Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

Meteorologisches Institut

Technische Dokumentation

Verwendung der Kamera VIVOTEK FE8174V als Wolkenkamera

Stand: 13. Februar 2025

Ingo Lange, Universität Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1 Kamerabild **2**

2 Einnordung **2**

3 Nivellierung **3**

4 Koordinatentransformation **4**
4.1 Korrektur des Höhenwinkels 4
4.2 Bild zu Hemisphäre 6
4.3 Hemisphäre zu Bild 6

5 Verdrehungen **7**
5.1 Drehmatrix 7
5.2 Euler-Winkel 10
5.3 Beispiel 12

6 Verzerrungen **15**
6.1 Abstände/Winkel 15
6.2 Flächen/Raumwinkel 16
6.3 Projektion auf Wolkenebene (Entzerrung) 17

7 Wolkenerkennung **18**
7.1 Algorithmus 1 (veraltet) 19
7.2 Algorithmus 2 (veraltet) 21
7.3 Algorithmus 3 22
7.4 Blaue Stunde 25
7.5 Bedeckungsgrad 25

8 Kameraeinstellungen **27**
8.1 Allgemein . . . 27
8.2 Weißabgleich . . . 28
8.3 Weitere Bildeinstellungen . . . 29
8.4 Layout . . . 30
8.5 Sicherheit . . . 31

9 Montage **31**
9.1 Aufbau . . . 31
9.2 Werkzeug . . . 32
9.3 Anschluss . . . 32
9.4 Software . . . 33
9.5 Austausch der Haube . . . 33

1 Kamerabild

Die Kamera liefert Bilder als Rastergrafiken (Bitmaps) im JPEG-Format. Die Bilder sind quadratisch mit einer Kantenlänge von 1920 Pixeln (px). Ein Bild besteht also insgesamt aus

$$(1920 \times 1920)\ \text{px} = 3\,686\,400\ \text{px} = 3600\ \text{kpx} \approx 3{,}52\ \text{Mpx}\,.$$

Die Einheit Pixel (px) wird im Folgenden sowohl für die Anzahl Bildpunkte als auch für Längen und Abstände auf dem Bild verwendet. 1 Pixel ist quadratisch und hat die Kantenlänge 1 px.

Das Pixel in der linken oberen Ecke hat die Koordinaten $(0, 0)$. Die x-Achse läuft nach rechts, die y-Achse nach unten[1]. Das Pixel in der rechten oberen Ecke hat demnach die Koordinaten $(1919, 0)$, das in der linken unteren Ecke $(0, 1919)$ und das in der rechten unteren Ecke $(1919, 1919)$.

Da die Bildkanten aus einer geraden Anzahl Pixeln bestehen, gibt es in der Mitte des Bildes kein Pixel. Die Mitte bilden vielmehr die vier Pixel mit den Koordinaten $(959, 959)$, $(960, 959)$, $(959, 960)$ und $(960, 960)$.

In einer Sub-Pixel-Betrachtung auf der x-y-Ebene gibt (x, y) die Koordinaten der linken oberen Ecke eines Pixels an. x und y sind hier reelle Zahlen, jeweils im Bereich von 0 bis 1920. Die Mitte des Bildes liegt dann im Punkt $(960, 960)$.

2 Einnordung

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf Bilder einer eingenordeten Kamera, d. h. die Kamera sei so montiert, dass die Nord-Markierung auf dem Gehäuse nach Norden zeigt. Der Bild-Azimutwinkel $\alpha = 0°$ (Bild-Nord) weist dann auch in die wahre Nordrichtung. Bild-Nord ist im Gegensatz zu normalen Karten unten!

Zeigt die Nord-Markierung nicht nach 0°, sondern nach ζ, so ist der wahre Azimutwinkel

$$\alpha_\text{w} = \alpha + \zeta\,,$$

[1] x und y bilden ein Linkssystem.

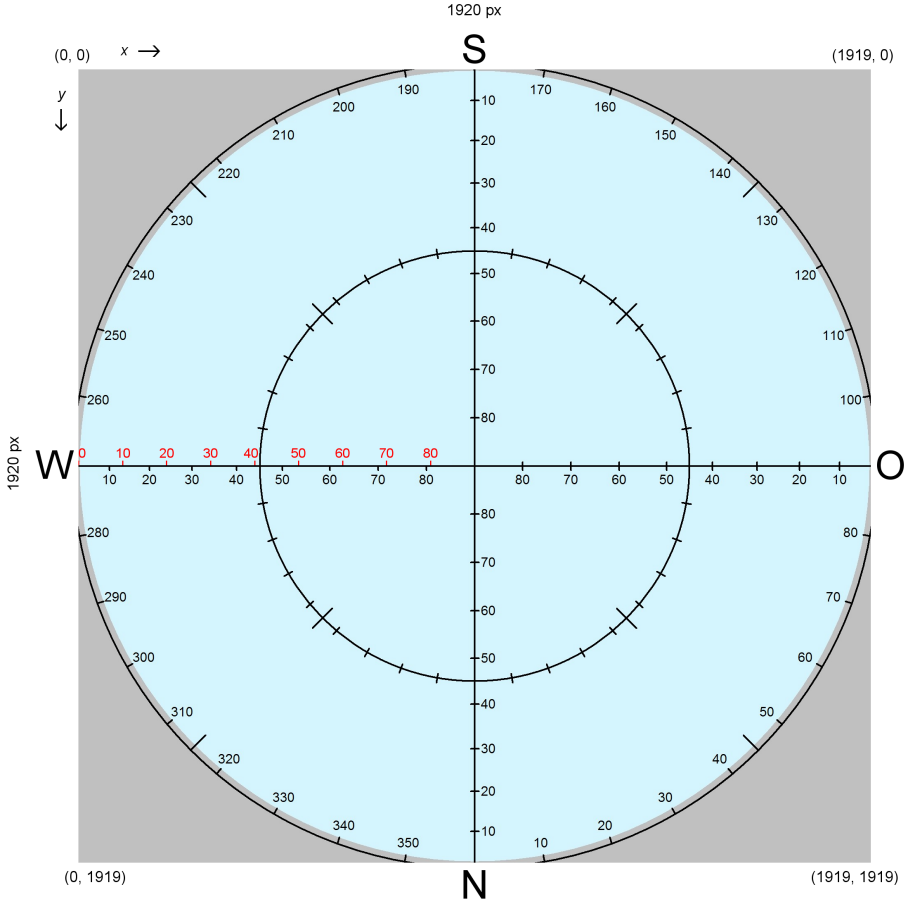


Abbildung 1: Quadratische Bilddatei mit rundem Abbild der oberen Hemisphäre (blau). Die schwarzen Koordinaten bezeichnen Azimut und Höhenwinkel eines Punktes am Himmel. Die roten Höhenwinkel bezeichnen die ideale äquidistante Projektion, die jedoch etwas von der wahren Projektion abweicht. Die Bild- oder Pixelkoordinaten x und y haben ihren Ursprung oben links.

der Bild-Azimutwinkel entsprechend

$$\alpha = \alpha_{\mathrm{w}} - \zeta \,.$$

Achtung: Die Wolkenkamera am **Wettermast Hamburg** ist aus optischen Gründen nach Süden ausgerichtet. Dort ist also $\zeta = 180°$.

Ist die Kamera nicht genau eingenordet, so kann man mit Hilfe der Sonne eine Transformation bestimmen, die die nachträgliche Einnordung der Bilder ermöglicht (Abschnitt 5).

3 Nivellierung

Es wird davon ausgegangen, dass die Kamera waagerecht ausgerichtet ist, d. h. der Zenit liegt in der Mitte des Bildes bzw. der Horizont am äußeren Bildrand.

Ist die Kamera nicht genau nivelliert, so kann man mit Hilfe der Sonne eine Transformation bestimmen, die die nachträgliche Nivellierung der Bilder ermöglicht (Abschnitt 5).

4 Koordinatentransformation

Die Optik der Kamera bildet den darüber liegenden Halbraum (Hemisphäre) *ungefähr* in einer linear geteilten (äquidistanten) Projektion auf die Bildebene ab. Das bedeutet im Wesentlichen, dass der Azimut erhalten bleibt und der Zenitwinkel proportional zum Abstand von der Bildmitte ist.

Die wahre Projektion weicht jedoch von diesem Ideal ab. Eine Vermessung der Kamera hat ergeben, dass der wahre Höhenwinkel über den gesamten Wertebereich hinweg durchweg größer ist als der aus der idealen Projektion bestimmte. Nur am Zenit (Bildmitte) stimmen beide natürlich überein. Die Abweichung beträgt am Horizont etwa 1° bis 2°, über weite Strecken bis zu 5° (Abb. 3). Für viele Anwendungen sind diese Abweichungen zu groß, der Höhenwinkel muss daher entsprechend korrigiert werden (s. u.). Abbildung 1 zeigt die wahren und idealen Höhenwinkel im Kamerabild.

Statt Polarkoordinaten verwendet man für das Bild üblicherweise kartesische Koordinaten parallel zu den Bildrändern. Um aus einem Bildpunkt (x, y) die Position in der Hemisphäre in Form von Azimutwinkel α und Höhenwinkel ε zu erhalten oder umgekehrt aus einer Position in der Hemisphäre den entsprechenden Bildpunkt, werden die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Transformationen benötigt.

Allgemein sei dabei

$$a = \frac{1920 \text{ px}}{2} = 960 \text{ px}$$

die halbe Bildbreite bzw. -höhe. Außerdem sei

$$z = 1 - \frac{\varepsilon}{90°} \tag{1}$$

eine Zahl zwischen 0 und 1, die die Zenitdistanz des Höhenwinkels ε beschreibt.

4.1 Korrektur des Höhenwinkels

Eine genaue Vermessung der Kamera[2] hat eine Abweichung der Projektion von der idealen linear geteilten (äquidistanten) Projektion ergeben. Dazu wurde die Kamera zu einer (beliebigen) Uhrzeit am Vormittag so aufgestellt, dass die Sonne genau in der Bildmitte erscheint, also im Zenit der Kamera. Im weiteren Tagesverlauf wandert die Sonne dann im Bild von der Mitte zum Rand, während sie am Himmel etwa 90° zurücklegt. Da die Position der Sonne am Himmel zu jeder Uhrzeit bekannt ist, kann jedem Abstand vom Bildmittelpunkt ein zurückgelegter Winkel am Himmel zugeordnet werden. Man erhält somit eine exakte Beziehung zwischen dem Höhenwinkel im Bild bei idealer Projektion und dem wahren Höhenwinkel.

Vorausgesetzt wird dabei, dass die optische Achse der Kamera durch die Bildmitte geht und dass die Optik rotationssymmetrisch um die optische Achse ist.

Für die praktische Durchführung muss die Kamera auf minimale Belichtungszeit gestellt und zusätzlich die Optik durch einen starken Filter abgedeckt werden (Abb. 2). Hier bietet sich z. B. die mit Aluminium bedampfte Rettungsdecke aus dem Verbandskasten an[3]. Auf der Folie und zwischen Folie und Kamera dürfen sich keine Wassertropfen befinden, da diese das Licht brechen

[2] Es wurde Kamera Nr. 2 verwendet.

[3] Die Decke natürlich nicht aus einem Verbandskasten nehmen, sondern über den Handel beziehen!

Abbildung 2: Auf die Sonne ausgerichtete und mit verspiegelter Folie abgeschirmte Kamera.

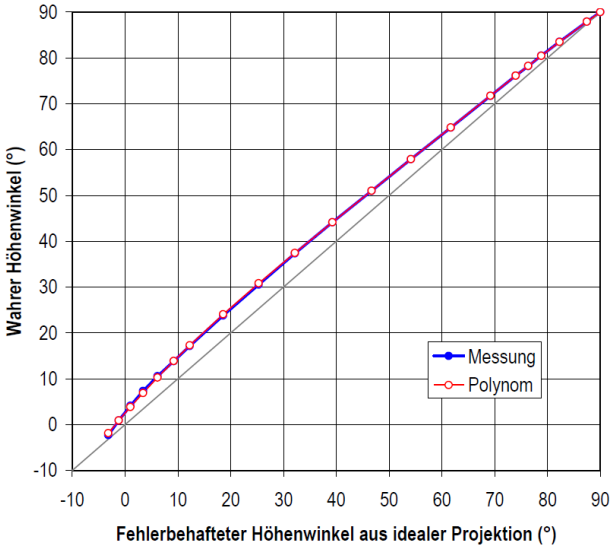


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen den Höhenwinkeln in wahrer und idealer Projektion aus Vermessung der Kamera (blau). In Rot ein angepasstes Polynom zur einfachen Berechnung der Korrekturwerte.

und so die Sonne eventuell an einer falschen Position im Bild erscheint. Wassertropfen sind auf den abgedunkelten Bildern meist nicht zu erkennen.

Um die in den nächsten Abschnitten folgenden Transformationen einfach zu halten, beziehen sie sich weiterhin auf die ideale Projektion. Es ist also (bei Bedarf an einer höheren Genauigkeit) notwendig, einen wahren Höhenwinkel zunächst in einen idealen, aber fehlerbehafteten umzurechnen, bevor daraus die Bildkoordinaten berechnet werden können. Umgekehrt muss ein aus Bildkoordinaten berechneter idealer Höhenwinkel in den wahren umgerechnet werden.

Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem wahren und dem mittels idealer Projektion berechneten Höhenwinkel. In Rot eingezeichnet ist ein Interpolationspolynom P vierten Grades, das die Punkte $(-1{,}19;\ 0{,}9)$, $(9{,}21;\ 13{,}86)$, $(39{,}29;\ 44{,}15)$, $(73{,}97;\ 76{,}11)$ und $(90;\ 90)$ interpoliert und zur einfachen Berechnung der Abweichung verwendet werden kann[4]. Damit lautet die

[4]Polynom berechnet auf `http://www.xuru.org`.

