

# Methoden für effektive Farbkodierung und zur Kompensation von Kontrasteffekten<sup>1</sup>

Sebastian Mittelstädt<sup>2</sup>

**Abstract:** Farbe ist eine der effektivsten visuellen Variablen, um Informationen zu kodieren. Jedoch ist die Effektivität von Farbkodierungen nicht hinreichend definiert, was zu kontroversen Ergebnissen und Richtlinien für Farbkodierungen geführt hat. Um diese Lücke zu schließen, führt die Dissertation [Mi15a] eine neue Definition von Effektivität für Farbkodierungen ein und legt dar, dass die Effektivität einer Farbkodierung von der Analyseaufgabe abhängt. Mithilfe existierender Richtlinien können effektive Farbkodierungen nur für einzelne elementare Analyseaufgaben erstellt werden. Diese reichen jedoch nicht für reale Anwendungen aus und müssen kombiniert werden. Aus diesem Grund, werden neue Qualitätsmaße, Richtlinien und Methoden in der Dissertation [Mi15a] vorgestellt, um Farbkodierungen für kombinierte Analyseaufgaben zu erstellen. Des Weiteren werden Werkzeuge bereitgestellt, die Experten und Einsteiger durch die Erstellung effektiver Farbkodierungen leiten. Der Experte kann so seine Erfahrungen einfließen lassen, um damit die Farbkodierung an die Anwendung, Kultur und Vorlieben seiner Nutzer anzupassen. Gleichgültig wie effektiv eine Farbkodierung ist, optische Illusionen können den Nutzer negativ in seiner Analyse beeinflussen. Zum Beispiel bewirken Kontrasteffekte, dass Pixel auf dunklen Hintergründen heller wirken und auf hellen Hintergründen dunkler. Diese Effekte verzerren die Wahrnehmung der kodierten Daten signifikant. Aus diesem Grund stellt die Dissertation [Mi15a] die erste Methodologie und erste Methoden vor, um physiologische Illusionen wie Kontrasteffekte zu kompensieren. Die Methodologie nutzt neue Wahrnehmungsmodelle und Metriken, die auf den individuellen Nutzer angepasst werden können. Durch Experimente kann gezeigt werden, dass die Methode die Genauigkeit von Menschen verdoppelt, die Werte mittels Farbe ablesen und vergleichen. Des Weiteren wird vorgestellt, wie Kontrasteffekte genutzt werden können, um Informationen zu kodieren und Visualisierung anzureichern. Einerseits um wichtige Informationen visuell hervorzuheben, andererseits um die Lesbarkeit von hoch-frequenten Visualisierungen wie Netzwerken zu verbessern. Alle vorgestellten Methoden können auf jedes Bild und auf jede Visualisierung angewendet werden, ohne sie an die Visualisierungen anpassen zu müssen. Aus diesem Grund kann die Effektivität der Methoden an Beispielen und Fallstudien aus verschiedenen Domänen in der Dissertation [Mi15a] demonstriert werden.

## 1 Einführung und Motivation

“Wie können wir Information mittels Farbe *effektiv* darstellen?”, ist die zentrale Frage der Dissertation [Mi15a]. Die Antworten zu dieser Frage bilden die wissenschaftlichen Beiträge: 1) eine neuartige *Definition* von Effektivität und neuartige *Qualitätsmaße* für Farbkodierungen; 2) neuartige *Richtlinien und Methoden* zur effektiven Kodierung von Information mittels Farbe; und 3) neuartige *Methoden*, die sicherstellen, dass der *individuelle* Nutzer die farbkodierte Information effektiv *wahrnimmt, ohne von Wahrnehmungseffekten wie Kontrasteffekten* (Abb. 1) fehlgeleitet zu werden.

---

<sup>1</sup> Englischer Titel: “Methods for Effective Color Encoding and the Compensation of Contrast Effects”

