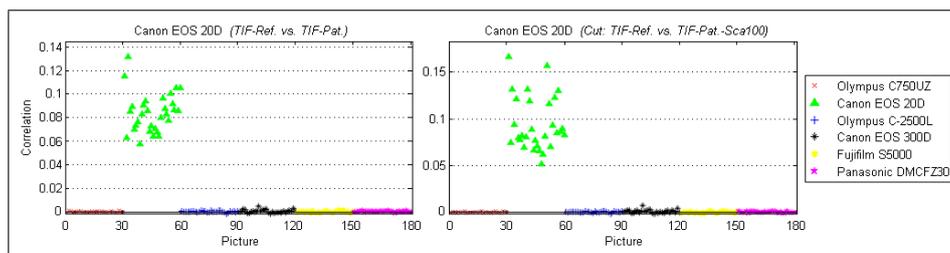


Abbildung 6: Vergleich der Korrelationen zwischen nativer und zugeschnittener Auflösung (*Canon EOS 20D*)

In Abhängigkeit von den gewonnenen Erkenntnissen wurden in einem weiteren Schritt alle unkomprimierten und zugeschnittenen Bilder mit den zuvor beschriebenen Parametern, d.h. einem Skalierungsfaktor von 0.75, 0.5 und 0.25 unter Verwendung der *Lanczos-Interpolation* und einer JPEG-Komprimierung in der Qualitätsstufe 90 mit dem Programm *XnView* separat gespeichert. Anschließend wurden die Referenzmuster aller Kameras sowohl aus 80 unkomprimierten als auch aus den komprimierten Bildausschnitten berechnet.

Diese wurden dann mit den Rauschmustern der verbliebenen 30 komprimierten Bilder korreliert. Wie bereits beim Test mit der *Canon EOS 20D* und der *Canon EOS 300D* stellte sich bei den Berechnungen der Gleichfehlerraten bis zu einem Skalierungsfaktor von 0.5 unter Verwendung des unkomprimierten Referenzmusters ein Wert von $EER = 0$ ein, wobei ein Skalierungsfaktor von 0.25 eine Überschneidung der Korrelationswerte bewirkte und eine Gleichfehlerrate von $EER \neq 0$ implizierte. Auch bei den Berechnungen mit den komprimierten Referenzmustern zeigten sich ähnliche Ergebnisse wie in Tabelle 5. Mit einer Skalierung der Bildausschnitte auf 100% konnte lediglich bei 3 Kameramodellen eine eindeutige Identifizierung für alle Bilder durchgeführt werden. Dabei erhöhte sich die Anzahl der Kameras mit einer berechneten Gleichfehlerrate von $EER = 0$ unter Verwendung der Rauschmuster mit einem Skalierungsfaktor von 0.5 und 0.75 deutlich auf 5 bzw. sogar alle 6 Modelle. Alle Ergebnisse dieser Berechnungen sind in nachstehender Tabelle 6 gegenübergestellt.

Kameramodell	EER (TIF-Ref. vs. JPG90)				EER (JPG90-Ref. vs. JPG90)			
	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
Canon EOS 20D	0	0	0	0.143	0	0	0	0.167
Canon EOS 300D	0	0	0	0.288	0.06	0	0.01	0.213
Fujifilm S5000	0	0	0	0.027	0	0	0	0.006
Olympus C-750 UZ	0	0	0	0.238	0.011	0	0	0.162
Olympus C-2500L	0	0	0	0.224	0	0	0	0.221
Panasonic DMC FZ30	0	0	0	0.272	0.013	0	0	0.274

Tabelle 6: EER-Vergleich (1712×1284 Ausschnitt) mit komprimierten und skalierten Rauschmustern

Dieses Experiment wurde mit den Resultaten beendet, dass der Identifizierungsalgorithmus nicht nur bei Bildausschnitten sondern auch bei skalierten Bildern bzw. Bildausschnitten erfolgreich angewandt werden kann. Darüber hinaus wurde deutlich, dass eine geringe Skalierung der Rauschmuster besonders unter Verwendung von JPEG-komprimierten Referenzmustern zu einer Verbesserung der Korrelationsergebnisse bzw. einer Erhöhung der Aussagewahrscheinlichkeit bezüglich der Kamerazugehörigkeit führt.

