

Kontaktlose Messung des Blutsauerstoffs mithilfe einer Kamera und Frequenzmodulation unterschiedlicher Wellenlängen

Noncontact Monitoring of Blood Oxygen Saturation Using Camera and Dual-Wavelength Frequency Modulation

Projektseminar von Tobias Steinbach

Tag der Einreichung: 1. April 2024

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Christoph Hoog Antink, KIS*MED
Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Elektrotechnik
und Informationstechnik

KIS*MED - Künstlich
Intelligente Systeme der
Medizin

Studiengang Medizintechnik



Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Implementierung	4
3	Evaluation	6
4	Ergebnisse	9

1 Aufgabenstellung

Dieses Projekt befasst sich mit der Realisierung eines neuen Ansatzes zur kontaktlosen Erfassung des Sauerstoffgehalts im Blut des menschlichen Körpers. Hierzu wird ein bereits existierendes Verfahren [1] modifiziert. Basis für dieses System bildet die Absorptionsrate von sauerstoffarmen und sauerstoffreichen Hämoglobin bezüglich Lichts unterschiedlicher Wellenlängen. Während in menschlichem Blut sauerstoffreiches Hämoglobin rotes bzw. oranges Licht weniger absorbiert als sauerstoffarmes Hämoglobin ist das Verhältnis im infraroten Bereich umgekehrt. In dem bekannten kontaktlosen Verfahren wird mithilfe oranger und infraroter Lichtquellen die Haut der Testperson bestrahlt und mithilfe einer Kamera das reflektierte Licht eingefangen. Aus den entstehenden Videodaten kann dann die unterschiedliche Absorption des Lichts der jeweiligen Wellenlängen errechnet werden. Bisher wurde hierfür ein Zeitmultiplex verwendet, bei dem die beiden Lichtquellen im Wechsel an und ab geschaltet werden. [1]

Stattdessen wird nun ein Frequenzmultiplex verwendet. Die Lichtquellen sind gleichzeitig aktiv, während sie jeweils mit einer unterschiedlichen Frequenz moduliert werden. Da eine Kamera mit einer Bildrate von 20 Bildern pro Sekunde verwendet wird, liegen die Modulationsfrequenzen im Bereich von 1 bis 10 Hertz (Hz), um Unterabtastung zu vermeiden. Die Einführung des Frequenzmultiplex ist motiviert durch eine höhere Datenrate und das Wegfallen der Synchronisation. Da im Zeitmultiplex beide Lichtquellen abwechselnd aktiv sind, kann immer nur nach Beendigung beider Phasen ein Wert errechnet werden. Im Frequenzmultiplex ist dies nicht der Fall, es können kleinere Intervalle gewählt werden. Außerdem bringt ein Zeitmultiplex die Notwendigkeit einer Synchronisation mit sich. Zur Auswertung der Daten muss bekannt sein, zu welchem Zeitpunkt welche Quelle aktiv ist. Dieser Aufwand entfällt durch den Einsatz des Frequenzmultiplex. Die Herausforderung besteht darin, trotz simultaner Verwendung beider Lichtquellen ein gutes Signal für beide Wellenlängen zu erhalten.

2 Implementierung

Das Verfahren wurde in unabhängigen Teilen realisiert. Zum einen wird ein Arduino Uno[2] zur Erzeugung von zwei Pulsweitenmodulationssignalen (PWM) verwendet. Die jeweiligen Signale werden benötigt um über je einen Transistor ein Array von Leuchtdioden (LED) anzusteuern. Im zweiten Teil der Implementierung wird die Reflektion der ausgesendeten Lichtwellen durch eine Kamera eingefangen und an einem Computer ausgewertet. Der Aufbau ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. Alle Bauteile werden mit einer 12 V Spannungsquelle versorgt.