<sup>2</sup> Universität Konstanz, mittelstaedt.sebastian@web.de

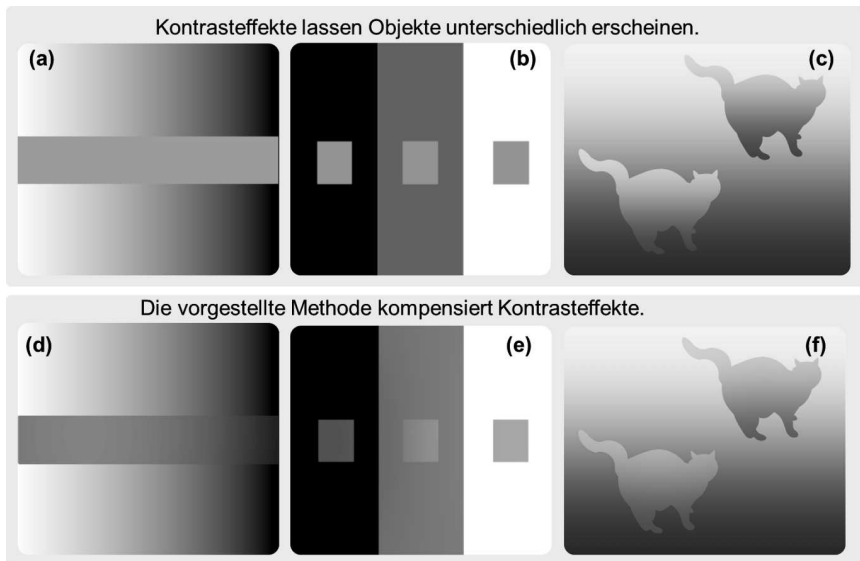


Abb. 1: Beispiele für Kontrasteffekte und deren Kompensation [MSK14]. Die Rechtecke in (a), (b), sowie die Katzen in (c), enthalten dasselbe grau bzw. denselben Farbgradienten. Sie wirken durch ihre Umgebung jedoch unterschiedlich. In Datenvisualisierung bedeutet dies, dass gleiche Datenwerte unterschiedlich und damit fehlerhaft wahrgenommen werden. In (d), (e) und (f) sind diese Effekte durch die vorgestellte Methode kompensiert.

“Effektivität” ist daher von großer Bedeutung für diese Arbeit. Um zu verstehen, warum wir Farbe für die Darstellung von Information nutzen und was “Effektivität” in diesem Kontext bedeutet, muss geklärt werden, wofür und wann visuelle Analyse eingesetzt wird.

## 1.1 Visuelle Datenanalyse

Datenanalyse allgemein hat das Ziel, Wissen aus Daten zu generieren. Eng verwandte Forschungsfelder wie Statistik und Data Mining stellen automatische Methoden bereit, um große und komplexe Datenmengen zu analysieren.

Diese automatischen Methoden sind sehr effektiv, wenn bekannt ist, *was* oder *welche Art* von Zusammenhängen untersucht werden soll und/oder Probleme präzise formuliert werden können [Fe08]. Besonders bei der explorativen Datenanalyse ist dies jedoch nicht gegeben, weil der Analyst sich schlecht oder vage definierten Problemen stellen muss. Automatische Methoden — allein — führen in diesen Szenarien nicht zu den erforderlichen Ergebnissen, da ihnen Flexibilität, Kreativität und Welt- oder Expertenwissen fehlt, um unklare Fragen zu beantworten und Unerwartetes in den Daten zu entdecken. Aus diesem Grund werden Interaktionen und das Wissen des Menschen benötigt.

Visuelle Datenanalyse und besonders Visual Analytics haben das Ziel, automatische Methoden, ohne die eine Analyse/Exploration von großen und komplexen Datenmengen un-

möglich wäre, mit interaktiven Visualisierungen zu kombinieren. Diese Methodik nutzt unsere effiziente Wahrnehmung, sowie unsere Fähigkeit unerwartete Muster in visualisierten Daten zu erkennen, indem sie den Menschen in den Analyseprozess integriert. So kann der Mensch sein Wissen und seine Kreativität nutzen, um automatische Methoden an die Daten oder sich verändernde Fragestellungen, während des Analyseprozesses, anzupassen.

## 1.2 Farbe als visuelle Variable

Farbe ist eine der wichtigsten und effektivsten visuellen Variablen. Sie kann mit jeder anderen visuellen Variable kombiniert werden, um Datenvisualisierungen anzureichern, ohne dabei wertvollen Platz im Display zu benötigen. Sie ermöglicht damit hoch skalierbare Visualisierungen (Abb. 2). Die Fähigkeit des menschlichen Auges, große Mengen an Farben auf den ersten Ebenen visueller Wahrnehmung zu unterscheiden, bildet die Basis der Erkennung von visuellen Mustern. Unser Auge verstärkt Kontraste zur Detektion von Ecken und zur Gruppierung von gefärbten Flächen, um Texturen, Formen und Objekte zu erkennen. Aus diesem Grund ist die Unterscheidung und Gruppierung von Objekten mittels Farbe und Position viel effizienter als mit anderen visuellen Variablen. Die Wahrnehmung von Farbe geschieht über orthogonale Kanäle, die für die Kodierung von Information genutzt werden können, z.B. kategorische Information mittels des Farbwinkels (rot, grün, blau) und quantitative Information mittels Sättigung und Helligkeit. Des Weiteren bietet unsere Farbwahrnehmung einen metrischen Raum, mit dem wir Farben und damit kodierte Daten vergleichen können, z.B. ist violett ähnlicher zu blau als zu grün. Mit diesen Kanälen und Eigenschaften ist Farbe eine der wenigen elementaren visuellen Variablen, die für komplexe Datentypen und Analyseaufgaben *gestaltet* werden können.