Weitere Details zu diesen Ergebnissen finden sich für ausgewählte Kameratypen im Anhang zu diesem Artikel.

6 Zusammenfassung

Das Verfahren aus [2] zur Kamera-Sensorforensik wurde einer genaueren experimentellen Analyse in zwei Implementierungsvarianten und auf Basis einer eigenen Datensammlung unterzogen. Abschließend lässt sich festhalten, dass die Verifikation eines Bildes im forensischen Sinne grundsätzlich durch die Rauschmusteranalyse von digitalen Bil-

dern durch das vorgestellte Verfahren durchführbar ist. Dabei zeigt das Verfahren sogar eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber bildverarbeitenden Maßnahmen, wie zum Beispiel das Zuschneiden, Skalieren und Komprimieren des zu untersuchenden Bildes. In dieser Hinsicht stützen unsere Beobachtungen die Erkenntnisse der Vorarbeiten. Unsere Untersuchungen hinsichtlich der Implementierungsvarianten zeigen allerdings auch, dass bei einer anwendungsnahen Implementierung sorgfältig auf die Rechengenauigkeit geachtet werden muss, da in unserem Fall die Ganzzahlimplementierung zu erheblich höheren Falscherkennungsraten führte. Für eine bessere Einstufung des Verfahrens hinsichtlich der statistischen Signifikanz der experimentellen Ergebnisse müssen jedoch weitere Experimente durchgeführt werden. Hierfür muss zunächst die Datenbasis erheblich ausgebaut werden. Ein erster, sehr vielversprechender Schritt in diese Richtung wurde in z.B. in [9] unternommen.

Danksagung Die Autoren bedanken sich bei der Arbeitsgruppe Multimedia und Security von Frau Prof. Jana Dittmann für die Unterstützung und die Bereitstellung der Implementierung in Ganzzahl-Arithmetik, programmiert von Herrn Maik Schott.

Literatur

- [1] Geschonneck, A.: *Computer-Forensik. Systemeinträge erkennen, ermitteln, aufklären*. dpunkt-Verlag, 2006.
- [2] Lukáš, J.; Fridrich, J.; Goljan, M.: Digital Camera Identification from Sensor Noise. *IEEE Trans. Information Security and Forensics*, 1 (2006) No. 2, pp. 205-214.
- [3] Goljan, M.; Fridrich, J.: Camera Identification from Scaled and Cropped Images, *Proc. SPIE, Electronic Imaging, Forensics, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents X*, San Jose, CA, January 26-31, 2008, pp. OE-1-OE-13.
- [4] Fridrich, J.: Digital Image Forensic Using Sensor Noise, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26, no. 2, March 2009, pp. 26-37.
- [5] Gloe, T.; Borowka, K.; Winkler, A.: Feature-Based Camera Model Identification Works in Practice – Results of a Comprehensive Evaluation Study, 11th Information Hiding, Darmstadt, Germany, June 7-10, 2009, erscheint in der Reihe LNCS.
- [6] Kun Qian: "Digital Camera Identification". Project Report, Otto-von-Guericke University Magdeburg, 2008
- [7] Rosenfeld. M.: Aspekte der Medienforensik - Signalverarbeitung von Meta- und Sensordaten zur Kameraindentifikation. M. Sc.-Arbeit, Fachhochschule Brandenburg 2009.
- [8] Gonzalez, R. C.; Eddins, S. L.; Woods, R. E.: *Digital Image Processing Using MATLAB*. Prentice Hall 2004.
- [9] Goljan, M.; Fridrich, J.; Filler, T.: Camera Identification - Large Scale Tests. *Proc. SPIE, Electronic Imaging, Security and Forensics of Multimedia Contents XI*, San Jose, CA (2009), pp. 0I 1-0I 12