Korrektur

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{wahr}} &= P(\varepsilon_{\text{ideal}}) \\ &\approx -6{,}380024219 \cdot 10^{-7}\varepsilon_{\text{ideal}}^4 + 1{,}384399783 \cdot 10^{-4}\varepsilon_{\text{ideal}}^3 \\ &\quad - 1{,}122405179 \cdot 10^{-2}\varepsilon_{\text{ideal}}^2 + 1{,}326190211\varepsilon_{\text{ideal}} + 2{,}494295303\,. \end{aligned} \tag{2}$$

Die Abweichung der Interpolation zu den zwischen den Stützstellen liegenden Messpunkten ist in den oberen Höhen (über 45°) kleiner als 0,1° und liegt bei geringeren Höhen zwischen −0,43° und −0,28°[5]. Diese Abweichungen liegen im Bereich der Messgenauigkeit des Aufbaus und spielen praktisch keine Rolle.

Für die Umkehrung kann zum einen das obige Polynom P nach $\varepsilon_{\text{ideal}}$ aufgelöst werden oder es wird ein weiteres Interpolationspolynom Q für die Punkte (0,9; −1,19), (13,86; 9,21), (44,15; 39,29), (76,11; 73,97) und (90; 90) berechnet. Dieses lautet

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ideal}} &= Q(\varepsilon_{\text{wahr}}) \\ &\approx 4{,}407488186 \cdot 10^{-7}\varepsilon_{\text{wahr}}^4 - 9{,}844546547 \cdot 10^{-5}\varepsilon_{\text{wahr}}^3 \\ &\quad + 8{,}969454015 \cdot 10^{-3}\varepsilon_{\text{wahr}}^2 + 6{,}890441144 \cdot 10^{-1}\varepsilon_{\text{wahr}} - 1{,}817333483\,. \end{aligned} \tag{3}$$

Hier beträgt die Abweichung von den Messpunkten maximal 0,26°.

4.2 Bild zu Hemisphäre

Es seien zunächst x' und y' die Bildkoordinaten bezogen auf den Mittelpunkt:

$$\begin{aligned} x' &= x - a \\ y' &= y - a\,. \end{aligned}$$

Dann ist der Abstand r des Punktes von der Mitte

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2}\,.$$

Azimut und Höhenwinkel in der idealen Projektion ergeben sich dann zu[6]

$$\begin{aligned} \alpha &= \operatorname{arctan2}(x', y') \\ \varepsilon &= 90° \cdot \left(1 - \frac{r}{a}\right)\,. \end{aligned}$$

Bei Bedarf an einer höheren Genauigkeit muss ε noch mit der Gleichung 2 korrigiert werden.

4.3 Hemisphäre zu Bild

Bei Bedarf an einer höheren Genauigkeit muss zunächst der Höhenwinkel ε mit der Gleichung 3 in einen fehlerbehafteten Höhenwinkel umgerechnet werden, auf den sich dann die ideale Projektion anwenden lässt.

[5] Zum Vergleich: Der Durchmesser des Vollmonds beträgt etwa 0,5°.

[6] arctan2(a,b) steht hier für arctan $\frac{a}{b}$ unter besonderer Berücksichtigung der Singularitäten und Quadranten. Eine Funktion arctan2 ist in den meisten Programmiersprachen verfügbar (Schreibweise variiert).

Da der Zenit in der Bildmitte liegt und die (idealen) Höhenwinkel unverzerrt in der Bildebene liegen, berechnet sich der Abstand des Punktes von der Bildmitte zu

$$r = az = a \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{90^\circ}\right) .$$

Zusammen mit dem Azimut ergeben sich dann die Koordinaten bezogen auf die Bildmitte aus

$$x' = r \sin \alpha$$
$$y' = r \cos \alpha ,$$

woraus für die Bildkoordinaten

$$x = x' + a$$
$$y = y' + a$$

folgt.

5 Verdrehungen

Für einige Anwendungen wird eine sehr genaue Positionsbestimmung am Himmel in Form von Azimut und Höhenwinkel benötigt, z. B. für Stereoaufnahmen mit zwei Kameras. Diese Genauigkeit erreicht man in der Regel nicht durch das Aufstellen und Justieren der Kamera mit Kompass, Wasserwaage und Augenmaß. Stattdessen gibt es ein Verfahren, mit dem das Koordinatensystem einer praktisch beliebig aufgestellten Kamera eingenordet und nivelliert werden kann.

5.1 Drehmatrix

Da jede mögliche Kameraaufstellung durch (max. drei) Verdrehungen einer korrekt aufgestellten Kamera erreicht werden kann, muss lediglich die diese Drehungen beschreibende (dreidimensionale) Drehmatrix bestimmt werden.

Dies kann mithilfe der Sonne geschehen, deren wahre Position am Himmel zu jeder Zeit bekannt ist. Es werden drei Beobachtungen der Sonnenposition benötigt, z. B. vormittags, mittags und nachmittags. Die Punkte sollten möglichst weit auseinander, aber alle im relevanten Bildbereich liegen und nicht zu nah am Kamerahorizont (dem Rand des runden Bildes), da dort die Projektion unsicher ist. Zur Praxis der Sonnenbeobachtung siehe weiter unten in diesem Abschnitt.

Ist S_{mess} eine Matrix mit den drei beobachteten Sonnenpositionen als Spaltenvektoren, so gibt es eine Drehmatrix M, die diese in die wahren Positionen umrechnet, hier als Spaltenvektoren der Matrix S_{wahr}:

$$S_{\text{wahr}} = M S_{\text{mess}}$$

Da es sich um eine Drehmatrix handelt, werden damit auch alle anderen Vektoren bzw. Positionen am Himmel an die wahre Position gedreht. Die (Winkel-) Abstände der Positionen untereinander sowie deren Abstände vom Drehzentrum bleiben dabei unverändert.

Da S_{wahr} und S_{mess} bekannt sind, kann die Matrix M berechnet werden aus

$$M = S_{\text{wahr}} S_{\text{mess}}^{-1} \,. \tag{4}$$

Dabei ist S_{mess}^{-1} die inverse Matrix von S_{mess}.

Die aus dieser Berechnung resultierende Matrix M ist nicht zwingend eine Drehmatrix, da in der Regel die beobachteten und berechneten Sonnenpositionen z. B. wegen der Ungenauigkeiten beim Ablesen aus dem Bild nicht durch Drehungen in exakte Übereinstimmung gebracht werden können. Die Matrix enthält dadurch immer einen geringen Anteil an Streckung oder Stauchung. Eine reine Drehmatrix ist orthogonal und ihre Determinante ist 1. Über die Determinante kann einfach überprüft werden, ob die berechnete Matrix M hinreichend genau eine Drehmatrix ist.

In der Praxis wird man für diese Berechnungen kartesische Koordinaten x, y und z im dreidimensionalen Raum mit Ursprung im Drehzentrum verwenden. Dabei zeige x nach Osten, y nach Norden und z nach oben. Da die Positionen am Himmel schon allein durch Azimut α und Höhenwinkel ε festgelegt sind, muss man diese noch auf eine bestimmte Kugeloberfläche beziehen. Hierfür kann man die Einheitskugel mit $r = 1$ wählen.

Die Berechnung der kartesischen Koordinaten aus Azimut und Höhenwinkel lautet dann

$$x = r \cos\varepsilon \sin\alpha \tag{5}$$

$$y = r \cos\varepsilon \cos\alpha \tag{6}$$

$$z = r \sin\varepsilon \,. \tag{7}$$

Für die Umkehrung gilt mit $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ zunächst allgemein

$$\alpha = \arctan2\,(x,y) \tag{8}$$

$$\varepsilon = \arcsin\frac{z}{r} \,. \tag{9}$$

Ein Sonderfall ist $x = 0$, $y = 0$ und $|z| = r$, das sind zwei Punkte auf der z-Achse. Dann ist α undefiniert und kann auf Null gesetzt werden. Der Höhenwinkel ist dann $\varepsilon = 90°$ für $z > 0$ (Zenit) und $\varepsilon = -90°$ für $z < 0$ (Nadir). Der Fall $r = 0$ ist hier nicht möglich, da $r > 0$. Dann wären beide Winkel undefiniert.

Man beachte, dass Azimut und Höhenwinkel *nicht* mit den mathematischen Kugelkoordinaten übereinstimmen und entsprechende Formeln nicht ohne Weiteres anwendbar sind!

Um die Sonne praktisch mit der Wolkenkamera beobachten zu können, muss das einfallende Licht stark gefiltert werden. Dies kann, wie oben in Abschnitt 4.1 beschrieben, mit einer aluminiumbedampften Folie geschehen. Die Position der Sonne muss im Bild genau zu ermitteln sein.

Hat man die Bildkoordinaten der Sonne zu drei Terminen abgelesen, so müssen sie wie in Abschnitt 4.2 beschrieben zunächst zu idealen Hemisphärenkoordinaten und dann noch mit der Korrekturgleichung 2 in wahre Hemisphärenkoordinaten umgerechnet werden. Aus diesen erhält man dann nach den obigen Formeln 5 bis 7 die kartesischen Koordinaten als Punkte auf der Einheitskugel. Diese sind die Komponenten der Spaltenvektoren der Matrix S_{mess}.

Mithilfe einschlägiger Tools[7] erhält man auch die wahre Position der Sonne zu den drei Terminen, in der Regel bereits als Azimut und Höhenwinkel (oder Zenitdistanz). Auch diese werden mit

[7] Z. B. `www.sonnenverlauf.de`

den Formeln 5 bis 7 in kartesische Koordinaten umgerechnet. Diese bilden die Spaltenvektoren der Matrix S_{wahr}.

Mit S_{mess} und S_{wahr} kann dann die Matrix M nach Gleichung 4 berechnet werden.

Dieses Verfahren funktioniert natürlich auch mit dem Mond. Die Beobachtung ist sogar einfacher, weil kein Filter benötigt wird und die Belichtung der Kamera unverändert bleiben kann. Allerdings ist nur der Vollmond die ganze Nacht über sichtbar. Eine sinnvolle Beobachtung ist also nur alle vier Wochen für wenige Tage möglich oder muss über mehrere Nächte verteilt werden. Optimal wäre eine Beobachtung der Sterne, da sich diese nicht nur im Bereich der Sonnen- und Mondbahn, also hauptsächlich im Süden aufhalten, sondern am gesamten Himmel. Allerdings scheint es mit dieser Kamera nicht möglich, selbst bei maximaler Belichtungszeit Sterne aufzunehmen. Außerdem geeignet sind z. B. die Spitzen hoher Türme oder Masten in der Nähe, wenn deren Höhe, Entfernung und Richtung bekannt sind. Hier kann man gegebenenfalls direkt die kartesischen Koordinaten bestimmen. Die Spitzen dieser Sichtziele sollten aber weit in das Bild hineinragen (wie z. B. der Wettermast: 300 m hoch, 178 m entfernt), da der Rand des runden Kamerabildes nicht relevant ist und dort die Projektion optisch bedingt nicht sicher ist. Eine weitere Möglichkeit gibt es bei einer schräg aufgestellten Kamera, wo der wahre Horizont mitten durch das Bild verläuft. Hier genügt der Azimutwinkel eines möglichst weit entfernten Sichtziels, der Höhenwinkel ist dann Null. Mit zwei Punkten am Horizont und einer Sonnenposition am Himmel lässt sich leicht ein Dreieck in der Bildmitte aufspannen.

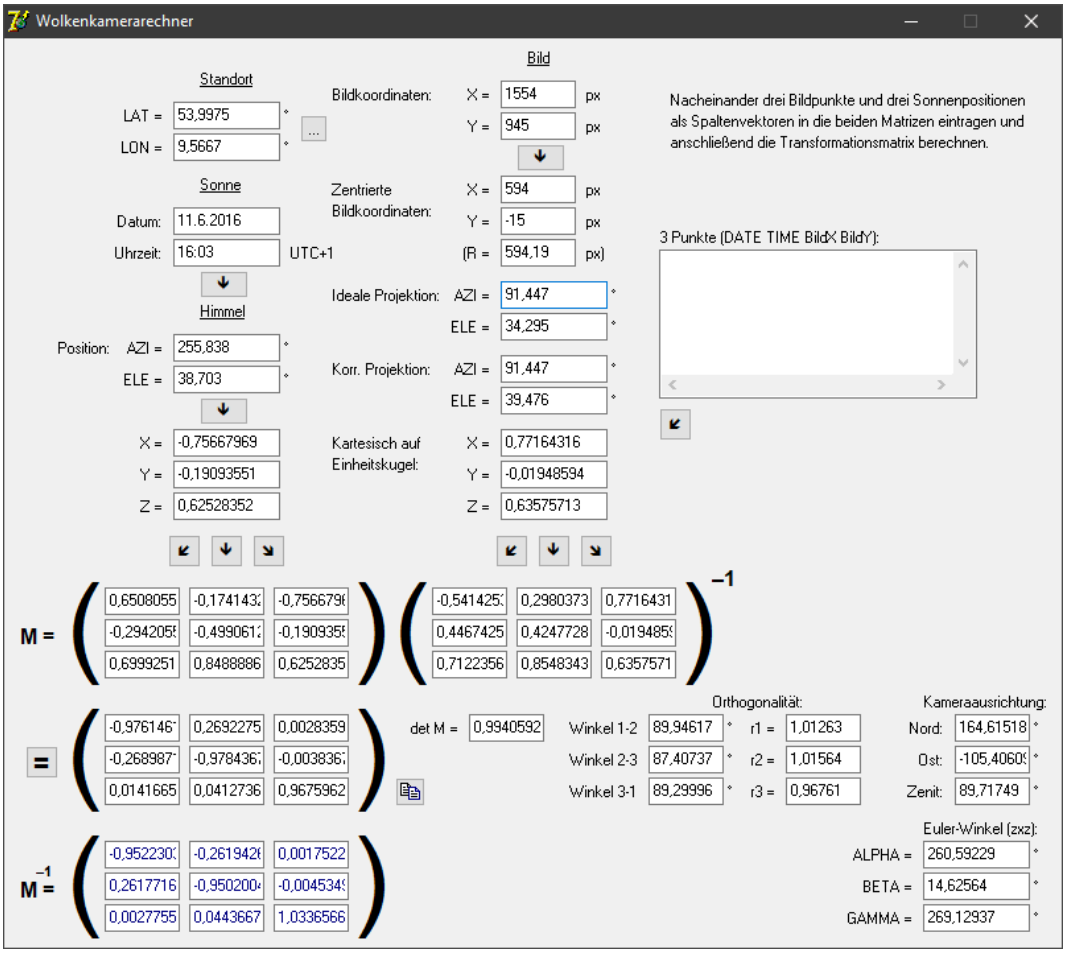
Hat man nun statt der Sonne einen beliebigen anderen Punkt im Kamerabild, so werden für diesen analog die kartesischen Koordinaten berechnet. Diese bilden dann einen Ortsvektor $\vec{r}_{\text{mess}}$, der mit der Matrix M in die wahre Himmelsrichtung gedreht werden kann:

$$\vec{r}_{\text{wahr}} = M\vec{r}_{\text{mess}}$$

Azimut und Höhenwinkel dieses Punktes ergeben sich dann aus den Komponenten von $\vec{r}_{\text{wahr}}$ mit den Formeln 8 und 9.