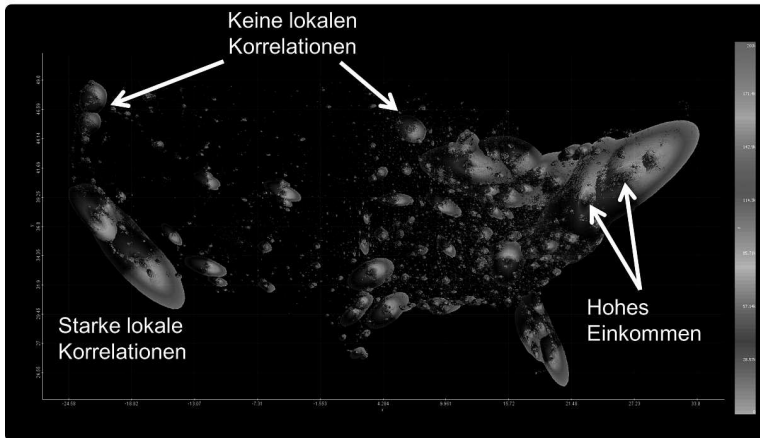


Abb. 2: Überlappungs-freies Streudiagramm [Ja13] von 300.000 Datenpunkten (x/y: Koordinaten, Farbe: Einkommen USA). Überlappende Punkte werden in ellipsoider Form auf freie Pixel verteilt, sodass lokale Korrelationen sichtbar werden und Farbe als dritte Dimension verwendet werden kann.

Genau wegen dieser Möglichkeit und ihrer Komplexität, ist die Farbwahrnehmung eine der Kernforschungsthemen der Informationsvisualisierung und es existieren viele offene Fragen "wie man Information mittels Farbe *effektiv* darstellen kann".

## 2 Stand der Technik

Es existieren viele Richtlinien zur Farbkodierung von Information (Abb. 3). Jedoch stehen manche im klaren Gegensatz zu anderen und wichtige Ergebnisse psychologischer Studien werden im derzeitigen Stand der Technik für Farbkodierung nicht einbezogen. Eine Gruppe von Forschern hat beispielsweise das Ziel, möglichst *expressive* Farbskalen zu gestalten. D.h. sie enthalten möglichst *viele* unterscheidbare Farben, um möglichst *viele* Datenwerte zu kodieren. Diese Forscher können belegen, dass diese Skalen (Multi-Hue) sehr effektiv für ihre Analyseaufgaben sind.

Eine andere Gruppe beschreibt jedoch, dass diese Farbskalen (besonders die obige Regenbogenskala) den Analysten fehlleiten, da sie nicht *perzeptuell linear* (d.h. mit kontinuierlicher perzeptueller Größenordnung) gestaltet sind. Es kann in Studien klar gezeigt werden, dass wir, anhand des Farbwinkels, Farben nicht ordnen können [Wa12]. Die Darstellung von quantitativer Information benötigt jedoch die akkurate Darstellung von Ordnungen und Größen. Daraus kann gefolgert werden, dass Farbskalen, die mehrere Farbwinkel enthalten, nicht für die Kodierung quantitativer Information genutzt werden sollten. Eriksen und Hake [EH55] sowie Ware [Wa88] führten perzeptuelle Experimente durch, bei denen Teilnehmer quantitative Daten anhand von Farbskalen ablesen sollten. Entgegen der derzeitigen Sichtweise kamen beide Arbeiten zu dem Ergebnis, dass die Teilnehmer mit der Regenbogenskala sogar signifikant genauer waren, als mit perzeptuell linearen Farbskalen.

Der Grund liegt darin, dass die Teilnehmer, in den Experimenten, Datenwerte nicht *vergleichen*, sondern *identifiziert* (abgelesen) haben. Für diese Analyseaufgabe ist keine akkurate Wahrnehmung von Ordnung und Größen erforderlich, jedoch eine akkurate Bestimmung der abzulesenden Farbe. Deshalb definiert die Dissertation [Mi15a], dass die *Effektivität von Farbkodierung von der Analyseaufgabe abhängt*, die mittels Farbe durchgeführt werden soll. Mit dieser Definition kann die Kontroverse des Forschungsfeldes aufgelöst und gegensätzliche Richtlinien zusammengeführt werden.