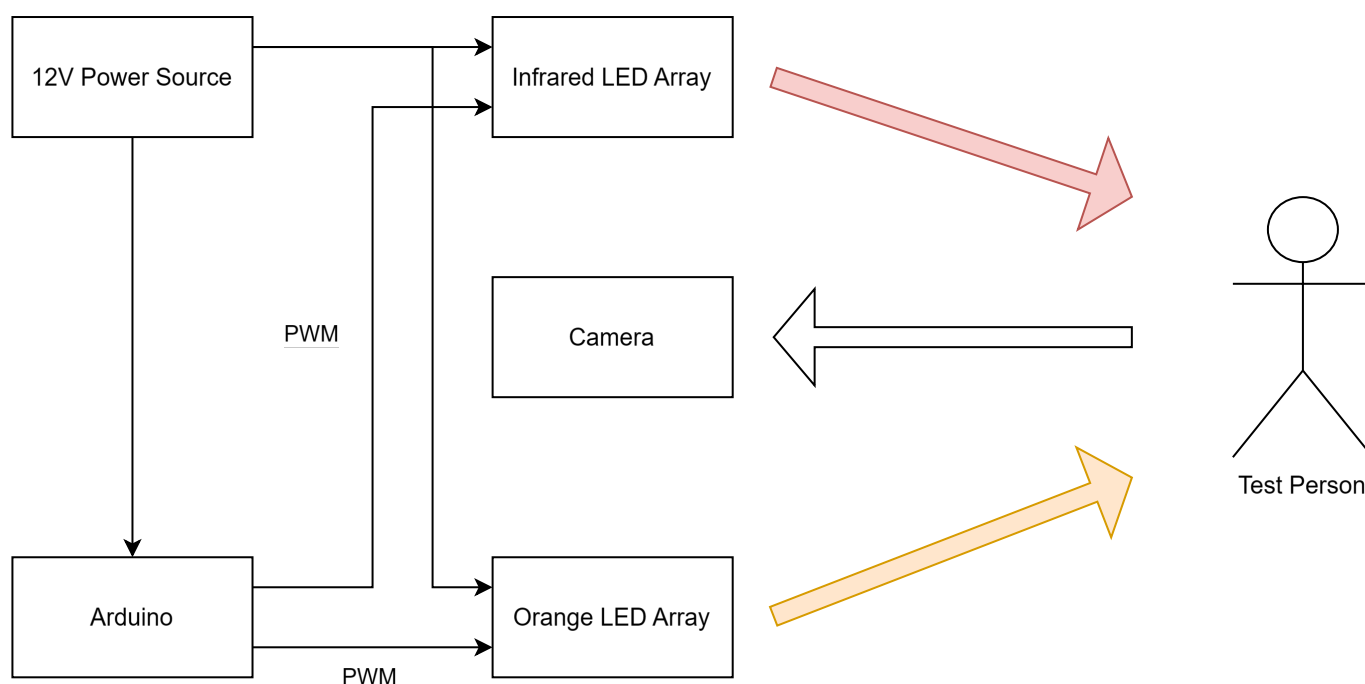


Abbildung 2.1: Aufbau zur Realisierung des Projekts

Zur Realisierung der PWMs werden Timer des Arduinos benutzt. Diese werden so konfiguriert, dass sie in den richtigen Zeitabständen zur Erzeugung eines Sinussignals einen Interrupt auslösen. Hierfür wird zunächst die Anzahl der Schritte festgelegt, welche die gewünschte Sinuskurve haben soll. In der Realisierung hat sich eine Aufteilung in 100 Schritte als ausreichend erwiesen. Die Timer werden über ihren Prescaler und das Compare-Register so eingestellt, dass sie genau bei einem 100. Teil der Periode des zu erzeugenden Signals einen Interrupt auslösen. Hierfür wird der Prescaler an die gewünschte Frequenz angepasst, da die Zählweite der Timer nicht für alle Frequenzen breit genug ist. Bei jeder Auslösung eines Interrupt wird eine Zählvariable erhöht, welche die aktuelle Stelle in der Periode repräsentiert. Dieser Wert wird auf den zur

Erzeugung des Sinuswertes nötigen Duty-Cycle der PWM-Ausgabe abgebildet. Ist der letzte Schritt in der Periode erreicht, wird der Zähler zurückgesetzt. Damit werden zwei unabhängige digitale Sinussignale in der gewünschten Frequenz erzeugt. Für die Frequenzen wird je ein eigener Hardware-Timer verwendet.

