

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul



Ingelfingen | Dresden | Dortmund | Charlotte (USA) | Suzhou (China)

Verbundprojekt: Kassettenbasiertes Analysensystem zur kontinuierlichen Überwachung physiologischer Blutparameter am Patienten „Click & Go“

Kurztitel: Click & Go

Partner: NMI Naturwissenschaftliches und medizinisches Institut an der Universität Tübingen, Reutlingen
Oechsler AG, Ansbach
G. Rau GmbH & Co. KG, Pforzheim
As electronics GmbH, Großbettlingen
Sense2care, Reutlingen

Förderkennzeichen: 16SV5117

Bürkert Projektleiter: Josip Martis
Bürkert Werke GmbH; Keltenstraße 10; 74653 Ingelfingen

Laufzeit: 01.10.2010 – 30.06.2013

Berichtsdatum: 13. Dezember 2013

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

Inhaltsverzeichnis

1	Vorhabensziel	3
1.1	Ziel Gesamtvorhaben	3
1.2	Aufgabenstellung für das Teilprojekt	3
1.3	Zeitplan.....	5
2	Durchführung	6
2.1	Konzeptphase.....	6
2.1.1	Antriebsarten	6
2.1.2	Konzeption lösbare Verbindung Messmodul zum Disposable	7
2.1.3	Auslegung Heizelement für Messmodul	8
2.1.4	Aufbau Messmodul mit Integration der Elektronik	8
2.1.5	Hybridkabel für die elektrische und pneumatische Verbindung	9
2.1.6	Aufbau Steuermodul	10
2.1.7	Stechfunktion für Kalibrierbeutel	11
2.1.8	Anzeigemodul.....	11
2.2	Umsetzung	12
2.2.1	CAD Arbeiten.....	12
2.2.3	Vorabuntersuchungen.....	13
2.2.3.1	Dimensionierung Heizelement	13
2.2.3.2	Dimensionierung Schlauchdurchmesser im Hybridkabel.....	14
2.3	Testphase.....	14
2.3.1	Dichtheit Gesamtsystem: Messmodul, Sensorkassette, Hybridkabel, Steuermodul.....	14
2.3.2	Handhabung des Geräts	16
2.4	Einsatz der Fördermittel.....	17
3	Ergebnisse	17
4	Verwertbarkeit der Ergebnisse	18
4.1	Antriebskonzepte für Einwegsysteme	18
4.2	Hybridkabel für mehrfach elektrische und pneumatische Verbindungen	18
4.3	Funktionsnachweis für einen pneumatisch betätigten und lösbaren Antrieb für eine Einwegkassette (Disposable).....	18
4.4	Realisierung eines System mit mechanischen, fluidischen, pneumatischen, elektronischen und sensorischen Elementen	19

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

1 Vorhabensziel

1.1 Ziel Gesamtvorhaben

Das Verbundvorhaben zielt darauf ab, ein vermarktungsfähiges kassettenbasiertes Analysesystem zur quasikontinuierlichen Überwachung des Säure-Basen-, Blutgas- und Elektrolyt-Status kritisch kranker Patienten zu realisieren. Herzstück des „Click & Go“ Analysesystems ist eine mikrofluidische Einweg-Sensorkassette, die alle wesentlichen Komponenten (elektrochemische Mikrosensoren, Mikrofluidik, Pumpe, Ventile und Kalibrierlösungen) beinhaltet. Diese Einweg Sensorkassette wird direkt am Patienten über vorhandene Schlauchsysteme eingesetzt. Die Messdaten der Sensorkassette werden zu einem Anzeige Modul bzw. zu einer Schnittstelle des Krankenhaus Informationssystems übertragen (**Bild 1**).

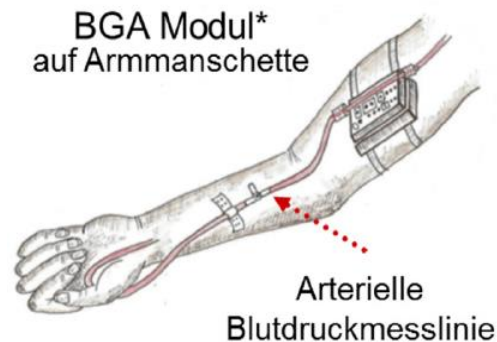


Bild 1: Blutgas - Analysemodul

1.2 Aufgabenstellung für das Teilprojekt

Bürkert führt im Rahmen des Teilprojekts die Konzipierung, Entwicklung und Erprobung von Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel – im folgenden Hybridkabel genannt- und Steuermodul durch.