Manche Probleme lassen sich jedoch nicht durch Gestaltung von Farbkodierungen lösen. Eines der grundlegenden und ungelösten Probleme der Informationsvisualisierung ist der

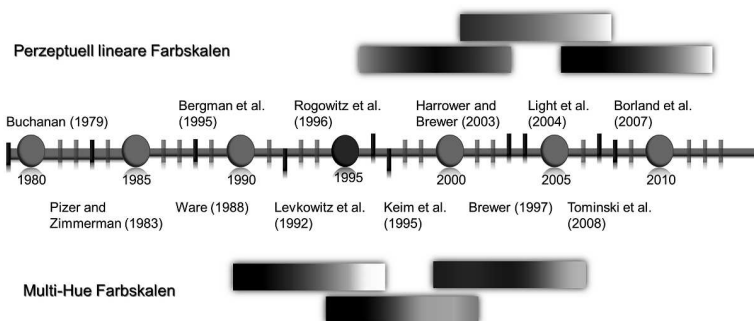


Abb. 3: Auszug der Forschung zur Farbkodierung von Information. Zwei Gruppen stellen gegensätzliche Richtlinien und Ziele zur Gestaltung von Farbskalen bereit.

Einfluss von physiologischen Effekten (wie Kontrasteffekte) [Wa12]. Wie ein farbkodiertes Objekt in der Visualisierung vom Analysten wahrgenommen wird, hängt von der Umgebung des Objektes ab. So erscheinen die Rechtecke und Katzen in Abb. 1 unterschiedlich, obwohl die identisch sind. Ware [Wa88] konnte zeigen, dass diese Kontrasteffekte den Analysten beim Ablesen von farbkodierten Datenwerten um bis zu 20% fehlleiteten. Er schlägt vor, dass Farbkodierungen für quantitative Daten viele Farbwinkelwechsel enthalten sollten, um Kontrasteffekte zu vermeiden. Brewer [Br96] erstellte ein Wahrnehmungsmodell zur Vorhersage von Kontrasteffekten. Dieses Modell dient der Erstellung von wenigen Farben, die sich nur mit geringer Wahrscheinlichkeit durch Kontrasteffekte aufeinander auswirken. Beide Methoden lösen das Problem nicht generell, weil sie die Wahrnehmung der gesamten Visualisierungen nicht einbeziehen und nur die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von Kontrasteffekten (und nicht deren Kompensation) bewirken.

Die Dissertation [Mi15a] stellt eine generelle Lösung für dieses Problem vor. Es werden Methoden bereitgestellt, die erfassen, wie der *individuelle* Nutzer eine Datenvisualisierung wahrnimmt. Diese Wahrnehmungsmodelle werden genutzt, um *physiologische Effekte* (wie Kontrasteffekte) in einem Optimierungsprozess *automatisch zu kompensieren oder zu nutzen*, um die Effektivität von Visualisierungen sicherzustellen.

### 3 Wissenschaftliche Beiträge

#### 3.1 Anforderungen, Richtlinien und Methoden zur Gestaltung von effektiven Farbkodierungen

Durch die neue Definition von *Effektivität* stellt sich heraus, dass ein Unterschied in der Kodierung einzelner Datendimensionen (elementare Analyseaufgaben) und der Kodierung von mehrdimensionalen Datenrelationen (synoptische Analyseaufgaben) besteht, wodurch das Kapitel 2 der Dissertation [Mi15a] in zwei Teile gliedert ist.

Der erste Teil analysiert die Grundlagen menschlicher Farbwahrnehmung für die Kodierung von Information einzelner Datendimensionen. Mit dem Stand der Technik ist es möglich, Farbskalen für einzelne *elementare* Analyseaufgaben zu erzeugen, was für reale Anwendungen nicht ausreicht. Diese erfordern typischerweise eine Kombination von elementaren Analyseaufgaben. Deswegen stellt die Dissertation [Mi15a] neue Anforderungen und konkrete Qualitätsmaße vor, mit denen die Effektivität von Farbskalen anhand realer Analyseaufgabe gemessen werden kann. Auf Basis dieser Qualitätsmaße werden neuartige Richtlinien für die Gestaltung effektiver Farbskalen für einzelne Datendimensionen vorgestellt. Diese werden im Werkzeug *ColorCat* (Abb. 4) nutzbar gemacht, welches Visualisierungs-Experten in der Gestaltung von Farbskalen unterstützt. Der Experte kann seine Erfahrung und Expertise einfließen lassen, um die Skala an die Zieldomäne, den Nutzer (auch Farbenblinde), dessen Kultur und Präferenz anzupassen, wobei *ColorCat* durch Optimierung der Qualität (-smaße) sicherstellt, dass die Skala der Definition von Effektivität genügt.