Als Lichtquellen steht ein Array mit infraroten LEDs der Wellenlänge 940 nm zur Verfügung, ein Array mit orangen Dioden der Wellenlänge 605 nm wurde im Zuge des Projektseminars gebaut. Der realisierte Schaltplan findet sich in Abbildung 2.2. Die Schaltung besteht aus 16 LEDs, von welchen je vier mit einem Vorwiderstand parallel geschaltet sind. Um die Helligkeit der LEDs regulieren zu können, wurde ein Potentiometer eingefügt. Gesteuert werden die LEDs über einen Bipolartransistor. Dieser ist über einen Widerstand mit dem PWM-Pin des Arduino verbunden.

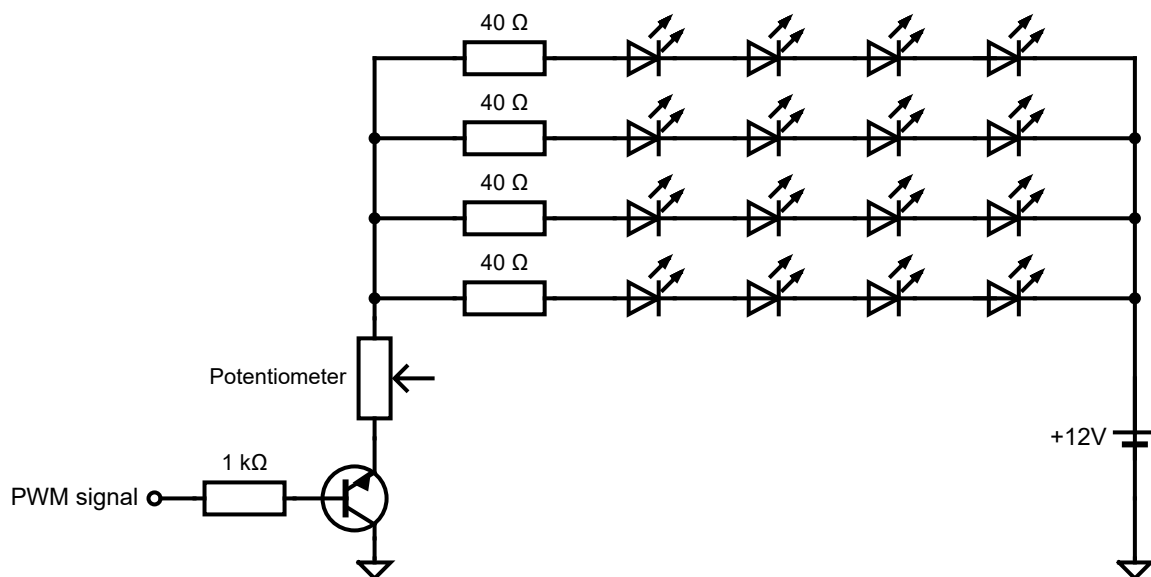


Abbildung 2.2: Schaltplan des erstellten LED-Arrays

Mithilfe des Programms SpinView[3] können durch die Kamera BlackFly der Firma FLIR[4] Videosamples aufgenommen werden, während die beiden Lichtquellen aktiv sind. Zur Auswertung dieser Daten existiert ein Python Programm, mit welchem die Frequenzanalyse an aufgezeichneten Videodateien durchgeführt werden kann. Hierfür benötigen die Videodateien die Namensgebung „IR-X1_OR-X2“, wobei „X1“ durch die Modulationsfrequenz des Infrarotlichts und „X2“ die Modulationsfrequenz des orangen Lichts ersetzt wird. Das Programm führt automatisch eine Analyse aller Videodateien eines gegebenen Verzeichnisses durch und speichert die Ausgabedaten ebenso automatisch. Zum einen wird mit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) eine Frequenzanalyse über den Durchschnittswert aller Pixel eines Frames des gesamten Videos gebildet und als Plot über den Frequenzbereich aufgetragen. Zum anderen wird für die gegebenen Modulationsfrequenzen ein Filter auf jeden Pixel des Videobildes angewendet, sodass pro Video für die beiden verwendeten Frequenzen ein Standbild mit den Frequenzwerten der Pixel erstellt werden kann. Zu Evaluierung der Signalqualität kann ein Topologie-Plot mit den Signalstärken der einzelnen Videosamples erzeugt werden. Diese drei features lassen sich über globale Variablen im Program ein- und ausschalten.