Das Antriebs- bzw. Messmodul, im folgenden Messmodul genannt, dient zur Ansteuerung der in der Sensorkassette enthaltenen Ventile und der Pumpe. Außerdem muss das Messmodul eine Kontaktierung zur Sensorkarte herstellen, um die Sensorsignale abzugreifen. Das Disposable mit der angebrachten Sensorkarte wird nachfolgend vereinfachend als „Disposable“ bezeichnet.

Da das Messmodul mit dem Disposable direkt am Patientenarm angebracht ist, sind Maße und Gewicht begrenzt. Aus diesem Grund sind die Versorgungseinheiten wie Ventile, Kompressor und Auswertelektronik in einem weiteren, vom Patienten entfernten Steuermodul untergebracht. Beide Module sind über ein sogenanntes Hybridkabel verbunden, das mehrere Meter lang sein kann und die elektrischen und pneumatischen Verbindungen herstellt (**Bild 2**).

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

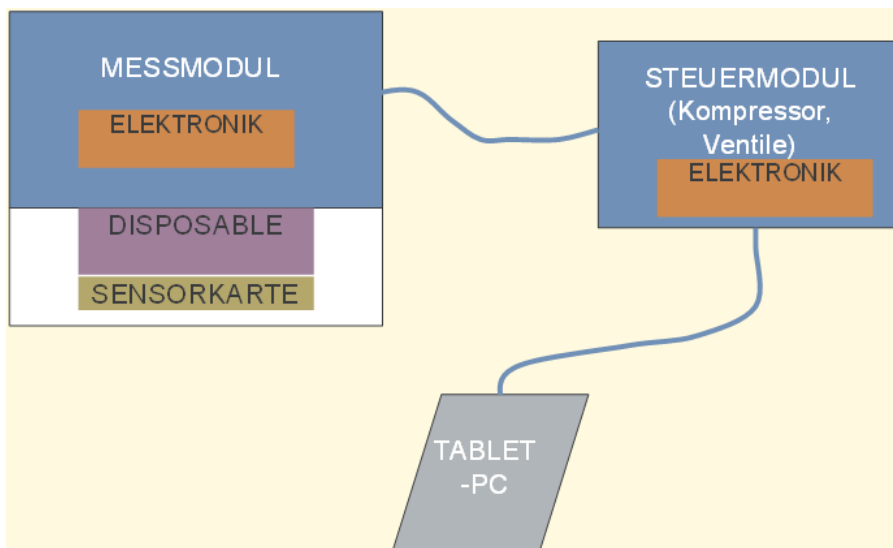
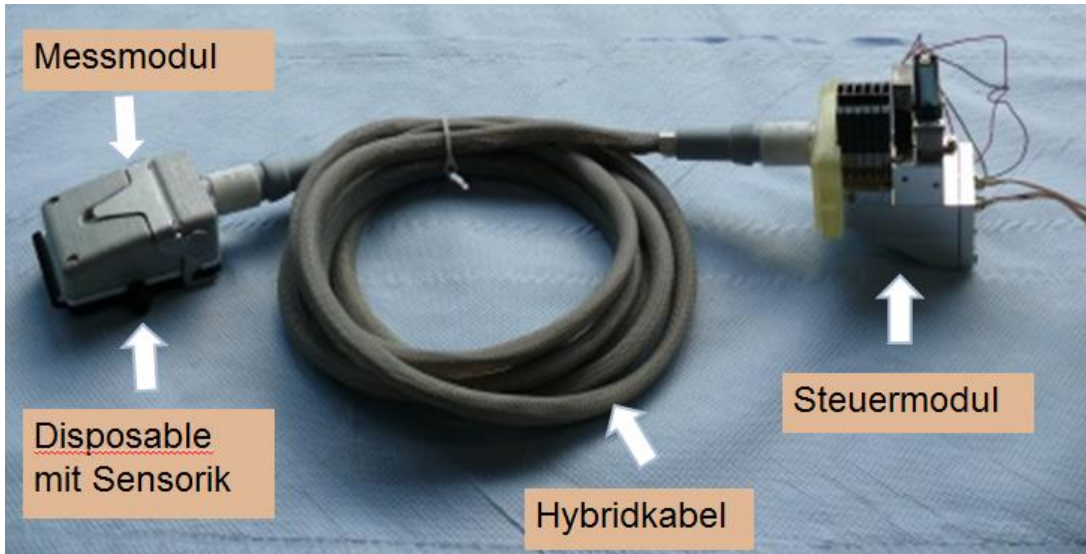