Der zweite Teil des Kapitels betrachtet die Farbkodierung von mehrdimensionalen Relationen von Daten und stellt dazu für kombinierte synoptische Analyseaufgaben konkre-

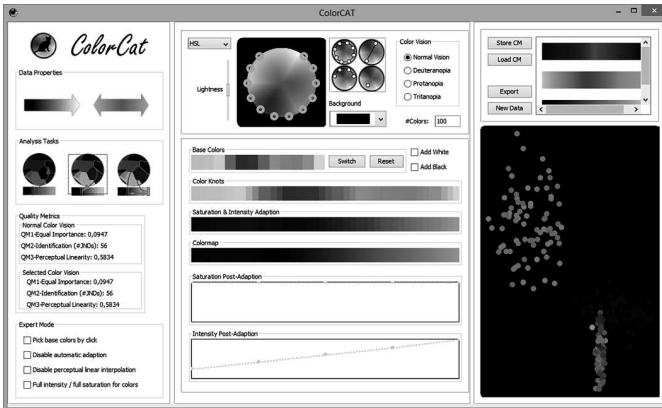


Abb. 4: Free-Software zur Erstellung von Farbskalen für reale (kombinierte) Analyseaufgaben [Mi15b]. Der Analyst kann die Skalen an die Domäne und den Nutzer (auch Farbenblinde) anpassen. Die Software stellt die Effektivität im Hintergrund sicher.

te Qualitätsmaße bereit. Mittels dieser Maße wird ein neuartiger Optimierungsalgorithmus vorgestellt, der mehrdimensionale Relationen von Daten in perzeptuell uniforme Farbräume projiziert und dabei die Effektivität für kombinierte synoptische Analyseaufgaben maximiert [Mi14]. Eine quantitative Studie belegt, dass diese neue Methode den Stand der Technik übertrifft.

### 3.2 Methoden zur Kompensation von Kontrasteffekten

Es ist möglich die Wahrscheinlichkeit von Kontrasteffekten mittels dem Stand der Technik (s.o.) zu reduzieren. Allerdings konnte bisher keine generelle Lösung für diese Problematik gefunden werden.

Zur generellen Lösung dieses Problems stellt Kapitel 3 der Dissertation [Mi15a] eine Methodologie zur Kompensation von Kontrasteffekten vor (Abb. 5). Mittels existierender Wahrnehmungsmodelle [FJ04] kann bestimmt werden, wie ein Analyst eine Visualisierung wahrnimmt. Nach der Berechnung des wahrgenommenen Bildes wird der Einfluss von Kontrasteffekten mittels neuartiger Qualitätsmaße gemessen. Auf Basis dieser Maße

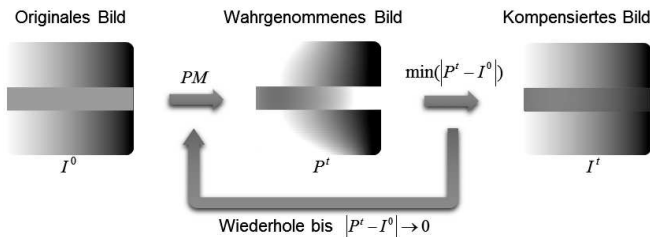


Abb. 5: Methodologie zur Kompensation von Kontrasteffekten [MSK14].

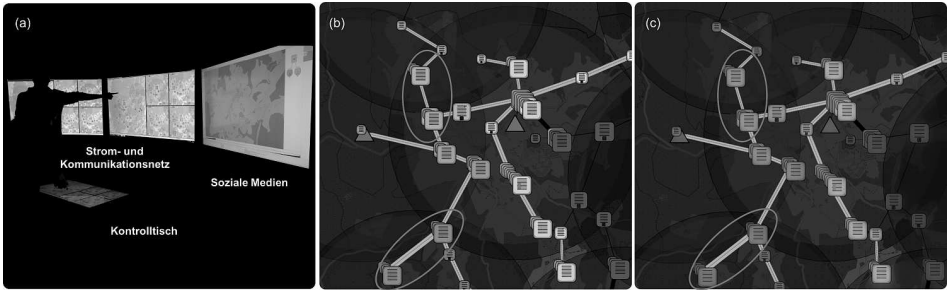


Abb. 6: (a) Kontrollraum zur Überwachung von kritischen Infrastrukturen (Stromnetz, Mobilfunknetz, soziale Medien) [Mi15c]. (b) Rechtecke visualisieren den Status von Transformatorstationen (grau-gelber Gradient: von Normal zu Warnung). Kontrasteffekte lassen die Situation zu kritisch wirken. (c) Kontrasteffekte werden innerhalb 360ms kompensiert [MK15].