3 Evaluation

Zur Evaluation der Implementierung werden Videosamples mit der Reflektion eines menschlichen Unterarms mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen erstellt und ausgewertet, um die Verwendbarkeit unterschiedlicher Frequenzkombinationen einschätzen zu können. Hierbei wurden erschöpfend alle Kombinationen der beiden Signale von 1 bis 10 Hz verwendet, ausgeschlossen der mit gleichen Frequenzen. Auf Basis dieser Daten soll eine qualitative und quantitative Einschätzung der Implementierung durchgeführt werden. Alle Aufnahmen werden unter annähernd störfreien Bedingungen erstellt. Hierfür werden möglichst alle Lichteinflüsse außer den beiden Lichtquellen abgedunkelt. Außerdem wird für jedes Sample ein möglichst identischer Aufbau verwendet, bei dem das Testobjekt in etwa einem halben Meter Entfernung zu Kamera und Lichtquellen platziert wird. Zur Einschätzung der Qualität der erzeugten Aufnahmen wird zunächst ein Referenzbild für beide Lichtquellen aufgenommen, bei dem nur die jeweilige Quelle konstant eingeschaltet ist. Die Aufnahmen finden sich in Abbildung 3.1. Zudem wird für jede Kombination der Modulationsfrequenzen eine Videoaufnahme von 5 Sekunden Dauer erstellt. Für die gegebenen Frequenzen ist das ausreichend um eine Frequenzanalyse möglich zu machen. Die Kamera verwendet eine Belichtungsdauer von 30 ms um die gewünschte Bildrate von 20 Bildern pro Sekunde (FPS) erreichen und gleichzeitig genug reflektiertes Licht einfangen zu können. Beispielhaft sind folgend die Auswertungen zweier Videosamples dargestellt. Hierfür wurden repräsentativ ein Ergebnis mit guter Qualität (s. Abbildung 3.2, 1 Hz infrarot und 4 Hz orange) ausgewählt, sowie eines mit minderer (s. Abbildung 3.3, 2 Hz infrarot und 8 Hz orange).