Bild 2: Komponenten des Gesamtsystems

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

1.3 Zeitplan

Der ursprüngliche Zeitplan konnte aufgrund des Rückzugs eines Projektpartners und der längeren Einarbeitungsphase des Ersatzpartners nicht gehalten werden (**Bild 3**). Deshalb wurde eine Projektverlängerung beantragt und genehmigt.

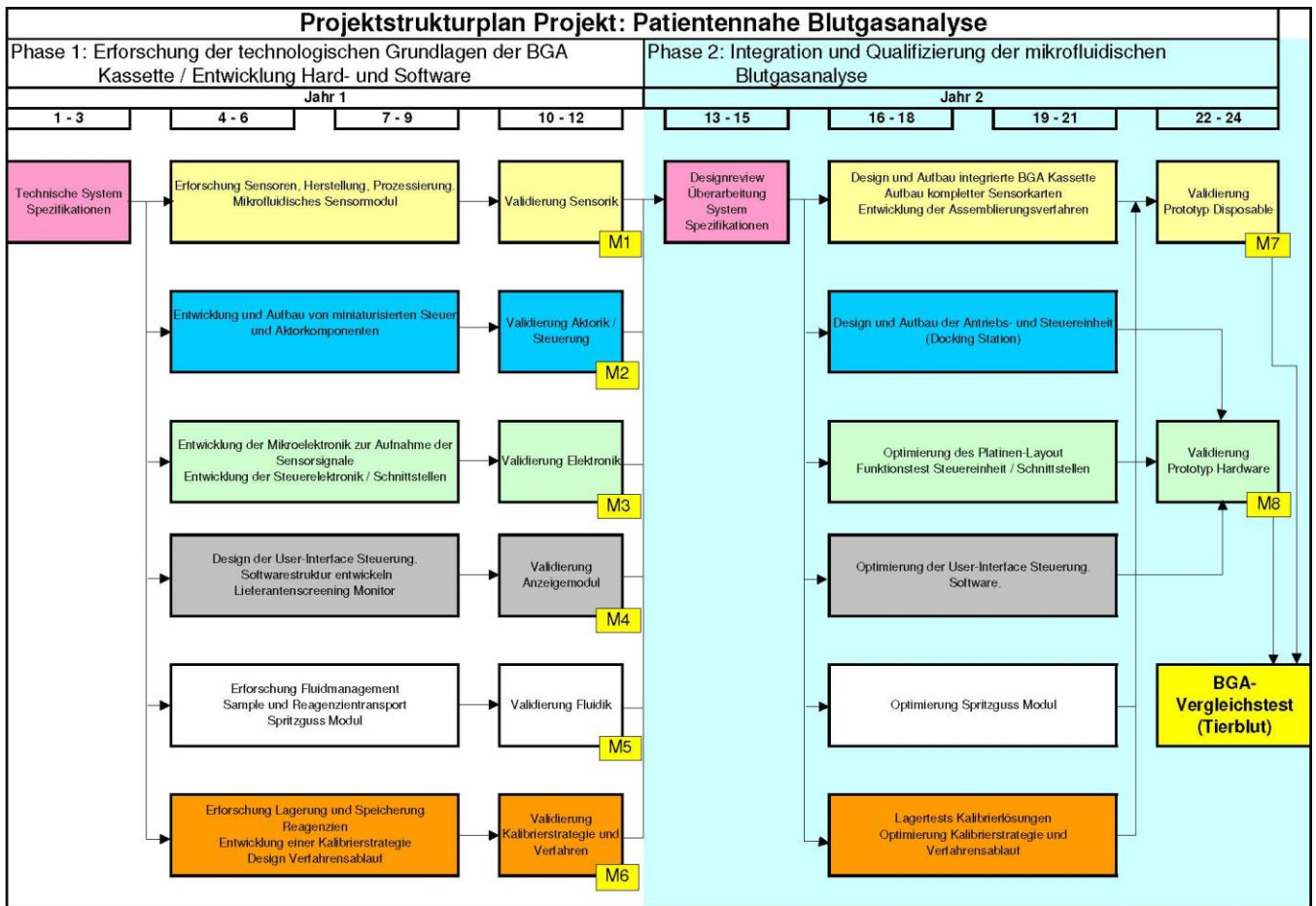


Bild 3: Zeitplan für die Entwicklung

2 Durchführung

2.1 Konzeptphase

2.1.1 Antriebsarten

Wichtiger Punkt ist die Auslegung des Antriebskonzepts für Ventile und Pumpe im Disposable. Aus Kostengründen dürfen im Disposable nur die Ventilmembranen und die Pumpmembran untergebracht sein. Die Antriebe sind dagegen im wiederverwendbaren Messmodul integriert. Da Messmodul und Disposable voneinander lösbar sein müssen kommt hier nur ein Antriebssystem in Frage, das einen größeren Hub realisieren kann und bei dem Antrieb und Fluidsystem auf einfache Weise voneinander getrennt werden können.

Im Rahmen des Projekts wurden detaillierte Untersuchungen zu verschiedenen Antriebssystemen durchgeführt. Diese Untersuchung beanspruchte umfangreiche Ressourcen und viel Zeit.

Pneumatisch

Ein pneumatischer Antrieb verwendet Druckluft und Vakuum, um Ventile und Pumpe zu schalten.

Vorteilhaft sind

- > die einfache Trennung von Ventil- bzw. Pumpmembranen und dem Antrieb (Druck- bzw. Vakuumerzeugung und Schalten über elektrische Schaltventile)
- > die hohen erreichbaren Kräfte.