kann die Kompensation von Kontrasteffekten als ein numerisches Optimierungsproblem definiert werden. Die vorgestellte Methode ist ein Gradient-basiertes Verfahren, das (ausgehend vom Originalbild) iterativ bessere Lösungen findet, bis ein Bild gefunden ist, in dem die Kontrasteffekte kompensiert sind und die Daten vom Analysten akkurat wahrgenommen werden. In zwei Experimenten mit 40 Teilnehmern kann gezeigt werden, dass die neue Methode die Genauigkeit der Teilnehmer beim Ablesen und Vergleich von farbkodierten Daten signifikant verbessert (verdoppelt).

### 3.3 Effizienter Algorithmus zur Kompensation von Kontrasteffekten und Methoden zur Personalisierung von Wahrnehmungsmodellen

Für interaktive Visualisierungen und interaktive Experimente, wie beispielsweise die Personalisierung von Wahrnehmungsmodellen, werden effiziente Algorithmen benötigt. Die oben beschriebene Originalmethode ist von kubischer Komplexität, was zu inakzeptablen Laufzeiten führt. Bei dem in Abb. 6 gezeigten Visualisierungssystem mit hoch-auflösenden 4K Displays beträgt die Laufzeit (trotz eines Hochleistungscomputers) 4 Minuten. Kapitel 4 der Dissertation [Mi15a] stellt einen Algorithmus vor, der (durch Ersatzmodelle und effiziente Optimierung) lineare Komplexität erreicht und durch massive Parallelisierung die Laufzeit in der Beispielanwendung auf 360ms reduziert. Diese effiziente Berechnung ermöglicht es, die Kompensation von Kontrasteffekten in interaktiven Visualisierungen anzuwenden. Im folgenden Teil wird dieser Algorithmus zur interaktiven Personalisierung von Wahrnehmungsmodellen genutzt.

Der Hauptbeitrag des Kapitels ist die Einführung von einem neuartigen Wahrnehmungsmodell (Abb. 7) und Methoden zur Erfassung von individuellen Unterschieden der Wahrnehmung von Farbe und Kontrasteffekten. Dies erlaubt die Anpassung der Kompensation von Kontrasteffekten an den individuellen Nutzer, sowie an unterschiedliche Umgebungseinflüsse, wie z.B. Bildschirm Distanz, Umgebungslicht und unterschiedliche Bildschirme. Ein Experiment zur Evaluation der personalisierten Kompensation von Kontrasteffekten zeigt, dass Personalisierung die Genauigkeit von Teilnehmern im Vergleich zum Originalmodell signifikant (um 29%) verbessert.

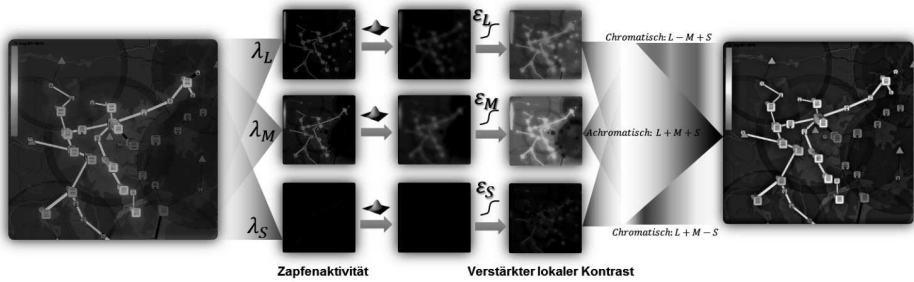


Abb. 7: Die Zapfen des menschlichen Auges nehmen rote, grüne und blaue Wellenlängen des Lichts wahr. Weitere Zellen bestimmen Zentrum bzw. Umgebung und führen eine lokale Verstärkung von Kontrasten durch (Kontrasteffekte). Im vorgestellten Modell kann die Verstärkung durch interaktive Methoden parametrisiert und damit personalisiert werden.

### 3.4 Methoden zur visuellen Hervorhebung wichtiger Information

Globalen Farbkodierungen, sowie die Methoden zur Kompensation von Kontrasteffekten, können nicht garantieren, dass wichtige Datenobjekte vom Analysten wahrgenommen werden können. Derzeitige Lösungen für dieses Problem benötigen entweder die Interaktion des Analysten [EDF11] oder verzerren den Wertebereich extrem [BGS07].