Rechnet man weiter rückwärts bis zu den Bildkoordinaten von $\vec{r}_{\text{wahr}}$ und zeichnet an diesem Punkt den ursprünglichen Bildpunkt aus dem Originalbild, so erhält man ein Bild, wie es von einer korrekt ausgerichteten Kamera aufgenommen worden wäre. In der Praxis sollte man, damit durch die Rasterung und Rundung im Zielbild keine Lücken entstehen, sämtliche Pixel im Zielbild durchlaufen, die entsprechenden Pixel im Quellbild berechnen und die Farbwerte von dort holen und einzeichnen.

Für die Berechnung der Transformationsmatrix M existiert ein auf die Wolkenkamera abgestimmtes Windows-Programm, das als Eingabe lediglich den Ort, drei Bildpunkte und drei Sonnenpositionen benötigt.



5.2 Euler-Winkel

Die durch Anwendung einer Drehmatrix erzeugte Verdrehung eines Objekts im Raum kann praktisch durch Nacheinanderausführung von drei einzelnen Drehungen erreicht werden. Damit lässt sich z. B. eine korrekt eingenordete und nivellierte Kamera so verdrehen, dass die Sonne in der Bildmitte (dafür braucht man schon zwei Drehungen) und Süden im Bild unten ist (dafür braucht man die dritte). Um welche Achsen die Drehungen nacheinander ausgeführt werden, muss man dabei festlegen. Es gibt verschiedene Konventionen. Die Winkel, um die jeweils gedreht wird, sind die EULERwinkel α, β und γ.

Bei der Standard-x-Konvention werden nacheinander folgende Drehungen durchgeführt:

1. Mit α um die z-Achse,
2. mit β um die neue, aus der ersten Drehung hervorgegangenen x-Achse (x') und
3. mit γ um die aus der zweiten Drehung hervorgegangenen z-Achse (z'').

Die Drehmatrix errechnen sich daraus dann zu

$$M = \begin{pmatrix} \cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\cos\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\cos\beta\sin\gamma & \sin\beta\sin\gamma \\ -\cos\alpha\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma & -\sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\cos\beta\cos\gamma & \sin\beta\cos\gamma \\ \sin\alpha\sin\beta & -\cos\alpha\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix}.$$

Diese Matrix ist orthogonal mit Determinante 1. Daher ist die inverse Matrix für die umgekehrte Drehung einfach aus $M^{-1} = M^{\mathrm{T}}$ zu ermitteln.

Im Gegensatz zur Drehmatrix sind die EULERwinkel für eine bestimmte Drehung nicht eindeutig, d. h. verschiedene EULERwinkel können zur selben Matrix führen. Insbesondere erfolgt bei $\beta = 0$ die dritte Drehung um dieselbe Achse wie die erste, d. h. das Ergebnis hängt nur von der Summe $\alpha + \gamma$ ab bzw. α ist beliebig und γ ergibt sich daraus.[8]

Die Bestimmung der EULERwinkel aus einer gegebenen Matrix ist daher nicht einfach. Schon aus $\cos\beta = m_{33}$ folgen zwei mögliche Werte für β, nämlich

$$\beta = \pm \arccos m_{33} \,.$$

Rechnet man weiter, so erhält man aus $-\cos\alpha \sin\beta = m_{32}$ schon vier mögliche Werte für α, nämlich

$$\alpha = \pm \arccos \frac{-m_{32}}{\sin(\pm\beta)} \,.$$

Dasselbe gilt für γ aus $\sin\beta \cos\gamma = m_{23}$. Man erhält hier die vier Werte

$$\gamma = \pm \arccos \frac{m_{23}}{\sin(\pm\beta)} \,.$$

Insgesamt erfüllen acht Tripel von Winkeln die hier verwendeten drei Bedingungen für m_{33}, m_{32} und m_{23}, je vier Paare von α und γ für beide β. Es gibt aber auch keine weiteren Winkel, die diese drei Bedingungen erfüllen, so dass das gesuchte Tripel für die gesamte Matrix unter diesen acht zu finden ist. Dazu rechnet man einfach alle acht Matrizen aus und vergleicht die Elemente der Matrizen mit denen der vorgegebenen Matrix.[9]

Für den Sonderfall $m_{33} = 1$ folgt eindeutig $\beta = 0$. Dann ist $\sin\beta = 0$ und die obigen Rechnungen können nicht ausgeführt werden. In diesem Fall ist γ (oder α) aber beliebig und kann auf $\gamma = 0$ gesetzt werden. Dann bleibt nur noch der Winkel α zu bestimmen, was mit der Bedingung $\cos\alpha = m_{11}$ möglich ist:

$$\alpha = \pm \arccos m_{11}$$

Auch hier muss man prüfen, welcher von beiden Werten die Matrix M erzeugt (zusammen mit $\beta = \gamma = 0$).

Ist neben m_{33} auch $m_{11} = 1$, so folgt eindeutig $\alpha = 0$. Auch ist dann wegen der Orthogonalität zwangsläufig $m_{22} = 1$ und M die Einheitsmatrix. Alle Winkel sind Null und es erfolgt keine Drehung.

Bei der numerischen Umsetzung ist darauf zu achten, dass Arkussinus und Arkuskosinus nicht für Werte größer 1 oder kleiner -1 definiert sind. Da wegen möglicher Rundungsfehler nicht ausgeschlossen werden kann, dass Argumente leicht außerhalb dieses Bereichs liegen, sollten sie generell auf 1 bzw. -1 gedeckelt werden.

Ist die Matrix M keine exakte Drehmatrix, so ist eine Berechnung der EULERwinkel im Allgemeinen nicht sinnvoll. Rechnet man sie nach obigem Verfahren trotzdem aus, so ergeben sie umgekehrt nicht wieder die ursprüngliche Matrix und führen so zu einer anderen Transformation

[8] Der Fall $\beta = 0$ führt bei dieser Konvention zu einer *kardanischen Blockade* (engl. *gimbal lock*).

[9] Bei der numerischen Umsetzung Gleitkommazahlen nicht auf Gleichheit überprüfen, sondern ein kleines ε als Abweichung zulassen.

(nämlich einer reinen Drehung, während die Matrix auch Streckungen und Stauchungen beinhaltet). Allenfalls bei sehr geringen Abweichungen von der Orthogonalität und der Bedingung $\det M = 1$ kann die Transformation statt durch die neun Matrixelemente auch durch die drei EULERwinkel beschrieben werden. Speziell bei der Wolkenkamera geht man von einer reinen Drehung durch M aus. Inwieweit dies gegeben ist, sollte aber immer überprüft werden.

5.3 Beispiel

Die Kamera sei aufgebaut[10], auf minimale Belichtung eingestellt und mit Filterfolie abgedeckt. Zu drei Terminen werden dann aus den Bildern die Bildkoordinaten x und y der Sonne (in px, beginnend an der linken oberen Ecke, Abschnitt 1) abgelesen. Nach Abschnitt 4.2 werden daraus zunächst die zentrierten Bildkoordinaten x' und y' (und deren Abstand von der Mitte r) und dann die Winkel α_{ideal} und $\varepsilon_{\text{ideal}}$ der idealen Projektion berechnet. Mit dem Polynom aus Gleichung 2 werden diese idealen Winkel in wahre Winkel umgerechnet. Diese ergeben dann die korrigierten Azimut- und Höhenwinkel im Kamerasystem:

Zeit (MEZ)	x	y	x'	y'	r	α_{ideal}	$\varepsilon_{\text{ideal}}$	α_{kam}	ε_{kam}
11.06.2016 09:21	554	1295	−406	335	526,37	309,53°	40,65°	309,53°	45,42°
11.06.2016 13:05	1174	1265	214	305	372,59	35,06°	55,07°	35,06°	58,74°
11.06.2016 16.03	1554	945	594	−15	594,19	91,45°	34,29°	91,45°	39,48°

Legt man eine Einheitskugel um die Kamera (Radius 1), so legen Azimut und Höhenwinkel einen Punkt im Raum fest, dessen kartesische Koordinaten nach den Formeln 5 bis 7 berechnet werden können:

Zeit (MEZ)	α_{kam}	ε_{kam}	r	x_{kam}	y_{kam}	z_{kam}
11.06.2016 09:21	309,53°	45,42°	1	−0,54137	0,44674	0,71227
11.06.2016 13:05	35,06°	58,74°	1	0,29808	0,42476	0,85482
11.06.2016 16.03	91,45°	39,48°	1	0,77159	−0,01953	0,63580

Für die Sonne werden mit externen Hilfsmitteln die Positionen in Form von Azimut und Höhenwinkel für die drei Termine bestimmt. Auch hierfür werden die kartesischen Koordinaten auf der Einheitskugel berechnet:

Zeit (MEZ)	α_{son}	ε_{son}	r	x_{son}	y_{son}	z_{son}
11.06.2016 09:21	114,31°	44,41°	1	0,65105	−0,29411	0,69973
11.06.2016 13:05	199,24°	58,08°	1	−0,17419	−0,49923	0,84877
11.06.2016 16.03	255,84°	38,67°	1	−0,75702	−0,19103	0,62483

[10] Standort Hungriger Wolf (Messfeld), 53,9975° N, 9,5667° O

Die kartesischen Koordinaten xyz_{son} und xyz_{kam} sind nun die Elemente der Matrizen S_{wahr} und S_{mess} aus Gleichung 4. Die je drei Ortsvektoren sind die Spaltenvektoren:

$$\begin{aligned} M &= \begin{pmatrix} 0{,}65105 & -0{,}17419 & -0{,}75702 \\ -0{,}29411 & -0{,}49923 & 0{,}84877 \\ -0{,}75702 & -0{,}19103 & 0{,}62483 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -0{,}54137 & 0{,}29808 & 0{,}77159 \\ 0{,}44674 & 0{,}42476 & -0{,}01953 \\ 0{,}71227 & 0{,}85482 & 0{,}63580 \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} 0{,}65105 & -0{,}17419 & -0{,}75702 \\ -0{,}29411 & -0{,}49923 & 0{,}84877 \\ -0{,}75702 & -0{,}19103 & 0{,}62483 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1{,}56837 & -2{,}57081 & 1{,}82436 \\ 1{,}62959 & 4{,}88834 & -1{,}82746 \\ -0{,}43395 & -3{,}69222 & 1{,}98600 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -0{,}97645 & 0{,}26986 & 0{,}00263 \\ -0{,}26937 & -0{,}97897 & -0{,}00363 \\ 0{,}01457 & 0{,}04320 & 0{,}96638 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Die Matrix M transformiert alle drei abgelesenen Sonnenpositionen aus dem Kamerasystem exakt in das reale Himmelssystem und man muss davon ausgehen, dass dies auch für alle anderen Positionen aus dem Wolkenbild gilt. Idealerweise handelt es sich bei M um eine Drehmatrix, da der einzige Unterschied zwischen beiden Systemen durch die Verdrehung der Kamera (zu Nord und zur Horizontalen) zustande kommt. Eine Matrix ist eine Drehmatrix, wenn sie orthogonal ist und die Determinante 1 hat. Bei einer orthogonalen Matrix stehen die drei Spaltenvektoren senkrecht aufeinander (Skalarprodukt 0, Winkel 90°) und haben jeweils die Länge 1. Dies ist hier für die Matrix M offensichtlich nicht exakt erfüllt:

Länge 1. Spaltenvektor: $|\vec{m}_1| = 1{,}013$
Länge 2. Spaltenvektor: $|\vec{m}_2| = 1{,}016$
Länge 3. Spaltenvektor: $|\vec{m}_3| = 0{,}966$
Winkel zwischen 1. und 2. Spaltenvektor: $\arccos \frac{\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2}{|\vec{m}_1||\vec{m}_2|} = 89{,}952°$
Winkel zwischen 1. und 3. Spaltenvektor: $\arccos \frac{\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_3}{|\vec{m}_1||\vec{m}_3|} = 89{,}284°$
Winkel zwischen 2. und 3. Spaltenvektor: $\arccos \frac{\vec{m}_2 \cdot \vec{m}_3}{|\vec{m}_2||\vec{m}_3|} = 87{,}363°$

Außerdem ist

$$\det M = 0{,}99386\,.$$

Neben der reinen Drehung erzeugt die Matrix also auch noch leichte andere Effekte wie Stauchungen und Streckungen, insbesondere in Regionen weit entfernt von den drei Sonnenpositionen, also hauptsächlich im nördlichen Himmelsbereich. Diese Abweichung von einer reinen Drehung kann zustande kommen durch Ungenauigkeiten beim Ablesen der Sonnenpositionen, durch falsche Annahmen hinsichtlich der Optik der Kamera (Zenit in Bildmitte und Rotationssymmetrie) und durch Fehler bei der Bestimmung der Höhenwinkelkorrektur nach Abschnitt 4.1.