Durch abwechselndes Anlegen von Druck und Vakuum können Pumpe und Ventile in beide Richtungen geschaltet werden, ohne dass ein Rückstellelement (z.B. in Form einer Druckfeder) erforderlich ist. Dies macht die Montage des später in großen Stückzahlen zu produzierenden Disposables einfach und kostengünstig.

Nachteilig ist die Geräuschentwicklung bei der Druck-/Vakuumerzeugung. Außerdem erfordert ein pneumatischer Antrieb ein komplex aufgebautes Verbindungskabel zwischen Steuermodul und Messmodul, da außer den elektrischen auch die pneumatischen Verbindungen hergestellt werden müssen.

Für das System wurde der pneumatische Antrieb gewählt; Details sind weiter unten beschrieben.

Elektromotorisch

Die Möglichkeit wurde theoretisch anhand eines CAD Entwurfs geprüft (**Bild 4**). Nachteilig hierbei sind die langen Schaltzeiten, die für die Bewegung der Antriebsstößel erforderlich sind. Außerdem müssen Ventile und Pumpen so aufgebaut sein, dass sie sich z.B. durch ein Federelement selbst zurückstellen, da eine Kopplung aufgrund der Lösbarkeit von Messmodul und Sensorkassette kaum möglich ist.

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

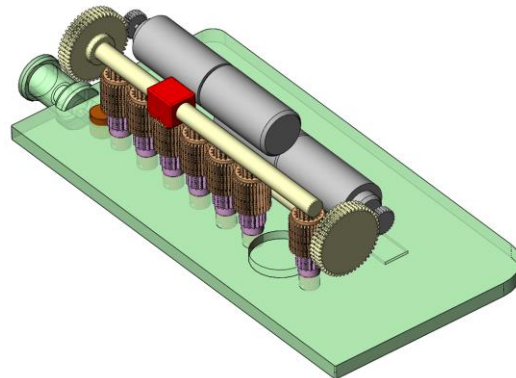


Bild 4: Grobkonzept für elektromotorischen Antrieb der Ventile im Disposable

Formgedächtnislegierungen FGL

Hier wurde der Ansatz verfolgt, die FGL Antriebe direkt in die Einweg Sensorkassette zu integrieren. Dies ist bei den aktuellen Herstellkosten der FGL Elemente aus Kostengründen nicht sinnvoll. Wenn dagegen die Antriebe im Messmodul angeordnet sind ergeben sich aufgrund des großen Hubbedarfs, der schwer zu realisierenden Kopplung und der beim Schalten der FGL Antriebe entstehenden Wärme gravierende Nachteile.