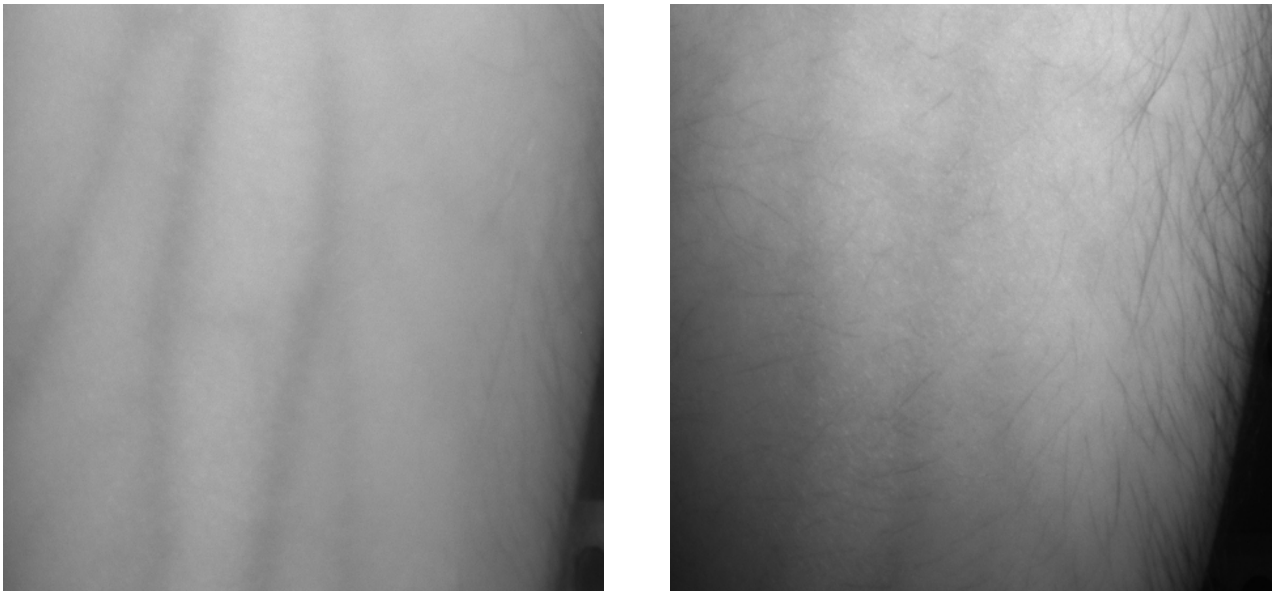


Abbildung 3.1: Referenzbilder mit rein infrarotem Licht (links) und rein orangem Licht (rechts)