In Kapitel 5 der Dissertation [Mi15a] wird die visuelle Hervorhebung *unsichtbarer* Information als Optimierungsproblem mit gegensätzlichen Zielen definiert: einerseits sollen wichtige visuelle Strukturen lokal sichtbar gemacht, andererseits die Farbkodierung nur minimal verzerrt werden, um die globale (absolute) Vergleichbarkeit der Werte zu erhalten. Auf Basis dieser Zielvorgabe werden neuartige Methoden und Heuristiken zur Lösung dieses Problems vorgestellt. Die Methoden erhalten vom Visualisierungssystem die wichtigen Datenobjekte und deren Pixel-Koordinaten und fügen Farbkontraste ein, um die Sicht-

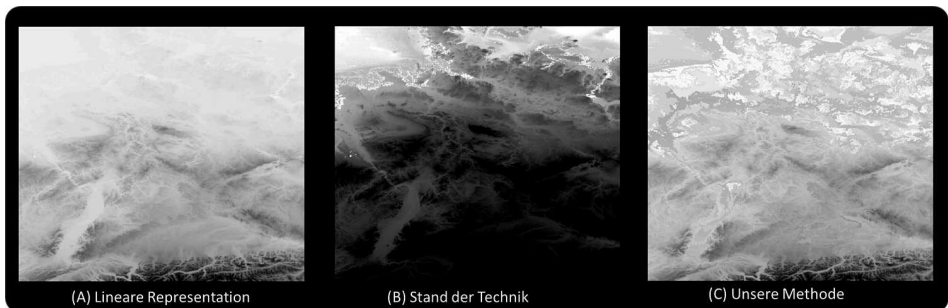


Abb. 8: (A) Die lineare Repräsentation einer Topographie. Die Strukturen im nördlichen Teil sind nicht sichtbar. (B) Der Wertebereich wird mittels der Methode von Bertini und Santucci [BGS07] so transformiert, dass möglichst viele Strukturen sichtbar werden. Jedoch verzerrt dies den Wertebereich extrem, sodass der Süden viel dunkler (niedriger) im Vergleich zum Norden erscheint. (C) macht alle Strukturen gerade sichtbar, ohne den Wertebereich global zu verzerren.



barkeit von wichtigen Datenobjekten zu optimieren. Zum Beispiel sind in Abb. 8 (A) 75% der lokalen Datenmuster nicht sichtbar. Die vorgestellte Methode macht 96% dieser lokalen Muster sichtbar, bei einer Verzerrung von nur 1.28%. Der Stand der Technik macht nur 47% der lokalen Muster sichtbar, bei einer Verzerrung von 25%.

## 4 Fazit

Die Dissertation [Mi15a] stellt sich der Herausforderung, Information mittels Farbe *effektiv* zu kodieren. Die Hauptbeiträge sind: 1) eine neue Definition und neuartige Qualitätsmaße zur Messung der *Effektivität* von Farbkodierungen; 2) neue Richtlinien, Methoden und Werkzeuge zur *effektiven* Farbkodierung für reale (kombinierte) Analyseaufgaben; 3) die erste generelle Lösung des Problems von Kontrasteffekten, durch eine Methodologie und Methode zur Kompensation von physiologischen Illusionen, die die Genauigkeit des Ablesens von Farbe verdoppelt; 4) Methoden zur Personalisierung von Wahrnehmungsmodellen und der Kompensationsmethoden, die nun auf den individuellen Nutzer und seine Umgebung (Bildschirm Abstand, Umgebungslicht) angepasst werden können und damit die Genauigkeit um weitere 29% erhöhen; 5) neue Methoden zur visuellen Hervorhebung wichtiger Information, um zu garantieren, dass der Analyst wichtige Information auch wahrnehmen kann.

Mittels der Richtlinien und Werkzeuge aus Kapitel 2 können effektive Farbkodierungen für die Zielanwendung, den Nutzer, dessen Kultur und Präferenz erzeugt werden. Die Methoden aus den restlichen Kapiteln optimieren die Effektivität der Visualisierung als Nachbearbeitungs-Schritt des Renderings. Damit bieten sie eine breite Anwendbarkeit, da sie auf jedes Bild und jede Datenvisualisierung anwendbar sind.