2.1.2 Konzeption lösbare Verbindung Messmodul zum Disposable

Das Messmodul muss in einfacher und gut zu handhabender Weise auf das Disposable aufgesetzt und wieder gelöst werden können. Dabei muss die Verbindung beider Bauteile sicher geschlossen sein, um einen zuverlässigen elektrischen Kontakt herzustellen und gleichzeitig für die pneumatische Verbindung eine hohe Dichtheit zu erreichen. Hier wurden verschiedene Konzepte von Rast-, Schiebe- und Drehbewegungen erarbeitet. Wegen der vier Stechhilfen (s. 2.1.6) entsteht beim Schließen eine hohe Kraft. Deshalb musste der Schließmechanismus mit einer Hebelübersetzung versehen werden (**Bild 5**).

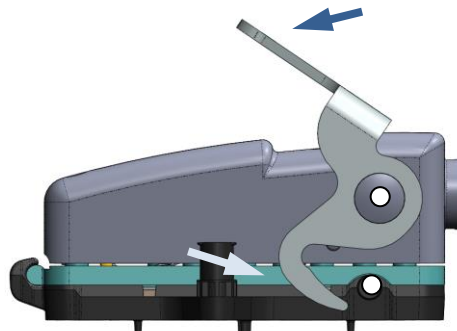


Bild 5: Verriegelungsmechanismus Messmodul <-> Disposable

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.1.3 Auslegung Heizelement für Messmodul

Da das Messmodul eine direkte Berührung mit der Sensorkarte hat, muss es auf 37°C beheizt werden um verlässliche Sensorsignale zu erhalten. Dazu wird das Unterteil des Messmoduls in Aluminium gefertigt, um eine gute Wärmeleitung zu erreichen. Im Unterteil sind zwei PTC Heizelemente (Positive Temperature Coefficient) eingesetzt (**Bild 6**). Die Elektronik des Messmoduls enthält einen Temperatursensor, der die Temperatur des Unterteils misst und zusätzlich die Temperatur des Mediums berührungslos erfasst. Über die Regelektronik wird die Temperatur auf 37°C +/- 0,1°C genau geregelt.

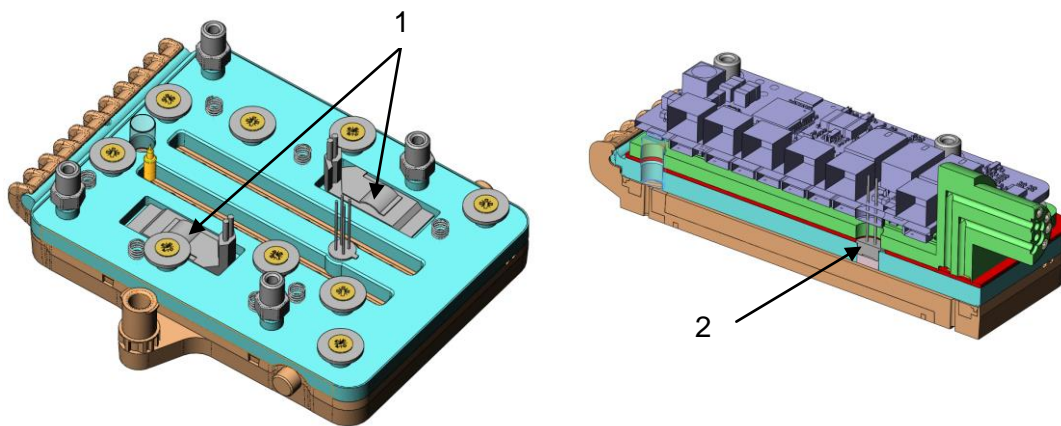


Bild 6: Lage der beiden Heizelemente (1) und des Temperatursensors (2)

2.1.4 Aufbau Messmodul mit Integration der Elektronik

Die Elektronik wurde so kompakt wie möglich ausgeführt, um eine Integration im Messmodul zu ermöglichen. Die Elektronikplatine enthält u.a. Padflächen für die Übertragung der Sensorsignale. Im Unterteil des Messmoduls sind gefederte Kontaktstifte eingepresst, die die Verbindung zwischen den Pads der Sensorkarte und der Elektronik herstellen (**Bild 7**).