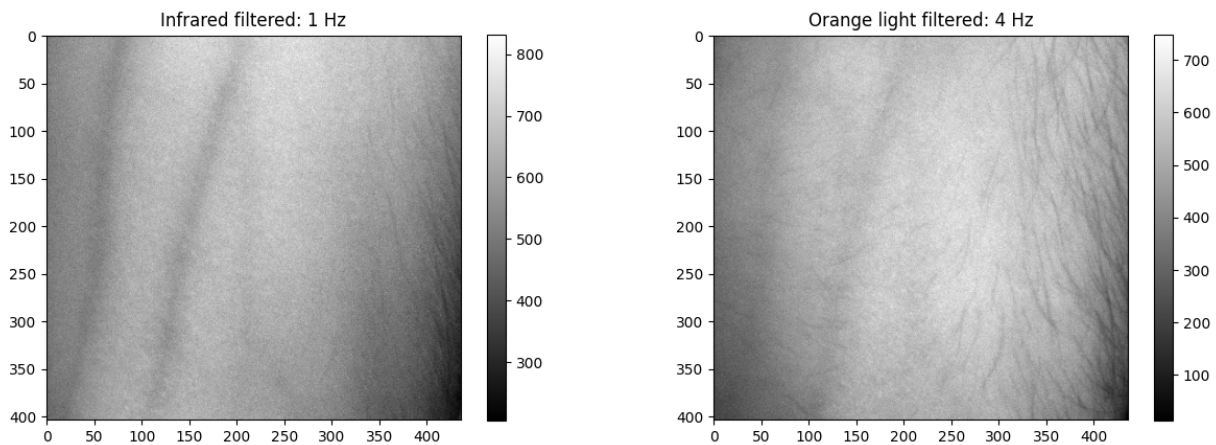


Abbildung 3.2: Nach Modulationsfrequenz gefilterte Bilder des gleichen Samples

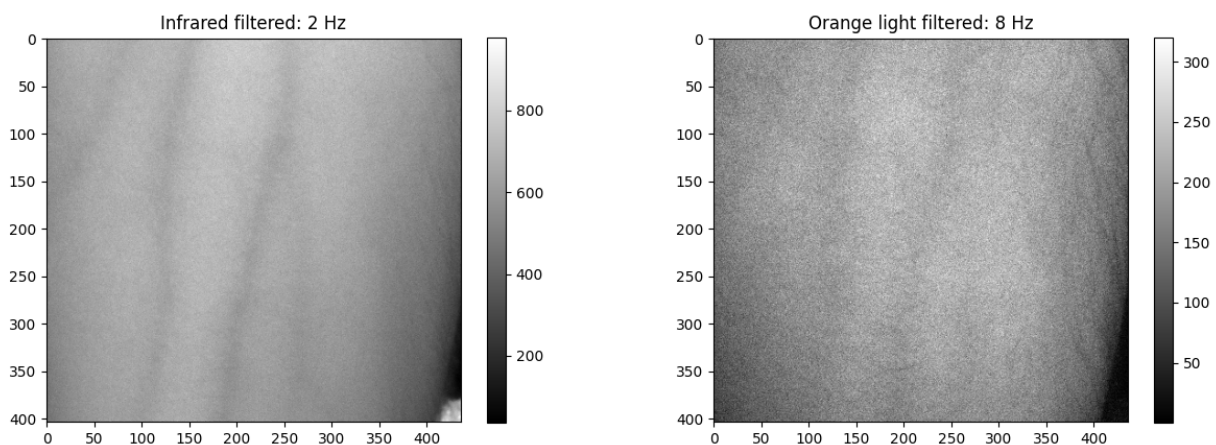


Abbildung 3.3: Nach Modulationsfrequenz gefilterte Bilder des gleichen Samples

In den Referenzbildern ist ebenso wie in den gefilterten deutlich zu erkennen, dass das infrarote Licht die Adern in der Haut deutlich mehr hervorhebt als das orange Licht. Zudem kann man beobachten, dass das Bild bei einer höheren Frequenz ein wenig verrauscht ist. Optisch ist zwischen den Auswertungen bei niedrigen Frequenzen kaum ein Unterschied zu den Referenzbildern festzustellen, was für einen Erfolg der verwendeten Methode spricht. Nachfolgend (Abbildung 3.4) werden die Frequenzplots der beiden Aufnahmen gezeigt, hier sind die Spitzen bei den verwendeten Modulationsfrequenzen deutlich zu erkennen.

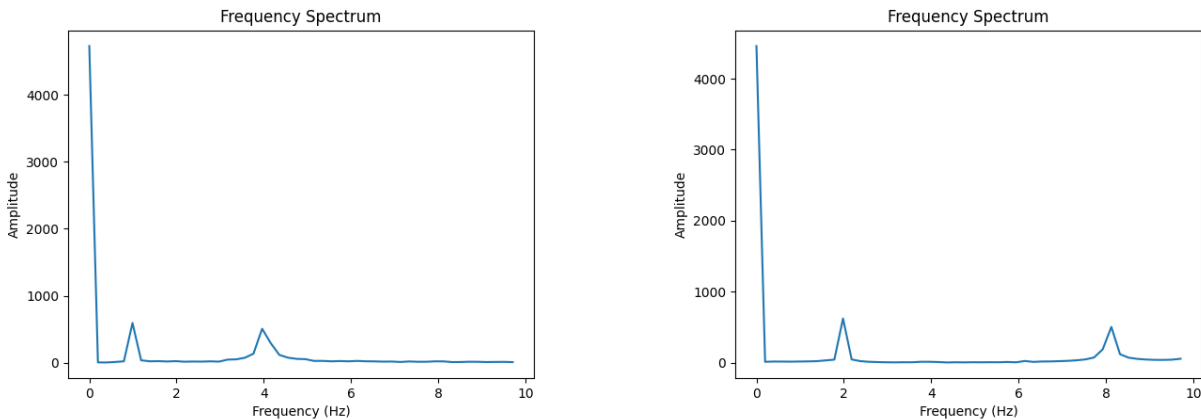


Abbildung 3.4: Frequenzanteile der Samples mit 2 Hz infrarot und 4 Hz orange bzw. 2 Hz infrarot und 8 Hz orange

Um nun die Ergebnisse auch quantitativ zu evaluieren werden die FFT Werte bei der Modulationsfrequenz jedes Videosamples in einem Plots zusammengeführt. Der Wert der FFT an der Stelle der Modulationsfrequenz (die Spitze im Frequenzplot) wird als Indikator für die Qualität des eingefangenen Signals verwendet. Hierfür werden auf den Achsen die verwendeten Modulationsfrequenzen aufgetragen, während die Datenpunkte durch die FFT Werte bestimmt werden. Die resultiert in zwei Topologie-Plots (s. Abbildung 3.5), je einer für die infraroten und einer für die orangen Anteile.