Hat man nun einen beliebigen Punkt im Wolkenbild, so werden wie oben die kartesischen Koordinaten auf der Einheitskugel im Kamerasystem berechnet. Für die Bildmitte, also den Punkt (960, 960) bzw. dem Kamerazenit, ergibt sich ohne Rechnung sofort der Vektor

$$\vec{r}_{\text{mess}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Die wahre Position dieses Punkts am Himmel ergibt sich dann aus der Transformation mit der Matrix M:

$$\vec{r}_{\text{wahr}} = M\vec{r}_{\text{mess}} = \begin{pmatrix} -0{,}97645 & 0{,}26986 & 0{,}00263 \\ -0{,}26937 & -0{,}97897 & -0{,}00363 \\ 0{,}01457 & 0{,}04320 & 0{,}96638 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}00263 \\ -0{,}00363 \\ 0{,}96638 \end{pmatrix}$$

Dies ist der dritte Spaltenvektor der Matrix und genauso ergeben sich für Kamera-Ost ($\vec{r}_{\text{mess}} = (1, 0, 0)$) und Kamera-Nord ($\vec{r}_{\text{mess}} = (0, 1, 0)$) nach der Drehung der erste bzw. zweite Spaltenvektor. Wäre die Matrix eine echte Dehmatrix, so wären auch diese gedrehten Vektoren Einheitsvektoren und stünden senkrecht aufeinander.

Mithilfe der Formeln 8 und 9 lassen sich aus den gedrehten kartesischen Koordinaten die wahren Azimut- und Höhenwinkel am Himmel berechnen. Für die drei Kamera-Basisrichtungen Ost, Nord und Zenit ergeben sich hier folgende Werte:

Richtung	r	α	ε
Ost	1,013	254,578°	0,824°
Nord	1,016	164,589°	2,436°
Zenit	0,966	144,076°	89,734°

Damit hat man auch errechnet, dass die Nordmarkierung der Kamera in Richtung 164,589° zeigt (Einnordung). Wie stark die Kamera gegen die Horizontale verdreht ist (Nivellierung), lässt sich nicht eindeutig sagen. Da M hier keine exakte Drehmatrix ist, gibt es unterschiedliche Aussagen: Der Kamerazenit liegt nur 0,266° neben dem wahren Zenit, in Nord-Süd-Richtung beträgt der Kippwinkel aber 2,436° und in Ost-West-Richtung 0,824°.

Die EULERwinkel α, β und γ für die Matrix M können nach dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Verfahren formal berechnet werden. Sie ergeben sich zu

$$\begin{aligned} \alpha &= 260{,}327° \\ \beta &= 14{,}899° \\ \gamma &= 269{,}190° \,. \end{aligned}$$

Die daraus umgekehrt berechnete Drehmatrix

$$M_{\text{eul}} = \begin{pmatrix} -0{,}95017 & 0{,}17629 & -0{,}25709 \\ -0{,}18147 & -0{,}98339 & -0{,}00363 \\ -0{,}25346 & 0{,}04320 & 0{,}96638 \end{pmatrix}$$

zeigt jedoch deutliche Abweichungen von der ursprünglichen Matrix M, was darauf zurückzuführen ist, dass M keine exakte Drehmatrix ist. Lediglich die drei Elemente m_{33}, m_{23} und m_{32} stimmen überein, da diese (und nur diese) für die Berechnung der EULERwinkel verwendet wurden. Die Matrix M_{eul} transformiert auch nicht mehr die drei gemessenen Sonnenpositionen exakt auf die berechneten Positionen.

Die eventuell naheliegende Annahme, dass M_{eul} so etwas wie eine „mittlere“ Drehung der ursprünglichen Transformation M oder eine Drehung, die M möglichst nahe kommt, beschreibt, ist falsch, da nur drei der (in diesem Fall voneinander unabhängigen) neun Matrixelemente von M für die Berechnung der EULERwinkel herangezogen wurden.

Es bleibt, zumindest in diesem Beispiel, der Zwiespalt zwischen der experimentell ermittelten Transformationsmatrix M, die keine reine Drehung beschreibt, und der Tatsache, dass die Kamera im Prinzip nur verdreht sein kann. Die möglichen Gründe für diesen Widerspruch wurden oben bereits genannt.

6 Verzerrungen

Da der Himmel eine Halbkugel ist, kommt es bei der Projektion auf die Bildebene zu Verzerrungen bei Abständen und Flächeninhalten bzw. Raumwinkeln. Eine weitere Verzerrung entsteht, wenn eine horizontale Ebene, auf denen sich z. B. die Wolken befinden, auf das Kamerabild projiziert wird.

Im Folgenden sei der *Betrachtungswinkel* derjenige Winkel, unter dem der Abstand zweier Punkte am Himmel erscheint, unabhängig von konkreten Azimut- und Elevationswinkeln.

6.1 Abstände/Winkel

In der Hemisphäre erscheint ein $\Delta\varepsilon$ überall unter demselben Betrachtungswinkel, nämlich $\Delta\varepsilon$.

Für ein $\Delta\alpha$ gilt dies nur am Horizont. Da die Linien gleichen Azimuts zum Zenit hin ähnlich wie die Längenkreise auf der Erde zum Pol hin zusammenlaufen, erscheint ein $\Delta\alpha$ allgemein unter dem Betrachtungswinkel $\Delta\alpha \cdot \cos\varepsilon$.

In der idealen äquidistanten Projektion ist auf dem Bild $\Delta\varepsilon$ in Pixel immer gleich lang (daher der Name „äquidistant“), und zwar entspricht einem $\Delta\varepsilon = 1°$ der Abstand 1920 px/180 = 10,667 px bzw. für 1 px ist $\Delta\varepsilon = 0{,}09375°$.

Bei der realen Projektion und für kleine $\Delta\varepsilon$ muss zunächst mit dem Polynom Q das wahre $\Delta\varepsilon$ in ein ideales umgerechnet werden, z. B. mit

$$(\Delta\varepsilon)_{\text{ideal}} = Q(\varepsilon + \Delta\varepsilon) - Q(\varepsilon - \Delta\varepsilon)\,.$$

Für große $\Delta\varepsilon$ kann der Pixelabstand nur durch eine vorherige Korrektur zweier Höhenwinkel ε_1 und ε_2 mit $\Delta\varepsilon = |\varepsilon_2 - \varepsilon_1|$ mit dem Polynom Q und anschließender Berechnung der Bildkoordinaten bestimmt werden (bei beliebigem Azimut):

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 \Rightarrow Q(\varepsilon_1), Q(\varepsilon_2) \Rightarrow (x_1,y_1)\,(x_2,y_2) \Rightarrow \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Die Länge von $\Delta\alpha$ auf dem Bild hängt vom Höhenwinkel ε ab, im Folgenden ausgedrückt durch z nach Gleichung 1. In der idealen Projektion gilt

$$1° \mathrel{\hat{=}} \frac{z\pi \cdot 1920 \text{ px}}{360} = z\pi \cdot 5{,}333 \text{ px} = z \cdot 16{,}755 \text{ px}$$

$$\text{bzw.} \quad 1 \text{ px} \mathrel{\hat{=}} \frac{360°}{z \cdot 1920\pi} = \frac{0{,}1875°}{z\pi} = \frac{1}{z} \cdot 0{,}05968°\,.$$

Am Horizont ist $\Delta\alpha$ länger als $\Delta\varepsilon$ (1° entspricht 16,755 px bzw. 1 px entspricht 0,005968°).

Bei $\varepsilon = 32{,}7°$ haben $\Delta\varepsilon$ und$\Delta\alpha$ dieselbe Pixellänge, nämlich die soeben für $\Delta\varepsilon$ angegebene von 10,667 px.

Bei der realen Projektion kann zunächst mit dem Polynom Q das ideale ε und dann daraus das (ideale) z berechnet werden. Dann gelten wieder die obigen Formeln.

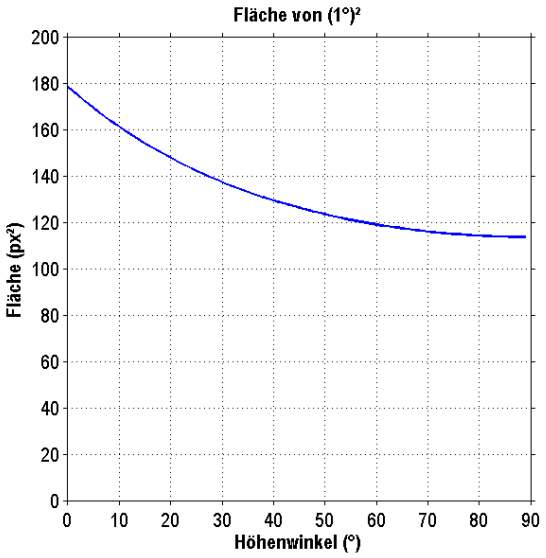
6.2 Flächen/Raumwinkel

In der Hemisphäre bedeckt ein Quadrat mit scheinbarer Kantenlänge 1° immer denselben Raumwinkel, nämlich

$$(1°)^2 = \left(\frac{2\pi}{360°}\right)^2 \approx 0{,}0003046 \text{ sr} = 0{,}3046 \cdot 10^{-3} \text{ sr}\,.$$

Die Abbildung dieses Quadrats in der Bildebene nimmt jedoch je nach Höhenwinkel (ε und z) eine unterschiedliche Fläche ein. In der idealen äquidistanten Projektion gilt

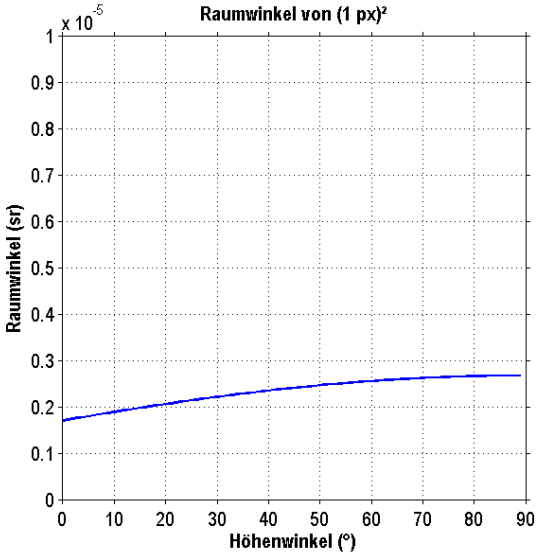
$$(1°)^2 = 0{,}3046 \cdot 10^{-3} \text{ sr} \mathrel{\hat{=}} \frac{z}{\cos\varepsilon} 178{,}76 \text{ px}^2\,.$$



Bewegt sich also ein Objekt, das seine scheinbare Größe am Himmel nicht ändert, vom Horizont zum Zenit, so wird es im Bild beständig kleiner. Seine Größe in der Bildmitte bträgt nur noch ungefähr das 0,64-fache der Größe am Bildrand.

Umgekehrt bedeckt ein Quadrat in der Bildebene mit Kantenlänge 1 px unterschiedliche Raumwinkel in der Hemisphäre. In der idealen Projektion gilt

$$\begin{aligned}(1 \text{ px})^2 &\mathrel{\hat{=}} \frac{\frac{2\pi \cdot 1 \text{ px} \cdot \cos\varepsilon}{1920 z \pi}}{\frac{2\pi \cdot 1 \text{ px}}{2 \cdot 1920 \text{ px}}} = \frac{\cos\varepsilon}{960 z} \cdot \frac{\pi}{1920} \\ &= \frac{\cos\varepsilon}{z} 0{,}1704 \cdot 10^{-5} \text{ sr}\,.\end{aligned}$$



Ein Objekt in der Bildmitte entspricht also einer etwa 1,56-fachen Größe am Himmel im Vergleich zu einem gleich großen Objekt am Bildrand.

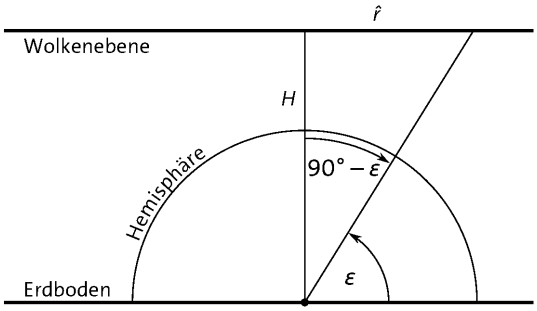
Bei der realen Projektion müssen zunächst der ideale Höhenwinkel mit dem Polynom Q berechnet werden und daraus zusätzlich das z. Mit diesen Werten gelten dann die obigen Angaben.