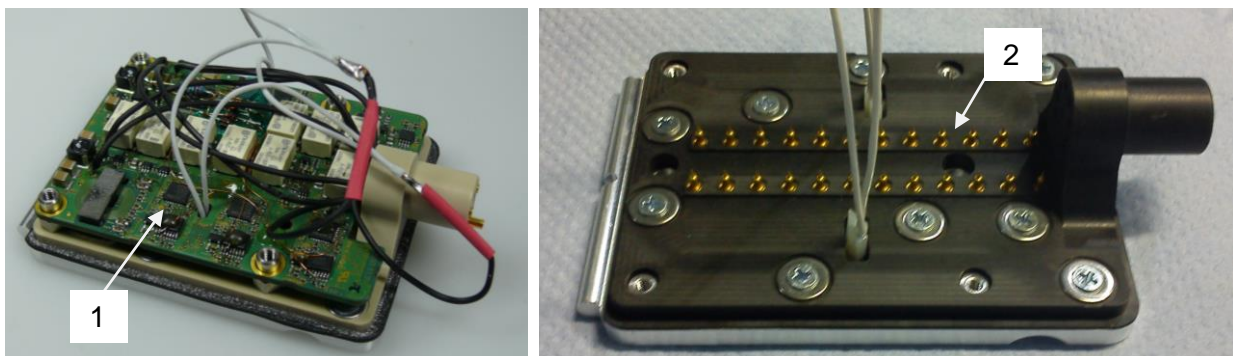


Bild 7: Elektronik im Messmodul (1); Kontaktstifte (2)

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.1.5 Hybridkabel für die elektrische und pneumatische Verbindung

Da kein marktgängiges Hybridkabel mit 8 elektrischen und 6 pneumatischen Leitungen in der geforderten Kompaktheit verfügbar war, musste ein Kabel inklusive Steck- und Kontakttechnik entwickelt werden. Dies wurde in Zusammenarbeit mit einem externen Partner durchgeführt (**Bild 8**). Das Kabel hat an beiden Enden eine Steckkupplung, die sich jeweils am Steuermodul bzw. am Messmodul einrasten lässt. Die Verbindung ist lösbar (**Bild 9**).

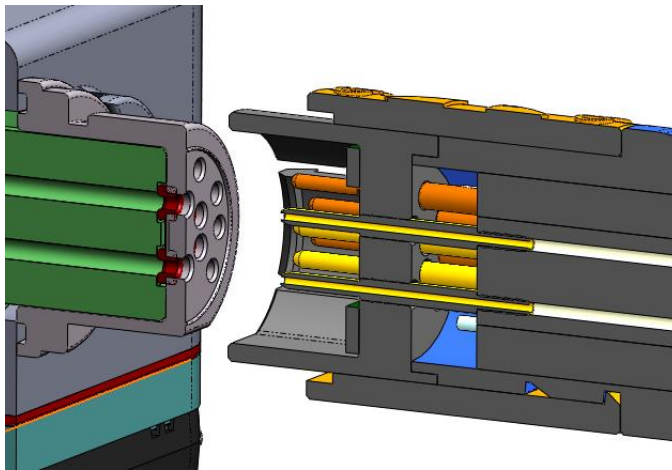


Bild 8: CAD Entwurf Steckverbindung Hybridkabel



Bild 9: Hybridkabel mit Steckkupplung

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.1.6 Aufbau Steuermodul

Das Steuermodul (**Bild 10**) beinhaltet diverse Funktionen:

- Bereitstellen der Steuerluft/des Vakuums mittels eines Kompressors
- Buchse zum Anschließen des Hybridkabels
- Aufnahme der Pneumatik – Schaltventile, mit denen die Pumpe und die Ventile in der Sensorkassette betätigt werden.

Ursprünglich war ein Micro – Kompressor für die Druck- und Vakuumversorgung vorgesehen. Aufgrund von nicht ganz zu vermeidenden Leckageverlusten erwies sich dieser Kompressor als zu schwach. Deshalb musste das ursprünglich entwickelte Steuermodul komplett überarbeitet werden. Die Puffervolumina wurden vergrößert und ein leistungsfähiger Kompressor angebaut.