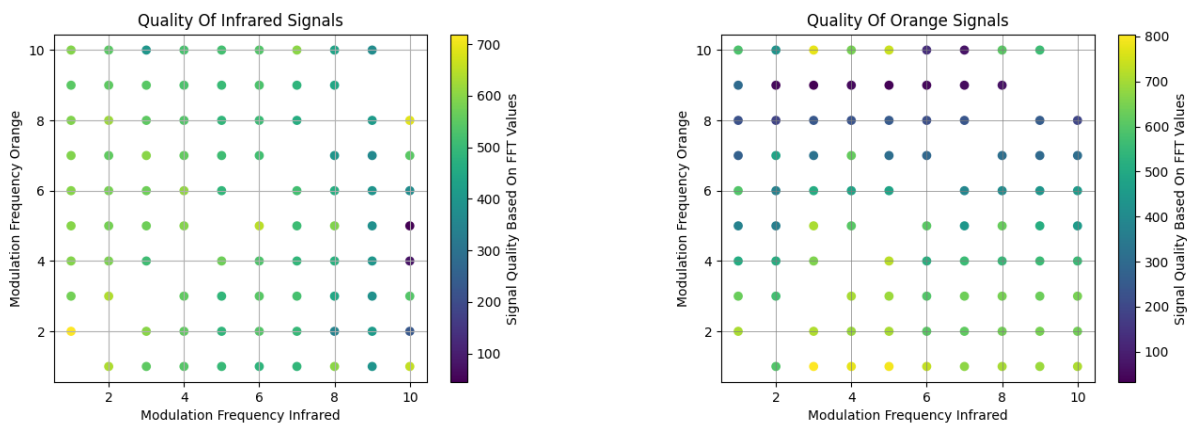


Abbildung 3.5: Topologie der erstellten Videosamples bezüglich der Signalstärke in der betrachteten Frequenz (für infrarot links und für orange rechts)

Ein Sample (9 Hz infrarot und 10 Hz orange) wird für diese Auswertung als Ausreißer eingestuft und entfernt, da dessen Werte deutlich nach oben ausschlagen und Trends in den restlichen Daten überschatten würden. Die Diagonale hält keine Daten, da eine Modulation mit der gleichen Frequenz nicht sinnvoll ist. Generell lässt sich feststellen, dass die Signalstärke bei niedrigeren Frequenzen der betrachteten Lichtquellen höher ist. Jedoch sind absolut betrachtet fast alle Signale der verschiedenen Modulationen von ausreichender Qualität. Dies ist anhand der erstellten Standbilder ersichtlich.

4 Ergebnisse

In diesem Projektseminar wir erfolgreich nachgewiesen, dass die kontaktlose Messung von reflektierten Lichtwellen mit Frequenzmodulation möglich ist. Es liegt eine Möglichkeit zur Erzeugung zwei simultanen PWMs mit Frequenzen bis zu 20 Hz vor. Die Auswertung bezieht sich auf Frequenzen bis zu 10 Hz, da die verwendete Kamera auf 20 FPS limitiert ist und bei Frequenzen höher als die Hälfte der Samplerate das Abtasttheorem verletzt werden würde. Ebenso liegt ein Pogramm zur Auswertung erstellter Videosamples vor. Außerdem wurde im Zuge des Projektseminars eine Testreihe von Videosamples mit den vollständigen Kombinationen von 1 Hz bis 10 Hz angefertigt, welche für zukünftige Projekte verwendet werden kann. Um das Projekt weiterzuführen und ein geschlossenes System zu entwickeln, könnte man die Programmteile verbinden und den Arduino von dem verwendeten Computer aus ansteuern. Auch wäre es möglich, über die API des Aufnahmeprogramms direkt auf die Kamera zuzugreifen und so dauerhafte Echtzeitmessungen vorzunehmen. Zur Auswertung des Blutsauerstoffgehalts aus den Frequenzanalysen fehlt noch ein entsprechender Programmteil. Ein weiterer Ansatz könnte sein, den Einfluss der verwendeten Modulationsfrequenz zu untersuchen. Da die erstellten Samples unter Idealbedingungen produziert wurden, ist das Signal bei den meisten verwendeten Frequenzen gut genug. Hierfür müsste der Aufbau unter Störbedingungen getestet werden, um eine Empfehlung über die Verwendung bestimmter Frequenzen aussprechen zu können. Ebenso unbeachtet bleibt in diesem Seminar der Einfluss der Hautfarbe der Testperson. Ein dunklerer Hautton könnte die Messung negativ beeinflussen, da sichtbares Licht stärker absorbiert und infrarotes Licht stärker reflektiert wird. Unten findet sich beispielhaft ein im Rahmen des Projektseminars erstelltes gefiltertes Bild einer tätowierten Hautstelle. Hier ist gut erkennbar, dass die Reflektion der gefärbten Hautstelle sich von der im restlichen Bild stark unterscheidet. (s. Abbildung 4.1).