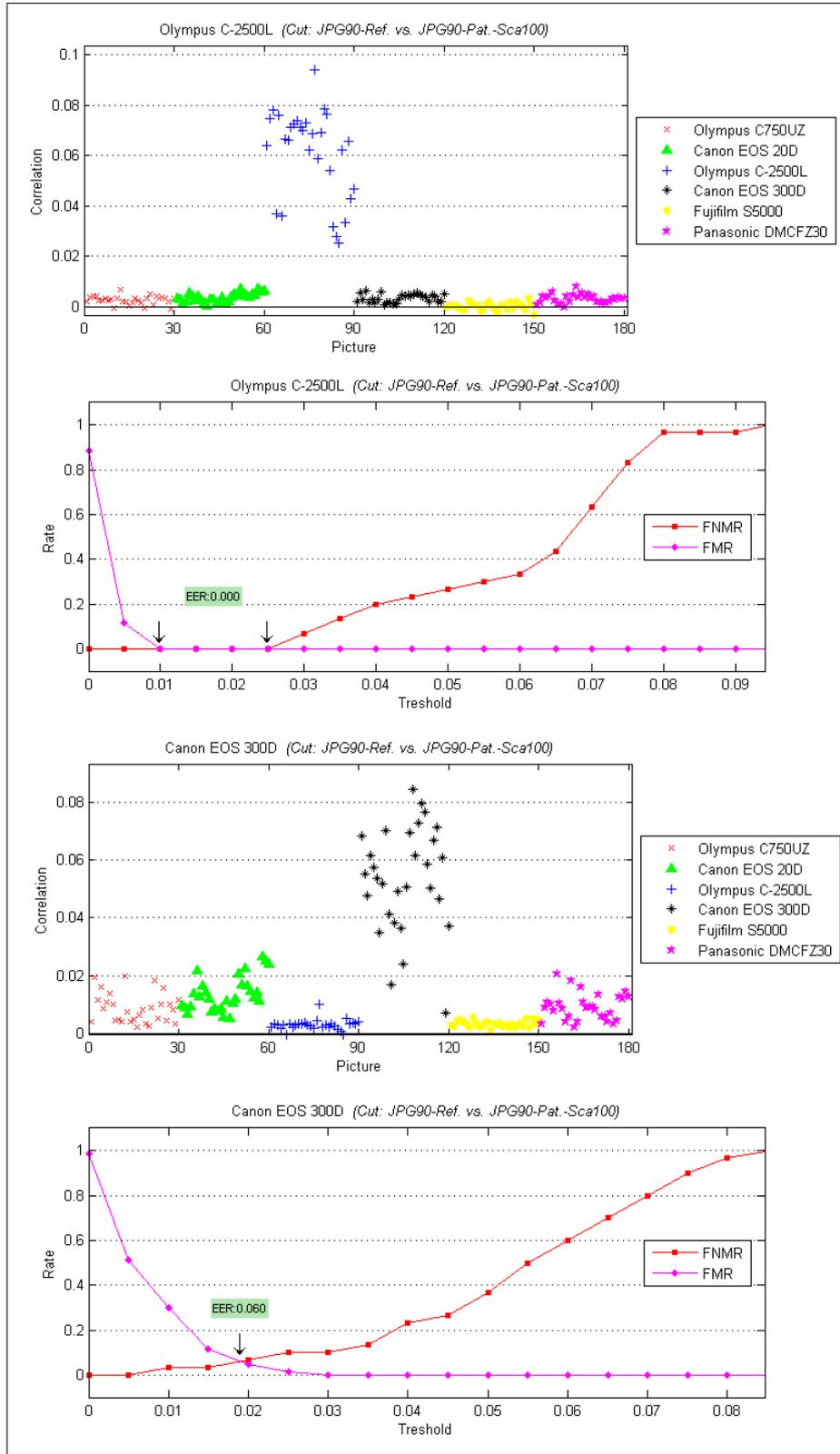


Abbildung 7: Olympus C-2500L / Canon EOS 300D - JPG90 vs. JPG90, 100%, Ausschnitt