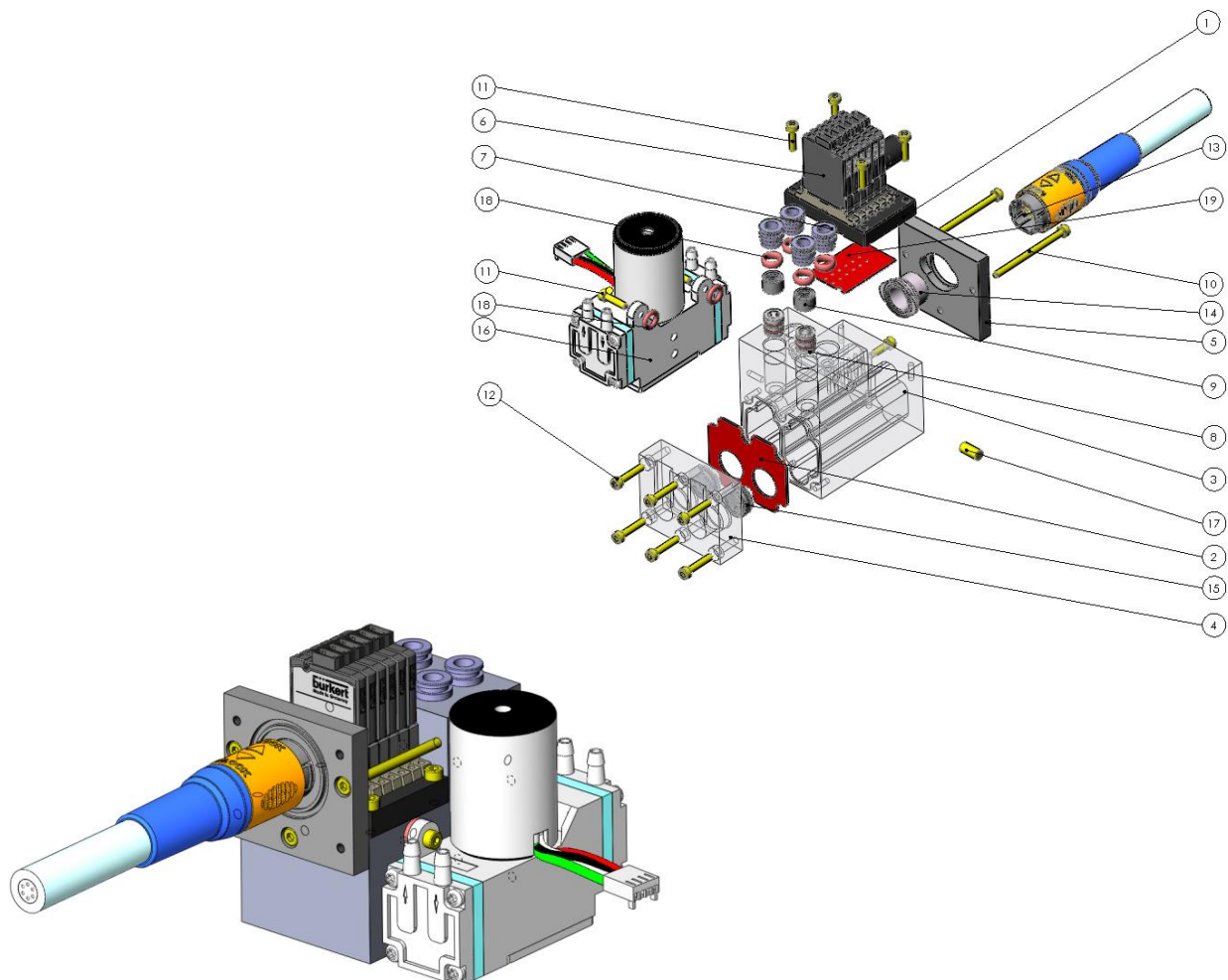


Bild 10: Aufbau Steuermodul

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.1.7 Stechfunktion für Kalibrierbeutel