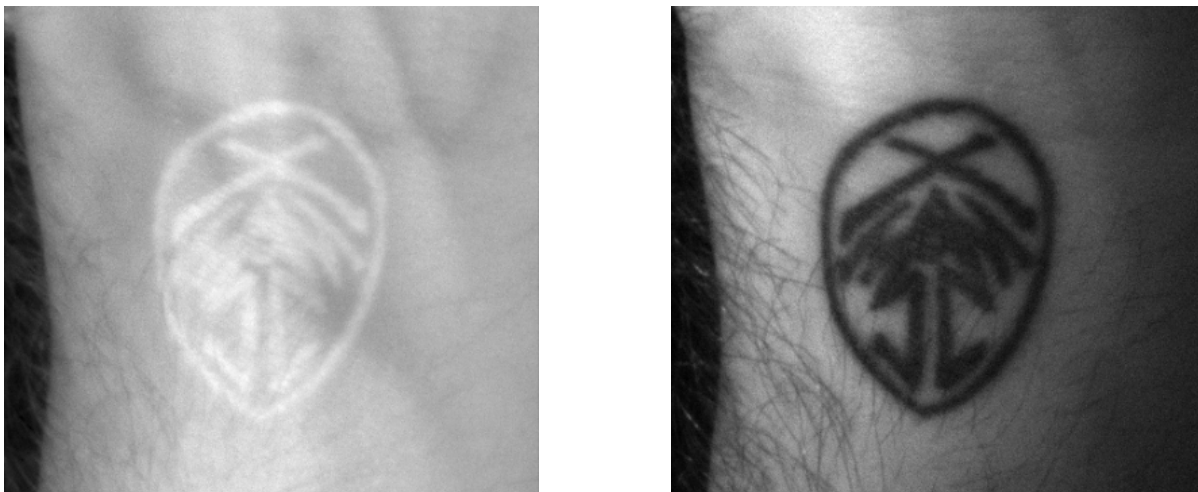


Abbildung 4.1: Beispielhafte gefilterte Bilder einer Aufnahme einer tätowierten Hautstelle (links mit infrarotem, rechts mit orangem Licht)

Literatur

- [1] Dangdang Shao, Chenbin Liu, Francis Tsow u. a. „Noncontact Monitoring of Blood Oxygen Saturation Using Camera and Dual-Wavelength Imaging System“. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 63.6 (2016), S. 1091–1098. DOI: 10.1109/TBME.2015.2481896.
- [2] *Arduino Uno Guide*. ARDUINO. URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno> (besucht am 27.03.2024).
- [3] *Spinnaker SDK*. Teledyne FLIR LLC. URL: <https://www.flir.de/products/spinnaker-sdk/> (besucht am 27.03.2024).
- [4] *Blackfly S USB3*. Teledyne FLIR LLC. URL: <https://www.flir.de/products/blackfly-s-usb3/> (besucht am 27.03.2024).