6.3 Projektion auf Wolkenebene (Entzerrung)

Die Wolken befinden sich nicht auf der Hemisphäre, sondern (im Idealfall) auf einer horizontalen Ebene über der Kamera. Aufgrund der Optik der Kamera hat dies zur Folge, dass eigentlich gerade Zugbahnen von Wolken im Kamerabild gekrümmt sind und horizontale Abstände in der Wolkenebene im Kamerabild verzerrt werden. Für die Ortsbestimmung einer Wolke über einem Gebiet muss daher das Kamerabild in die Wolkenebene projiziert werden. Diese Entzerrung kann in drei Schritten erfolgen:

1. Umrechnung von Bildkoordinaten x und y in Hemisphärenkoordinaten α und ε wie in Abschnitt 4.2 beschrieben.
2. Umrechnung von Hemisphärenkoordinaten α und ε in Polarkoordinaten $\hat{\alpha}$ und $\hat{r}$ auf der Wolkenebene mit Nullpunkt im Zenit der Kamera. Dabei bleibt der Azimut erhalten. Für die Skalierung von $\hat{r}$ wird die Höhe H der Ebene über der Kamera benötigt. Es ist dann

$$\hat{\alpha} = \alpha$$
$$\hat{r} = H \cdot \tan(90^\circ - \varepsilon)\,.$$



3. Umrechnung der Polarkoordinaten in kartesische Koordinaten $\hat{x}$ und $\hat{y}$:

$$\hat{x} = \hat{r} \sin \hat{\alpha}$$
$$\hat{y} = \hat{r} \cos \hat{\alpha}$$

   Bei einer nach Abschnitt 2 eingenordeten Kamera läuft dann $\hat{x}$ nach Osten und $\hat{y}$ nach Norden, ausgehend vom Standort der Kamera.

Für die Erstellung eines entzerrten Bildes in der Wolkenebene ist es oftmals günstiger, den umgekehrten Weg zu gehen und zu jedem Punkt auf dem Zielbild den entsprechenden Wert aus dem Kamerabild zu holen:

1. Kartesische Koordinaten in Polarkoordinaten:

$$\hat{r} = \sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}$$
$$\hat{\alpha} = \operatorname{arctan2}(\hat{x}, \hat{y})$$

2. Polarkoordinaten in Hemisphärenkoordinaten:

$$\alpha = \hat{\alpha}$$
$$\varepsilon = 90^\circ - \arctan \frac{\hat{r}}{H}$$

3. Hemisphärenkoordinaten in Bildkoordinaten wie in 4.3 beschrieben.

7 Wolkenerkennung

Die bisher von uns verwendeten Verfahren zur Unterscheidung von Wolken und blauem Himmel in den Bildern der Wolkenkamera basieren ausschließlich auf der Auswertung der Farbwerte für jedes einzelne Pixel. Es ist damit möglich, mit einer gewissen Genauigkeit zu jedem einzelnen Pixel zu sagen, ob es eine Wolke oder blauen Himmel zeigt. Benachbarte Pixel oder die zeitliche Abfolge der Bilder werden bisher nicht berücksichtigt.

Zur Analyse werden die drei RGB-Farbwerte für Rot, Grün und Blau eines Pixels herangezogen. Jede dieser drei Farbkomponenten kann die ganzzahligen Werte 0 bis 255 annehmen, wobei 255 die maximale Intensität und 0 keine Intensität darstellt. Die Farbe (0, 0, 0) ist also Schwarz, (255, 255, 255) ist Weiß. Der gesamte darstellbare Farbraum besteht demnach aus einem dreidimensionalen Würfel mit Kantenlänge 256 und beinhaltet somit $256^3 = 16\,777\,716$ unterschiedliche Farben (Abbildung 4). Diese Farbtiefe wird auch als *True Color* bezeichnet. Farben außerhalb dieses Farbwürfels können prinzipiell nicht dargestellt werden.

Ein Wolkenerkennungsalgorithmus, der auf der pixelweisen Auswertung der RGB-Werte basiert, gibt nun für jede Farbe (R, G, B) an, ob es sich um eine Wolke oder blauen Himmel handelt. Im Regelfall kommt noch mindestens der Fall „weder Wolke noch Himmel“ hinzu. Das sind z. B. Gegenstände im Bild, Verschmutzung auf der Glaskuppel, Reflexionen in der Optik usw. Überschneiden sich im Farbraum die Bereiche, die eine Wolke identifizieren, mit denen für blauen Himmel, gibt es auch noch das Ergebnis „beides möglich“.

Die Entwicklung eines solchen Algorithmus besteht nun darin, Bereiche im Farbraum zu finden, die Wolken und blauen Himmel identifizieren. Dies kann nur funktionieren, wenn die Menge aller

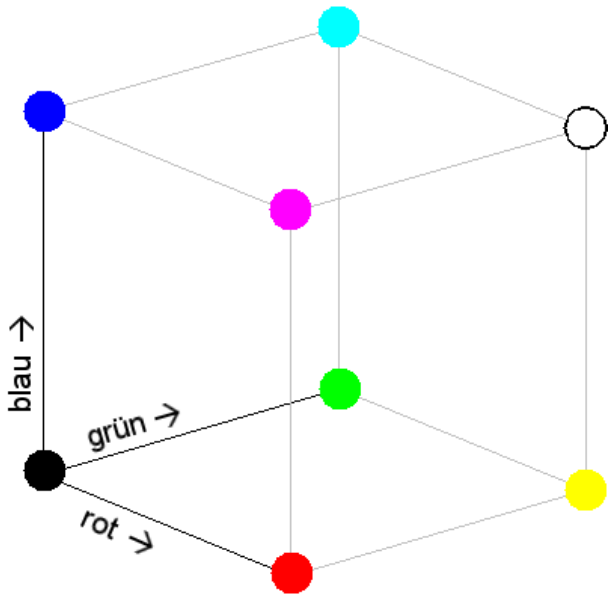


Abbildung 4: Dreidimensionaler Farbraum mit roter, grüner und blauer Koordinatenachse. In den Ecken die reinen Farben Rot, Grün und Blau, die einfachen Mischfarben Zyan, Magenta und Gelb sowie Schwarz und Weiß.

Wolkenfarben und die Menge aller Himmelsfarben möglichst verschiedene Bereiche im Farbraum einnehmen. Idealerweise sind die Bereiche vollständig voneinander getrennt, dann wäre eine eindeutige Bestimmung möglich. In der Realität gibt es jedoch eine ganze Reihe von Farben, die sowohl in Wolken, als auch am (dann nicht mehr ganz so) blauen Himmel vorkommen.

7.1 Algorithmus 1 (veraltet)

Der Algorithmus 1 ist eine einfache Fallunterscheidung der RGB-Farbwerte, angewendet auf Bilder der Einsatzphase 1 (betreffend Weißabgleich, Abschnitt 8.2, und Bildeinstellungen, Abschnitt 8.3).

Den in Abschnitt 8.2 für die Kameraeinstellung vorgegebenen Weißabgleich vorausgesetzt, liefert eine einfache Auswertung der RGB-Werte für jedes Pixel die Information, ob es sich um eine Wolke handelt oder nicht.[11] Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens ist bisher zwar nicht eingehend untersucht worden. Der Vergleich mit Ceilometerdaten (Vaisala CT25k mit Sky-Condition-Algorithmus) liefert für die meiste Zeit jedoch plausible Werte. Unsicher scheinen insbesondere die Werte in der Stunde vor bzw. nach der Dunkelheit. (Die Kamera liefert bis etwa 30 Minuten nach Sonnenuntergang Farbbilder, die prinzipiell ausgewertet werden können. Ab einer gewissen Dunkelheit werden nur noch Schwarz-Weiß-Bilder erzeugt, die gleichsam als Indikator für „Nacht“ dienen können.)

Es empfiehlt sich, mit einer „Maske“ solche Bereiche in den Bildern zu kennzeichnen, in denen Hindernisse die Sicht auf den Himmel einschränken. Im Folgenden seien maskierte Pixel auf Schwarz gesetzt.

[11] Die beschriebene Wolkenerkennung wurde mit den Kameras 1 und 2 entwickelt. Die Kameras 3 und 4 liefern beim selben Weißabgleich ein farblich abweichendes (grüneres) Bild, was mit angepassten Parametern für den Weißabgleich kompensiert werden muss (siehe Abschnitt 8.2).

Seien R, G und B die Farbwerte eines Pixels für Rot, Grün und Blau, jeweils mit einem Wertebereich von 0 (dunkel) bis 255 (hell), und $c_{\max}$ das Maximum von R, G und B sowie $c_{\min}$ entsprechend das Minimum, dann lautet der Erkennungsalgorithmus wie folgt:

1. $(R \geq 250) \wedge (G \geq 250) \wedge (R \geq 250) \Rightarrow$ undefiniert (weiß oder fast weiß, z. B. die Sonne)
2. $R + G + B = 0 \Rightarrow$ Maske (schwarz)
3. $(R \leq 10) \wedge (G \leq 10) \wedge (R \leq 10) \Rightarrow$ undefiniert (fast schwarz)
4. $[(R \leq 80) \wedge (G \leq 80) \wedge (R \leq 80)]$
   a) $\wedge [(B > G + 5) \wedge (B > R + 5)] \Rightarrow$ blauer Himmel (blaues Dunkelgrau)
   b) sonst Wolke (dunkelgrau)
5. $c_{\max} - c_{\min} < 10 \Rightarrow$ blauer Himmel
6. $c_{\max} - c_{\min} > 100 \Rightarrow$ Artefakt
7. $(B > G) \wedge (B > R) \Rightarrow$ blauer Himmel
8. sonst Wolke

In einer Programmiersprache könnte dies etwa so aussehen:

```
IF (R >= 250) AND (G >= 250) AND (B >= 250) THEN
  Pixel := Undefiniert
ELSE IF R+G+B = 0 THEN
  Pixel := Maske
ELSE IF (R <= 10) AND (G <= 10) AND (B <= 10) THEN
  Pixel := Undefiniert
ELSE IF (R <= 80) AND (G <= 80) AND (B <= 80) THEN
  IF (B > G+5) AND (B > R+5) THEN
    Pixel := BlauerHimmel
  ELSE
    Pixel := Wolke
ELSE
  BEGIN
    Cmin := Min(R,G,B);
    Cmax := Max(R,G,B);
    IF Cmax - Cmin < 10 THEN
      Pixel := BlauerHimmel
    ELSE IF Cmax - Cmin > 100 THEN
      Pixel := Artefakt
    ELSE
      IF (B > G) AND (B > R) THEN
        Pixel := BlauerHimmel
      ELSE
        Pixel := Wolke
  END
```

Dieser Algorithmus ist relativ einfach umzusetzen und evtl. an andere Bildparameter anzupassen. Er zerlegt den Farbraum durch seine wenigen Größer- und Kleiner-Bedingungen jedoch sehr gradlinig in die entsprechenden Teilbereiche Wolke, Himmel usw. Es zeigt sich, dass diese Bereiche komplexere Formen haben, die sich durch eine einfache Fallunterscheidung nicht befriedigend beschreiben lassen.

7.2 Algorithmus 2 (veraltet)

Der Algorithmus 2 ist eine Fallunterscheidung der RGB-Farbwerte, die durch ein „Training“ ermittelt wurde. Dazu wurden bei zahlreichen unterschiedlichen Bildern manuell Bereiche markiert und als „Blauer Himmel“ oder „Wolke“ gekennzeichnet. Diese Daten bilden im RGB-Farbwürfel zunächst zwei 3-dimensionale Bereiche. Es ergibt sich, dass alle beobachteten Farbwerte praktisch über der Diagonalen der Rot-Grün-Ebene liegen, also der Linie von Schwarz nach Gelb. Bei den beiden Bereichen handelt es sich faktisch daher nur um 2-dimensionale Bereiche in der Gelb-Blau-Ebene (Gelb sei hier definiert als der Mittelwert aus Rot und Grün). In dieser Ebene können die Bereiche durch einfache Kurven voneinander getrennt werden (Abbildung 5).

Da sich der Himmel- und der Wolkenbereich überlappen, gibt es eine Zone, in der nicht entschieden werden kann, ob blauer Himmel oder eine Wolke vorliegt. Werte außerhalb der beiden Bereiche sind Artefakte (Gegenstände, Vögel, Reflexionen usw.).

Ausgabewerte des Algorithmus 2:

- Blauer Himmel
- Wolke
- Undefiniert (Wolke oder Himmel)
- Artefakt
- Maske

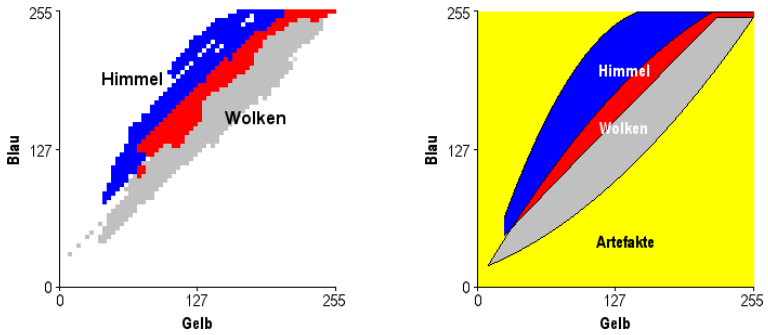


Abbildung 5: Links: Durch manuelle Bildanalyse ermittelte Bereiche in der Gelb-Blau-Ebene für Himmel (blau) und Wolken (grau) sowie ein Bereich, in dem beides möglich ist (rot). Für diese Darstellung wurde ein 4×4-Kästchen eingefärbt, wenn mindestens einer der darin gelegenen 16 Farbwerte als Wolke bzw. Himmel gesetzt war. Rechts: Für den Algorithmus angepasste, durch glatte Kurven (Polynome 3. Grades) begrenzte Bereiche.