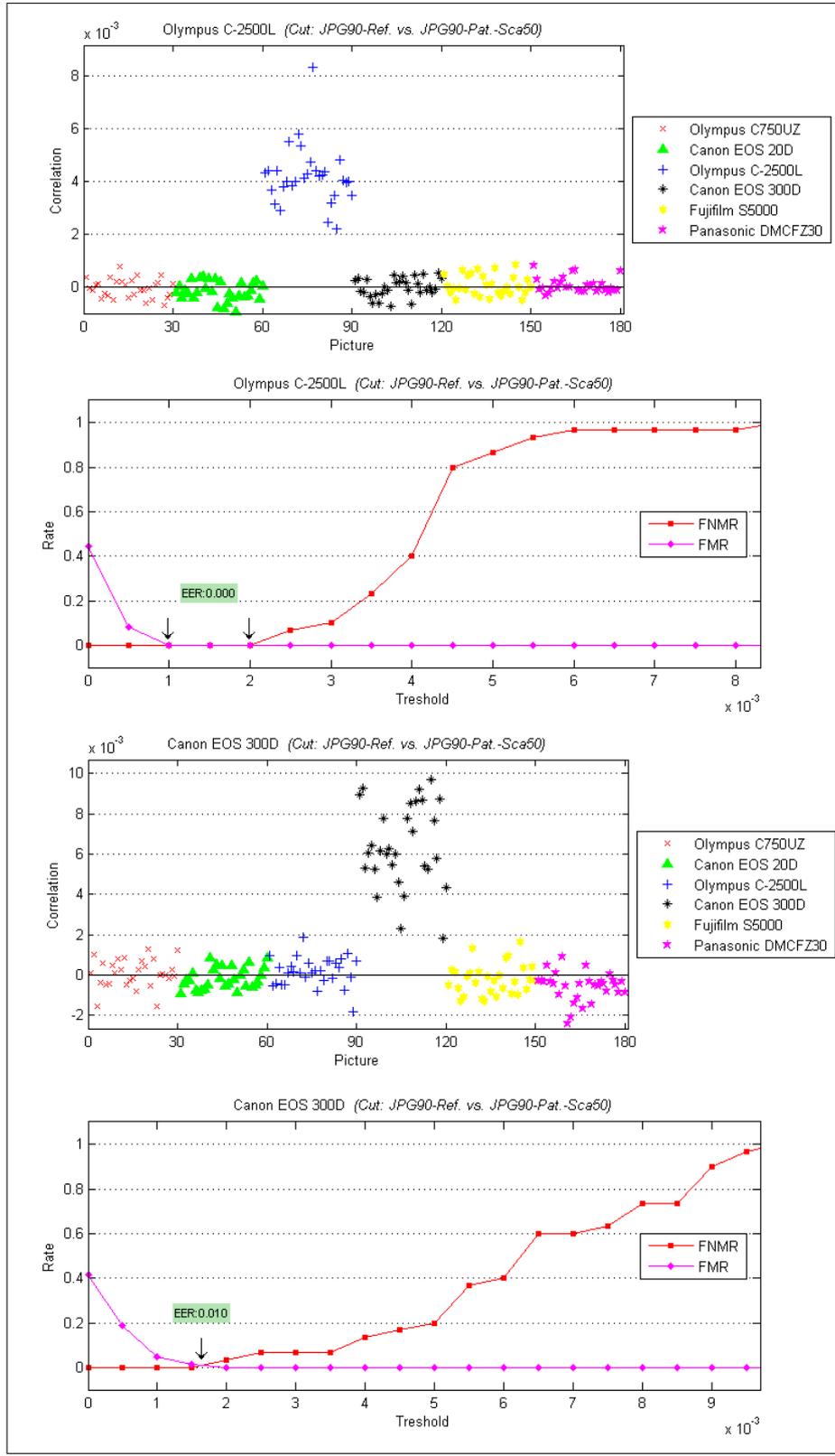


Abbildung 8: Olympus C-2500L / Canon EOS 300D - JPG90 vs. JPG90, 50%, Ausschnitt