Abschließend diskutiert und präsentiert die Dissertation [Mi15a] neue, noch offene Fragen für zukünftige Forschung: Lassen sich komplexere (sogar kognitive) Illusionen kompensieren? Kann man auf Basis der Definition von Effektivität auch andere visuellen Variablen gestalten? Wie können wir Farbskalen für Farbenblinde personalisieren, die Farbwinkel individuell erlernt haben und unterschiedlich wahrnehmen? Wie können wir das intuitive Ablesen von Werten *ohne* Farbskala erreichen? Antworten für diese Fragen sind sehr herausfordernd, jedoch sind sie es Wert, gefunden zu werden.

## Literaturverzeichnis

- [BGS07] Bertini, E.; Girolamo, AD; Santucci, G.: See what you know: Analyzing data distribution to improve density map visualization. IEEE Symposium on Visualization (Eurographics 2007), 2007.
- [Br96] Brewer, Cynthia A: Prediction of simultaneous contrast between map colors with Hunt's model of color appearance. Color Research and Application, 21(3):221–235, 1996.
- [EDF11] Elmqvist, N.; Dragicevic, P.; Fekete, J.D.: Color lens: Adaptive color scale optimization for visual exploration. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 17(6), 2011.

- [EH55] Eriksen, Charles W.; Hake, Harold W.: Multidimensional stimulus differences and accuracy of discrimination. *Journal of Experimental Psychology*, 50(3):153, 1955.
- [Fe08] Fekete, Jean-Daniel; Van Wijk, Jarke J; Stasko, John T; North, Chris: The value of information visualization. In: *Information visualization*, S. 1–18. Springer, 2008.
- [FJ04] Fairchild, Mark D; Johnson, Garrett M: iCAM framework for image appearance, differences, and quality. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1):126–138, 2004.
- [Ja13] Janetzko, Halldór; Hao, Ming C.; Mittelstädt, Sebastian; Dayal, Umeshwar; Keim, Daniel A.: Enhancing Scatter Plots Using Ellipsoid Pixel Placement and Shading. In: *Proceedings of the 46th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE Computer Society, S. 1522–1531, Januar 2013.
- [Mi14] Mittelstädt, Sebastian; Bernard, Jürgen; Schreck, Tobias; Steiger, Martin; Kohlhammer, Jörn; Keim, Daniel A.: Revisiting Perceptually Optimized Color Mapping for High-Dimensional Data Analysis. In *Proceedings of the Eurographics Conference on Visualization*, S. 91–95, 2014.
- [Mi15a] Mittelstädt, Sebastian: *Methods for Effective Color Encoding and the Compensation of Contrast Effects*. PhD Thesis, University of Konstanz, 2015.
- [Mi15b] Mittelstädt, Sebastian; Jäckle, Dominik; Stoffel, Florian; Keim, Daniel A.: ColorCAT: Guided Design of Colormaps for Combined Analysis Tasks. In: *Proceedings of the Eurographics Conference on Visualization (EuroVis 2015)*. The Eurographics Association, S. 115–119, 2015.
- [Mi15c] Mittelstädt, Sebastian; Wang, Xiaoyu; Eaglin, Todd; Thom, Dennis; Keim, Daniel; Toluone, William; Ribarsky, William: An Integrated In-Situ Approach to Impacts from Natural Disasters on Critical Infrastructures. In: *Proceedings of the 48th Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE, S. 1118–1127, 2015.
- [MK15] Mittelstädt, Sebastian; Keim, Daniel A.: Efficient Contrast Effect Compensation with Personalized Perception Models. *Computer Graphics Forum*, 34(3):211–220, 2015.
- [MSK14] Mittelstädt, Sebastian; Stoffel, Andreas; Keim, Daniel A.: Methods for Compensating Contrast Effects in Information Visualization. *Computer Graphics Forum*, 33(3):231–240, 2014.
- [Wa88] Ware, Colin: Color sequences for univariate maps: Theory, experiments and principles. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 8(5):41–49, 1988.
- [Wa12] Ware, Colin: *Information visualization: perception for design*. Elsevier, 2012.



**Sebastian Mittelstädt** erlangte 2009 den B. Eng. (Informationstechnik) an der DHBW Heidenheim. Danach vertiefte er sich in Datenanalyse und Visualisierung an der Universität Konstanz. Er wurde 2010 als Master Research Student bzw. 2011 als Doktorand im Graduiertenkolleg zur “Explorativen Analyse und Visualisierung großer Datenräume” und als Mitarbeiter der Gruppe von Prof. Dr. Daniel A. Keim aufgenommen. Er erlangte dort 2011 den M. Sc. (Information Engineering) und 2015 den Dr. rer. nat. für seine Dissertation und Publikationen im Forschungsfeld der Informationsvisualisierung und Visual Analytics.