Dieser Algorithmus hat sich nicht bewährt, da durch eine Reduzierung des Farbraums auf zwei Dimensionen (Gelb und Blau) doch Informationen verloren gehen, die Wolken und Himmel eindeutig charakterisieren. Konkret gibt es im roten Bereich eine Differenzierung senk-

recht zur Papierebene. Der Himmelsbereich liegt eher hinten, der Wolkenbereich vorne. Ein Überlappungsbereich bleibt dazwischen zwar bestehen, aber durch eine solche dreidimensionale Betrachtung könnten eben doch für viele Fälle Wolken und Himmel eindeutig bestimmt werden.

7.3 Algorithmus 3

Der derzeit verwendete Algorithmus stellt eine Weiterentwicklung der beiden vorigen dar, ist andererseits aber auch von bestechender Einfachheit:

1. Auf bereits archivierten, möglichst unterschiedlichen Wolkenbildern werden manuell Bereiche mit Wolken und Himmel markiert und die entsprechenden Farbwerte abgespeichert („Training“ des Algorithmus).
2. Für ein zu analysierendes Bild wird für jedes Pixel in den abgespeicherten Farbwerten nachgeschlagen, ob es sich um eine Wolke oder blauen Himmel handelt.

Unterstützt wird das Training von einer Software, die noch unbekannte Farben in einem Wolkenbild anzeigt, so dass diese der Datenbank hinzugefügt werden können, während bereits bekannte Farben nicht noch einmal charakterisiert werden müssen.

Abbildung 6 zeigt die Bereiche für Himmel und Wolken im Farbraum. Anhand der Projektionen auf die drei Seitenflächen lässt sich die Form dieser dreidimensionalen Gebilde etwas genauer erkennen. So ist z. B. der Streifen in der Rot-Grün-Ebene (Gelb-Ebene) relativ schmal, was im vorangehend beschriebenen Algorithmus für eine zweidimensionale Betrachtungsweise ausgenutzt wurde. In der Vereinigung beider Bereiche fällt auf, dass bei dunklen Farben tatsächlich eine deutliche Trennung zwischen Himmel und Wolken besteht. Die Schnittmenge gibt diejenigen Farben an, die sowohl als Wolke als auch (meist auf einem anderen Bild bei einer anderen Wettersituation) als Himmel erkannt wurden.

Diese Bereiche geben keine Häufigkeiten der jeweiligen Farbwerte an. Es genügt, wenn eine Farbe ein einziges Mal charakterisiert wurde. Da die Auswahl der Bildbereiche manuell erfolgt und vor allem auf bis dahin unbekannte Farben zielt, ist dieses Training nicht für die Erstellung von Häufigkeiten geeignet. Häufigkeiten könnten im Nachhinein durch Anwendung des Algorithmus berechnet werden. In diesem Zusammenhang fällt zudem auf, dass die Kamera offenbar keine große Farbstreuung oder gar Fehlfarben liefert, denn Farbwerte außerhalb der beiden sich deutlich abzeichnenden Bereiche sind nie im Bild einer Wolke oder eines Himmelsausschnitts vorgekommen.

Es fällt auf, dass die dreidimensionalen Bereiche für Himmel und Wolken sowohl bei der Projektion auf die Würfelseiten als auch auf die Papierebene immer noch Löcher aufweisen. Dies ist natürlich zum einen auf bisher noch nicht charakterisierte Farben zurückzuführen, die sicher bei weiterem Training irgendwann einmal behandelt werden, zum anderen aber auch auf die Tatsache, dass die Kamera (oder zumindest das von der Kamera gelieferte Bild im JPEG-Format) offenbar bei weitem nicht alle Farben verwendet. Abbildung 7 zeigt dazu einen Schnitt durch die Farben für „Himmel“ in der Rot-Blau-Ebene bei einem mittleren Grünwert. Der Bereich ist zwar gleichmäßig mit Werten gefüllt, aber nur etwa ein Viertel der Farben kommt in den Bildern wirklich vor. Die Gebilde sind also alles andere als kompakt, sondern eine sehr poröse Ansammlung meist einzeln stehender Farbwerte. Dieses Verhalten hat eine grundlegende Konsequenz: Die Wolkenerkennung funktioniert nur, wenn das Training mit exakt derselben Kamera durchgeführt wurde, allenfalls noch mit einer baugleichen Kamera. So besteht der Unterschied

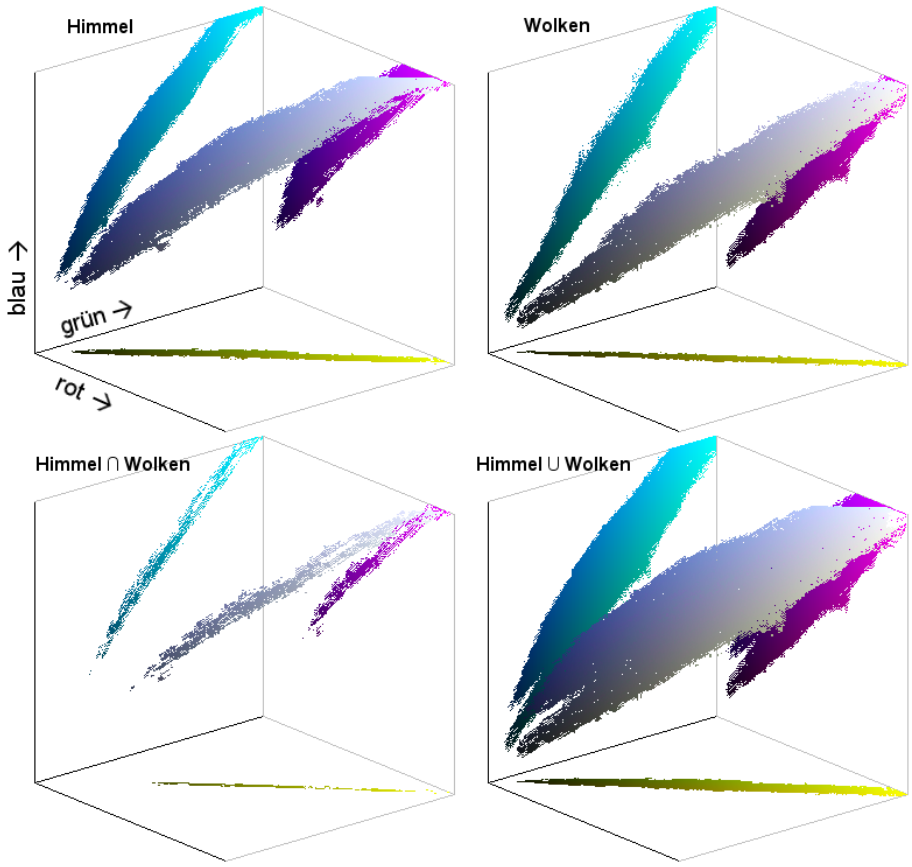


Abbildung 6: Durch manuelle Bildanalyse („Training“) ermittelte Bereiche im Farbraum für Himmel (oben links) und Wolken (oben rechts), zusätzlich auf jeweils drei Würfelseiten die Projektionen dieser Bereiche. Unten links die Schnittmenge, also die Menge der sowohl als Himmel als auch als Wolke gekennzeichneten Farben, und unten rechts die Vereinigung von Himmels- und Wolkenfarben.

zwischen den Kameras 1 und 2 zu den Kameras 3 und 4 nicht nur im Weißabgleich, sondern auch in der Auswahl der verwendeten Farben. Auch wenn man versucht, das Bild einer Kamera durch Korrektur der RGB-Werte an das Bild der Trainingskamera anzupassen (z. B. nachträglicher Weißabgleich), wird man kaum genau die Farben bekommen, die die Trainingskamera geliefert hat.

Der Algorithmus muss daher noch etwas verfeinert werden:

3. Die Entscheidung, ob für ein Pixel Wolke oder Himmel vorliegt, basiert nicht nur allein auf dessen Farbwert, sondern auch auf den 26 im Raum umgebenden Farbwerten[12]. Ergeben diese 27 Farbwerte mehrheitlich Himmel, so wird „Himmel“ ausgegeben, bei mehrheitlich Wolke „Wolke“, bei gleicher Anzahl, aber größer als Null, ist beides möglich. Ist von den 27 Farbwerten keines dabei, das Wolke oder Himmel ist, so ist das Ergebnis „unbekannt“.

Zusammengefasst ermittelt der Algorithmus aus einem Farbwert eines Pixels mithilfe der Farbbereiche für Wolken und Himmel einen der folgenden Werte:

- Himmel

[12]Ein Würfel von $3 \times 3 \times 3 = 27$ Farben im Farbraum mit der zu testenden Farbe im Mittelpunkt.

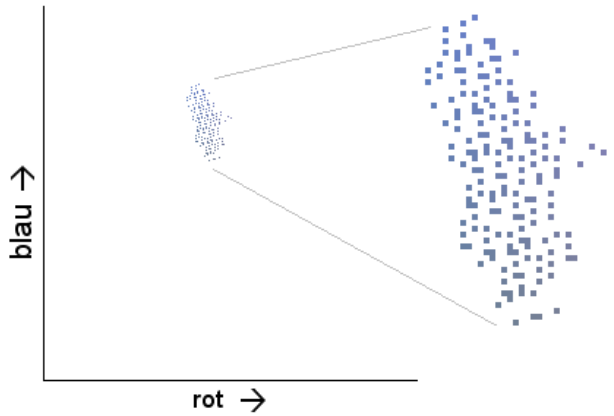


Abbildung 7: Schnitt durch die Menge der Farben für „Himmel“ in der Rot-Blau-Ebene bei einem mittleren Grünwert.

- Wolke
- Beides (Wolke oder Himmel)
- Unbekannt (weder Wolke noch Himmel)
- Sonne (weiß)
- Maske (schwarz)

Abbildung 8 zeigt die Analyse eines Wolkenbildes.

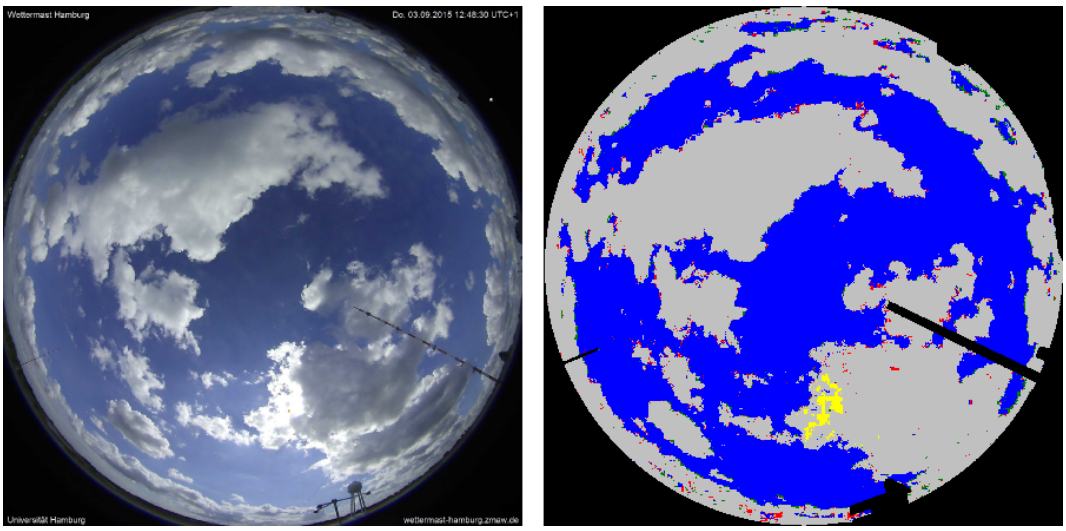


Abbildung 8: Wolkenbild (links) und Ergebnis der Wolkenerkennung (rechts). Als Wolken erkannte Bereiche sind grau dargestellt, blauer Himmel blau. Rot sind Stellen, deren Farben sowohl Wolken als auch Himmel zugeordnet sind, grün sind bisher noch nicht charakterisierte Farben und gelb der helle Bereich in der Umgebung der Sonne. Schwarz ist die Maske, mit der der Horizont, die Messgeräte und die Masten im Bild ausgeblendet werden. (Wolkenbild vom 3. September 2015, 12:48:30 MEZ)

Der Nachteil dieses Algorithmus ist, dass die Dateien mit den Farbbereichen für Wolken und Himmel vorliegen müssen. Diese enthalten viele Tausend Farbwerte, während die beiden erstgenannten Verfahren mit wenigen Zahlen und Bedingungen auskommen, die direkt programmiert werden können.