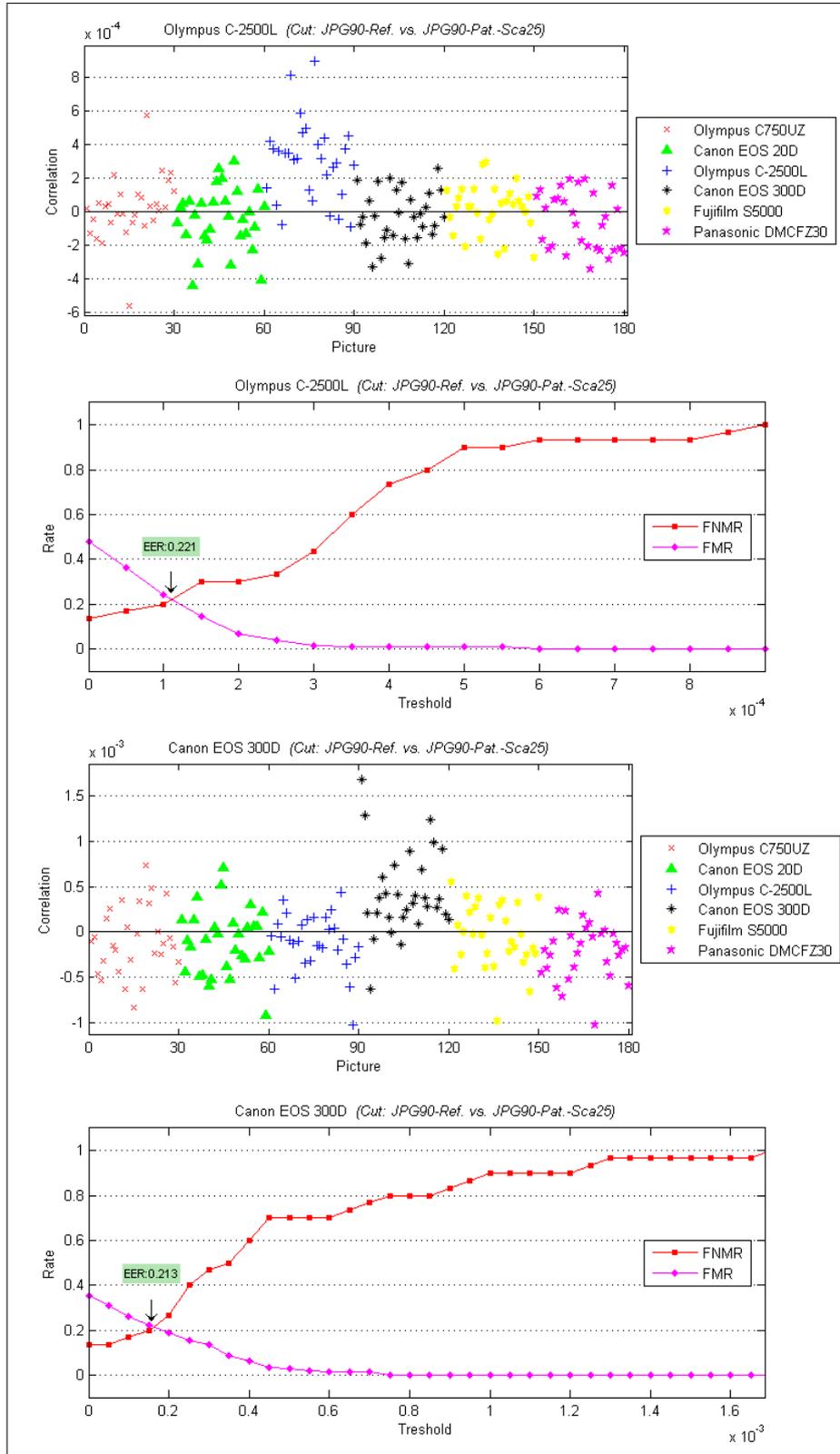


Abbildung 9: Olympus C-2500L / Canon EOS 300D - JPG90 vs. JPG90, 25%, Ausschnitt