7.4 Blaue Stunde

In der Dämmerung, morgens wie abends, verschieben sich die Farben am Himmel deutlich ins Blaue. Dies kann im Freien mit dem Auge, aber besonders auf fotografischen Aufnahmen beobachtet werden (Abbildung 9). Diese Farbverschiebung stört leider die Wolkenerkennung während dieser Zeit, da auch Wolken in Blautönen erscheinen, wie tagsüber nur der Himmel. Generell nimmt der Farbumfang am Himmel in der blauen Stunde ab, denn der blaue Himmel selbst bleibt auch blau.[13]

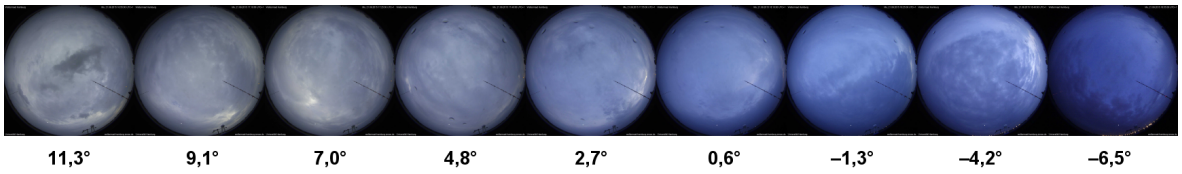


Abbildung 9: Änderung der Himmelsfärbung während der abendlichen Dämmerung am 21. September 2015 zwischen 16.55 und 18.55 Uhr MEZ im Abstand von 15 Minuten mit den Höhenwinkeln der Sonne.

Eine tagsüber funktionierende Wolkenerkennung anhand der Farbwerte einzelner Pixel ist zu den Zeiten der blauen Stunde daher nicht möglich. Da sich während der blauen Stunde die Farbwerte kontinuierlich ändern, ist auch eine Anpassung des Algorithmus, z. B mit einem speziellen Training für diese Zeiten, nicht möglich. Tabelle 1 zeigt das ungefähre Ende der blauen Stunde morgens und den Beginn abends in Abhängigkeit vom Höhenwinkel ε der Sonne.

Tabelle 1: Ende und Beginn der blauen Stunde, abhängig vom Höhenwinkel ε der Sonne, bestimmt anhand der Färbung von Wolkenbildern aus dem September 2015.

Bedeckung	Ende morgens	Beginn abends
gering	$\varepsilon > 5{,}0°$	$\varepsilon < 5{,}0°$
stark	$\varepsilon > 7{,}5°$	$\varepsilon < 7{,}5°$

Für eine sichere Wolkenerkennung sollte die Sonne also mindestens 7,5° über dem Horizont stehen. Zwischen den blauen Stunden ändern sich die Himmelsfarben nur wenig. Die Dauer des Zeitraums, in dem ε zwischen 0° und 7,5° liegt, schwankt von 2×54 Minuten Anfang April und Mitte September, 2×67 Minuten am Sommeranfang und 2×83 Minuten am Winteranfang. Am 21. Dezember schrumpft dadurch die auswertbare Zeitspanne auf etwa 4,5 Stunden, während sie am 21. Juni 14,7 Stunden beträgt. Abbildung 10 zeigt die Länge dieser Zeitspannen im Jahresverlauf.

7.5 Bedeckungsgrad

Zur Berechnung des Bedeckungsgrades sind nur die Pixel mit „Blauer Himmel“ und „Wolke“ zu berücksichtigen. Wegen der Verzerrung des Bildes müssen diese zunächst in Raumwinkel

[13] Eine physikalische Erklärung der blauen Stunde wird hier nicht gegeben. Stichworte: Rayleigh-Streuung tagsüber und Chappuis-Absorption durch Ozon in der blauen Stunde.

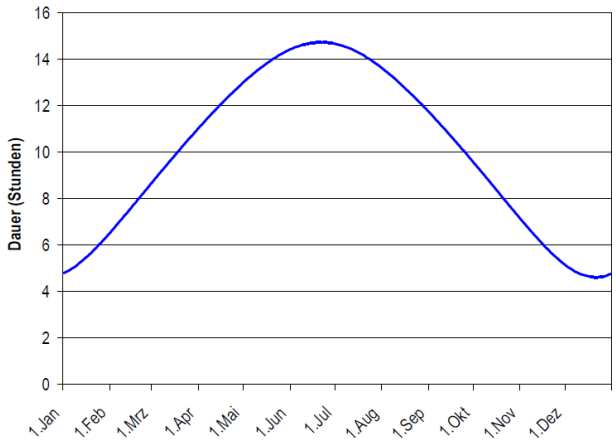


Abbildung 10: Jahresverlauf der täglichen Zeitspanne, in der eine Wolkenerkennung möglich ist (gültig für 53,5° N). Die Zeiten ergeben sich aus einem Höhenwinkel der Sonne von über 7,5°.

umgerechnet werden (Abschnitt 6.2). Der rechnerische Bedeckungsgrad ergibt sich dann aus

$$b_1 = \frac{\text{Raumwinkel(Wolke)}}{\text{Raumwinkel(Blauer Himmel)} + \text{Raumwinkel(Wolke)}} \,.$$

Dieser lässt sich einfach, aber nicht WMO-konform, in einen Bedeckungsgrad in Achtel umrechnen:

$$b_8 = 8 \cdot b_1 \,.$$

Die WMO gibt vor, dass nur ganze Achtel gemeldet werden, die durch Runden von b_1 auf ganze Zahlen erhalten werden können, jedoch unter der Maßgabe, dass 0 Achtel nur bei wolkenlosem Himmel und 8 Achtel nur bei vollständig bedecktem Himmel gemeldet werden. Die Vorgaben der WMO sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Vorgaben der WMO für Meldungen des Bedeckungsgrades in Achtel.

Achtel (gemeldet)	Achtel (berechnet oder beobachtet)
0	0
1	1 oder kleiner, aber nicht 0
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7 oder größer, aber nicht 8
8	8
9	nicht erkennbar aus meteorologischen Gründen (z. B. Nebel)
/	nicht erkennbar aus nicht-meteorologischen Gründen

Für die Analyse aus Abbildung 8 ergeben sich folgende Raumwinkelanteile:

	Raumwinkel	Anteil
Wolken	3,148 sr	50,13 %
Himmel	2,860 sr	45,54 %
Beides	0,063 sr	1,00 %
Sonne	0,024 sr	0,39 %
Maske	0,128 sr	2,04 %
Unbekannt	0,057 sr	0,90 %
Gesamt	6,280 sr	100,00 %

Die Raumwinkel erreichen in der Summe nicht den Wert $2\pi = 6{,}283\ldots$ für die gesamte Hemisphäre, da der Horizont an den Seiten des Bildes etwas außerhalb verläuft.

Aus diesen Werten ergibt sich zunächst

$$b_1 = \frac{3{,}148}{3{,}148 + 2{,}860} = 0{,}524\,,$$

woraus nach den WMO-Richtlinien ein Bedeckungsgrad von

$$b_8 = \text{rund}(8 \cdot 0{,}524)\ \text{Achtel} = 4\ \text{Achtel}$$

folgt. Es empfiehlt sich bei Messungen sicherlich, immer den rechnerischen Bedeckungsgrad mit einigen Nachkommastellen aufzuzeichnen, da die WMO-Rundung später vom Benutzer der Daten immer noch durchgeführt werden kann.

8 Kameraeinstellungen

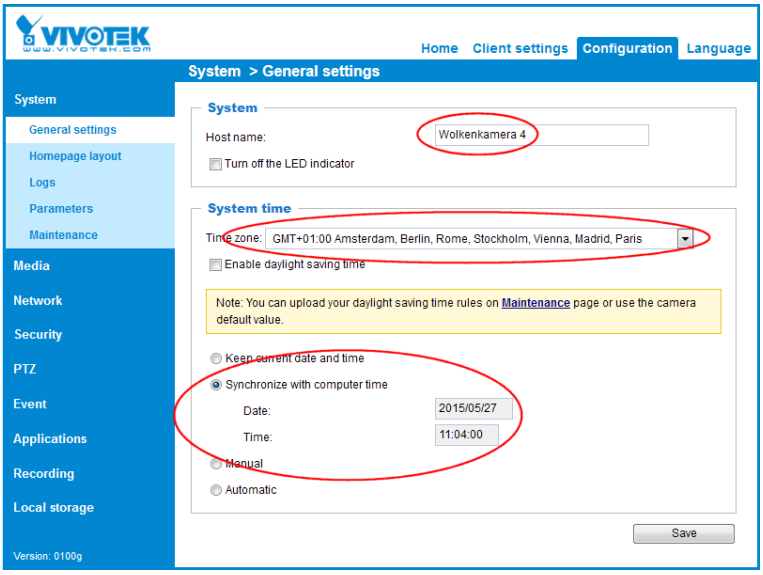
Um die Kameraeinstellungen zu ändern, muss mit einem Webbrowser auf das Webinterface der Kamera zugegriffen werden. Dazu wird die IP-Adresse der Kamera in den Browser eingegeben. Ist die IP-Adresse der Kamera nicht bekannt, kann diese mit dem Hilfsprogramm Installation Wizard 2 ermittelt werden.

Falls nach Zugangsdaten gefragt wird, ist der Benutzername `root` und das Passwort den Verantwortlichen bekannt.

In den folgenden Abbildungen sind die Änderungen gegenüber dem Lieferzustand rot markiert.

8.1 Allgemein

Die Kamera sollte einen eindeutigen Namen haben. Die Uhrzeit wird später bei der Aufzeichnung nicht verwendet, aber es schadet sicher nicht, sie korrekt einzugeben.



8.2 Weißabgleich

Der Weißabgleich ist wichtig für die Bilderkennung anhand der RGB-Farbwerte und sollte nicht automatisch erfolgen, sondern manuell eingestellt werden. Leider unterscheiden sich die beiden älteren Kameras Nr. 1 und 2 technisch etwas von den beiden neueren Nr. 3 und 4. Um zu möglichst gleichen Bildern zu kommen, müssen die beiden Parameter für den Weißabgleich daher unterschiedlich gesetzt werden.

In einer 1. Einsatzphase (am Wettermast bis August 2015 sowie auf den LEX 2014 und 2015) wurde folgender Weißabgleich gewählt:

	Kamera 1 und 2	Kamera 3 und 4
RGain:	65	75
BGain:	0	3

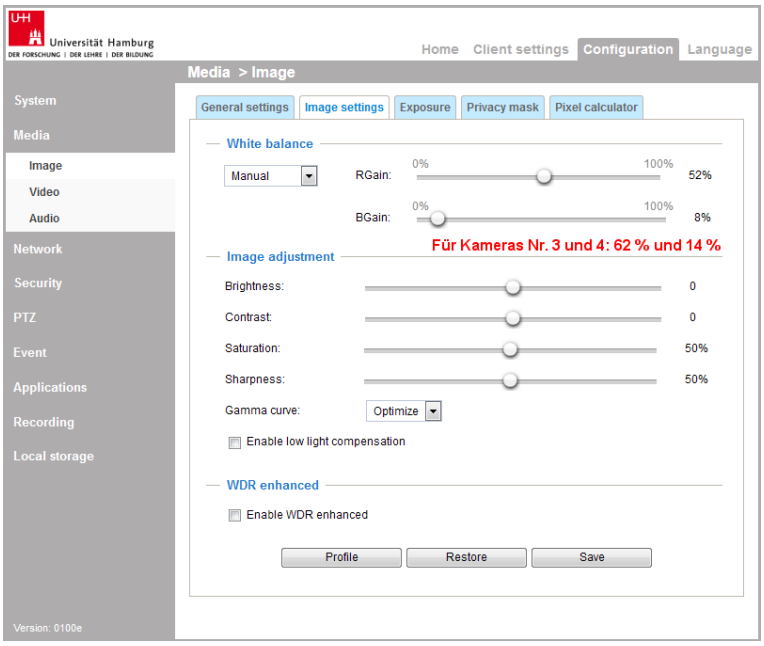
In einer 2. Einsatzphase (am Wettermast ab 27. August 2015) wurde der Weißabgleich dem der Universität Oldenburg angeglichen, die ebenfalls eine FE8174V einsetzt. Dieser Weißabgleich enthält weniger Rot und wirkt dadurch natürlicher und dem mit dem Auge betrachteten Himmel ähnlicher:

	Kamera 1 und 2	Kamera 3 und 4
RGain:	48 (52)	62
BGain:	10 (8)	14

Die Werte für die Kameras 3 und 4 sowie die in Klammern stehenden Werte für die Kameras 1 und 2 erhält man durch eine Kalibrierung der Kameras in einer ULBRICHT-Kugel mit einer Lampe, die weißes (natürliches) Tageslicht abgibt. Zum Einsatz kommt eine Kompaktleuchtstoffröhre (Energiesparlampe) MEGAMAN WL130 (Lichttemperatur 6500 K, Ra 92, 1620 Lumen, 30 W), die vor die Lichteinlassöffnung gehalten wird, während sich die Kamera etwa mittig in der ULBRICHT-Kugel befindet. Die Kamera darf dabei nicht überblendet werden (durch waagerechte Linien im Bild erkennbar). Es darf kein oder nur unwesentlich Fremdlicht in die Kugel gelangen. Bei der Kalibrierung wird der Weißabgleich von der Kamera automatisch bestimmt, die Werte dann jedoch fest gespeichert:

1. Weißabgleich auf *Auto* stellen.
2. Warten, bis sich das weiße bzw. graue Bild eingestellt hat.
3. Bei *Fix current values* auf *On* klicken.
4. Unten auf *Save* klicken.
5. Die Registerseite *Image settings* verlassen und erneut aufrufen.
6. Weißabgleich auf *Manual* stellen. Werte können abgelesen werden.

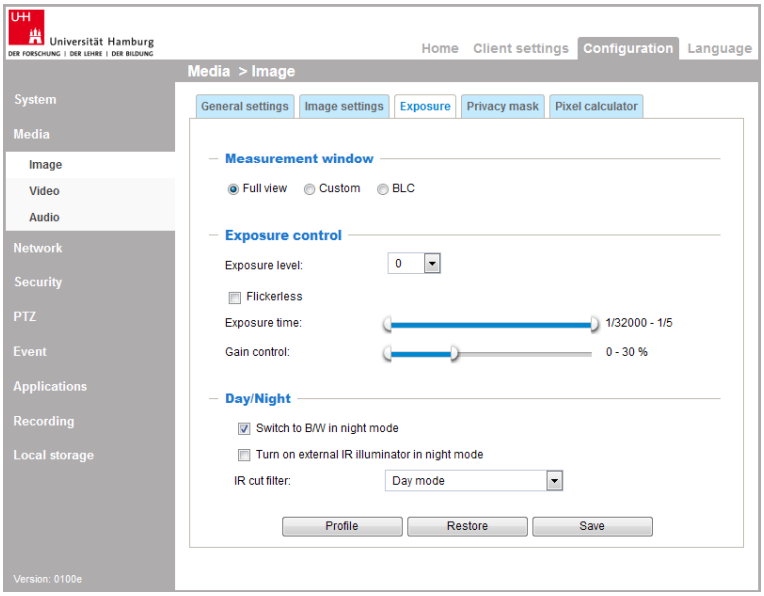
Kleine Modifikationen waren nötig für die älteren Kameras 1 und 2, um ein möglichst identisches Bild wie die neueren Kameras 3 und 4 erhalten. Dazu wurden die Kameras 2 und 3 direkt nebeneinander auf dem Geomatikum montiert und der Weißabgleich der Kamera 2 manuell angepasst. Daraus ergeben sich die vor den Klammern stehenden Werte in der Tabelle. Diese sollten verwendet werden. Ein exakt gleiches Bild liefern alte und neue Kameras dennoch nicht. Dies ist bei der Bildauswertung zu berücksichtigen.



8.3 Weitere Bildeinstellungen

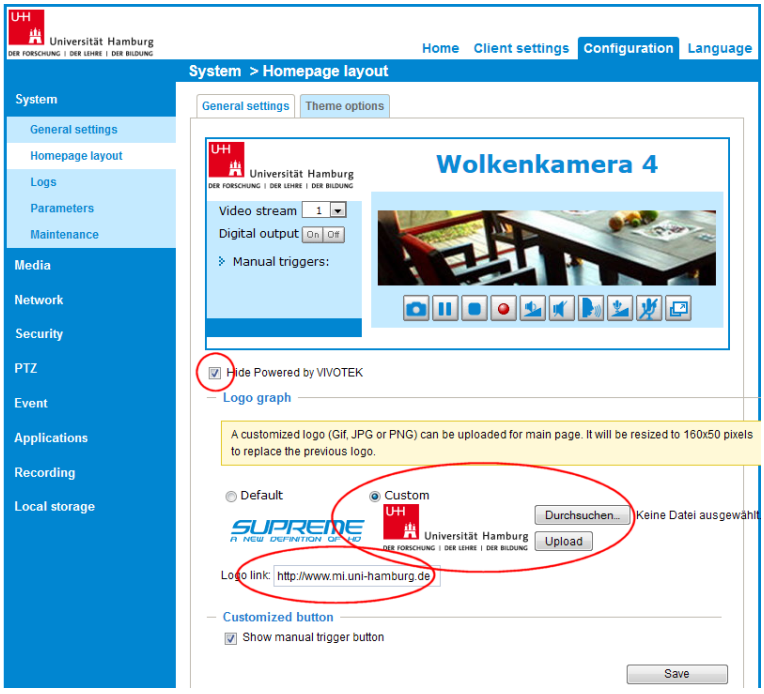
In der 1. Einsatzphase blieben alle anderen Kameraeinstellungen, die das Bild betreffen, unverändert gegenüber dem Ausliefungszustand. In der 2. Einsatzphase wurden einige Parameter denen der Universität Oldenburg angeglichen:

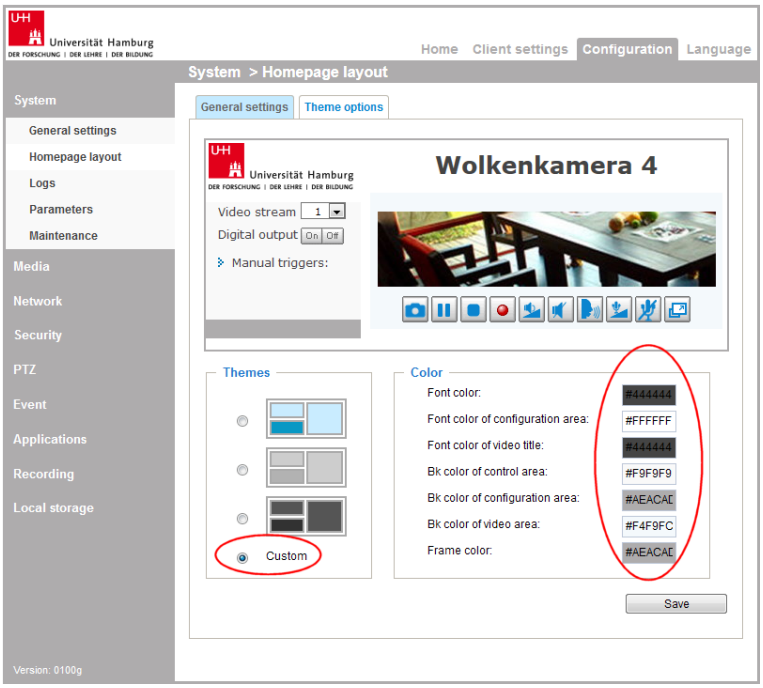
	1. Phase	2. Phase
Brightness:	−5	0
Low light compensation:	ein	aus
Exposure time:	1/32000–1/30	1/32000–1/5
Gain control:	0–100 %	0–30 %
IR cut filter:	Auto mode	Day mode



8.4 Layout

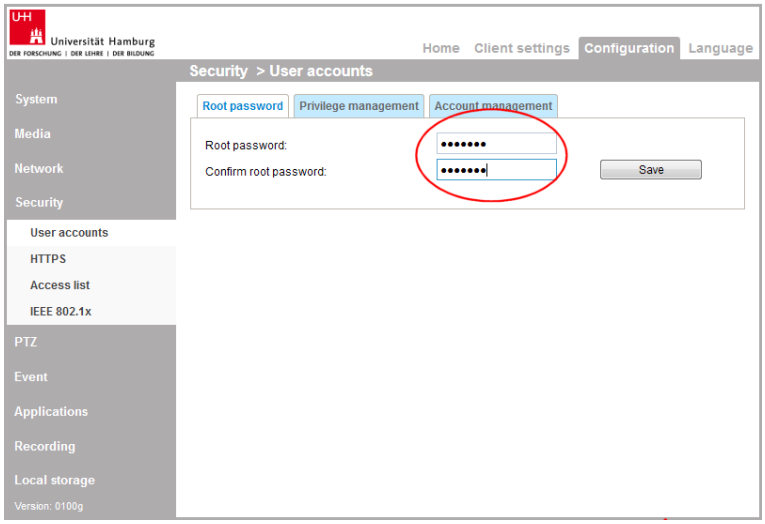
Die folgenden Einstellungen sind optional und beziehen sich nur auf das Erscheinungsbild der Benutzerschnittstelle im Browser.





8.5 Sicherheit

Der Zugriff auf die Kamera sollte mit einem Passwort geschützt sein. Es ist zu beachten, dass die Kamera nicht nur Bilder, sondern auch eine Tonübertragung liefert.



9 Montage

9.1 Aufbau

Die Kamera sollte horizontal und eingenordet aufgestellt werden, zudem möglichst hoch, um wenig Hindernisse aus der Umgebung im Bild zu haben, trotzdem aber mit wenig Aufwand erreichbar, um sie bei Bedarf reinigen zu können. In der Regel ist die Kamera bereits auf eine

spezielle Halterung geschraubt, die mit drei Justierschrauben genau nivelliert werden kann. Diese Nivellierung kann mit einer kleinen Wasserwaage oder durch Peilung des Horizonts erreicht werden.

Für eine exakte Ausrichtung empfiehlt sich ein Tag mit diffuser Bedeckung, so dass die Sonnenscheibe scharf und ohne Überblendung im Bild sichtbar ist. Im Aufzeichnngsprogramm kann dazu der berechnete Ort der Sonne als kleiner gelber Punkt in das Bild eingeblendet werden. Punkt und Sonne sollten dann in Deckung gebracht werden. Dasselbe ist während einer klaren Nacht auch mit dem Mond möglich.

Die Justierhalterung kann auf ein senkrechtes Rohr mit Durchmesser von 38 bis 48 mm montiert werden (für dünnere Rohre werden längere M8-Schrauben benötigt).

9.2 Werkzeug

Die komplette Montage der Kamera erfordert folgende Werkzeuge:

- mitgelieferter Innensechsrund-Schlüssel (Torx®-TR) TR15 **mit Loch** (Kameraabdeckung, innere Sicherungsschraube)
- Innensechskant-Schlüssel (Inbus®) 3 mm (Befestigungsring auf Justierhalterung)
- Innensechskant-Schlüssel (Inbus®) 6 mm (Fixierung an Gerüstrohr)
- Maulschlüssel 10 mm (Justierschrauben)
- Isolierband (3M Scotch® 35) (Fixierung Kabel und Spannungswandler-Box)

Ist die Kamera bereits auf der Halterung befestigt, so genügen für den Aufbau der Innensechskant 6 mm und das Klebeband und für die Nivellierung der Maulschlüssel 10 mm.

9.3 Anschluss

Die Kamera ist mit einem LAN-Kabel und einem Stromversorgungskabel ausgestattet (je 25 m). Das LAN-Kabel wird an einen Router oder Switch des lokalen Netzwerks angeschlossen. Die Stromversorgung muss über ein 24 V-Netzteil erfolgen.

9.4 Software

Zum Finden der Kamera im Netzwerk (Ermittlung der automatisch bezogenen IP-Adresse) empfiehlt sich das Programm *Installation Wizard 2* von der mitgelieferten VIVOTEK-CD (v1.10).

Die Programmierung der Kamera erfolgt über einen Web-Browser, z. B. *Mozilla Firefox*. Um auch den Live-Stream ansehen zu können, muss *Apple QuickTime* installiert sein.

Das aktuelle Bild wird abgerufen mit der URL

```
http://192.168.1.62/cgi-bin/viewer/video.jpg
```

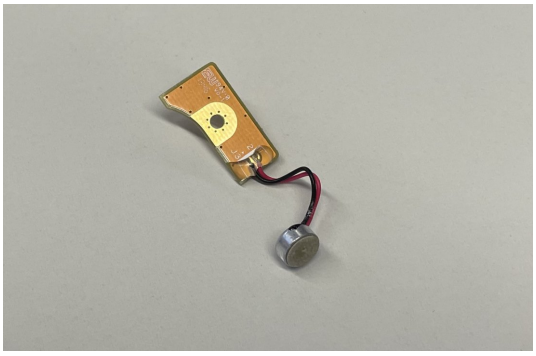
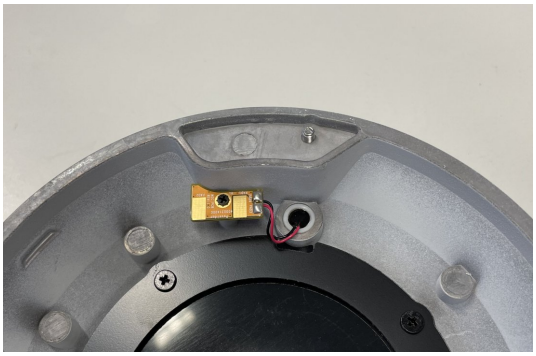
Dabei ist natürlich die entsprechende IP-Adresse der Kamera zu verwenden.

Die Aufzeichnung der Kamerabilder erfolgt mit der Software *WetterCam* (`wettercam.exe`) (Eigenentwicklung). Zum Packen der Bilder eines Tages wird ein geeignetes ZIP-Programm benötigt, z. B. `zip32.exe` von M. ADLER et al. (v2.2 von 1997).

Für die Erstellung von Videosequenzen aus den Einzelbildern eignet sich *FFmpeg* von F. BELLARD et al. (vSVN-r18709 von 2009). Um die Einzelbilder vorher zu verkleinern, kann `mogrify.exe` aus dem Softwarepaket *ImageMagick* verwendet werden (v6.9.1.–7). Da *FFmpeg* die Bilder mit fortlaufender Nummerierung erwartet, kann das Programm `copyalphanum.exe` (Eigenentwicklung) verwendet werden, um aus den Einzelbildern mit Originaldateinamen Kopien mit fortlaufender Nummerierung zu erhalten. Die folgenden Befehle kopieren die Bilder vom 27. Juni 2015 in den Ordner `img`, verkleinern sie auf 25 % und erstellen ein MP4-Video:

```
copyalphanum -c Image_20150627*.jpg img
mogrify -scale 25% img\File*.jpg
ffmpeg -sn -r 8 -b 800k -y -i img\File%d.jpg -vcodec libx264 Video.mp4
```

9.5 Austausch der Haube

Die transparente Kunststoffhaube vergilbt beim dauerhaften Außeneinsatz nach etwa 2 bis 3 Jahren und sollte ausgetauscht werden. Als Ersatzteil gibt es vom Hersteller die gesamte obere Haube inklusive dem weißen Gehäuse. Außerdem ist ein Päckchen Trockenmittel enthalten (erst auspacken, wenn das Silikon des Soundmoduls ausgehärtet ist (s. u.) und die neue Haube aufgesetzt werden kann!).

Das Soundmodul muss von der alten in die neue Haube umgebaut werden. Dieses wird mit etwas Silikonkautschuk von innen fixiert und abgedichtet. Zum Lösen der kleinen Kontaktplatine des Soundmoduls wird ein kleiner Kreuzschlitzuhrmacherschraubendreher benötigt.