Beim Aufsetzen des Messmoduls auf die Sensorkassette müssen die Kalibrierbeutel geöffnet werden. Dazu sind am Disposable Spitzen angespritzt. Wenn das Messmodul auf das Disposable aufgesetzt wird, werden die angespritzten Spitzen aus dem Verbund herausgetrennt und tauchen in den Folienbeutel ein. Dadurch wird der Beutel geöffnet und die Kalibrierflüssigkeiten haben Zugang zum Disposable. Bei der Entwicklung wurden sowohl pneumatische als auch mechanisch wirkende Öffner konzipiert. Die Wahl fiel auf mechanische Öffner, die in das Disposable integriert sind und beim ersten Aufsetzen des Messmoduls aktiviert werden. Berechnungen und anschließende Tests haben gezeigt, dass die dazu erforderliche Schließkraft relativ hoch ist. Deshalb musste am Verschlussmechanismus des Messmoduls eine Hebelübersetzung vorgesehen werden (s. auch unter 2.1.2).

2.1.8 Anzeigemodul

Ursprünglich war geplant, Steuermodul, Auswertelektronik und Display in einem Gehäuse unterzubringen. Dazu wäre ein bei Bürkert für ein anderes Projekt in Entwicklung befindliches Gehäuse eingesetzt worden (**Bild 11**).



Bild 11: Ursprünglich geplantes Gehäuse mit Anzeigeeinheit

Aufgrund von Weiterentwicklungen von kompakten und preisgünstigen Tablet – PCs auf dem freien Markt wurde diese Planung geändert. Das Steuermodul wird jetzt in ein kompaktes Sondergehäuse integriert; die Software läuft über einen angeschlossenen Tablet PC. Dadurch bleibt das System flexibel und könnte z.B. alternativ auch direkt an ein Krankenhaus - Infosystem angeschlossen werden.

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.2 Umsetzung

2.2.1 CAD Arbeiten

Es wurden eine Vielzahl von Versionen und Lösungsmöglichkeiten im CAD umgesetzt. Dabei wurden neben technischen Belangen auch die Bedienbarkeit und das Design berücksichtigt (**Bild 12**). Für Montage- bzw. Bedientests wurden Teile im Lithografieverfahren hergestellt.

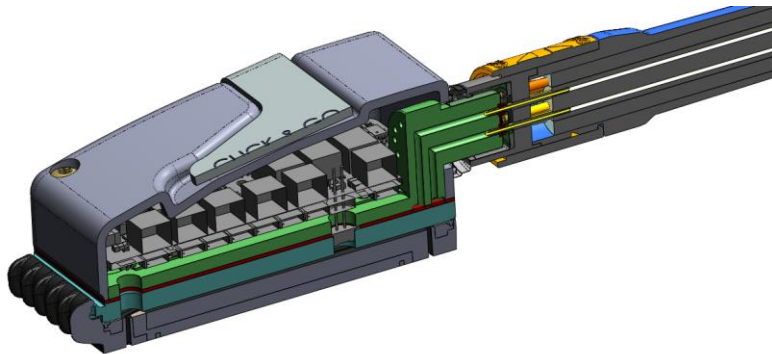


Bild 12: CAD Entwurf Messmodul mit Elektronik

2.2.2 Berechnungen

Verschiedene Einflussfaktoren wurden berechnet bzw. abgeschätzt: Die Fügekräfte beim Aufsetzen und Verriegeln des Messmoduls; die für das Messmodul erforderliche Heizleistung, der erforderliche Querschnitt der Pneumatikleitungen im Hybridkabel usw.

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.2.3 Vorabuntersuchungen

2.2.3.1 Dimensionierung Heizelement

Als Heizelement wurde ein PTC Element ausgewählt, das bereits im Bereich Automotive zur Anwendung kommt und für das gute Erfahrungen vorliegen. In einem Testaufbau wurde die Wärmeverteilung innerhalb des Messmoduls ermittelt (**Bild 13**).

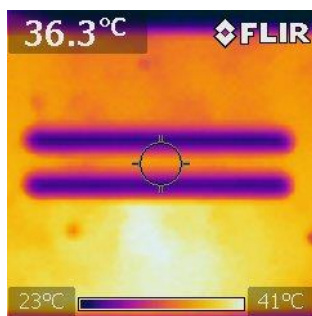


Bild 13: Versuch zur Wärmeverteilung im Messmodul

Es zeigte sich, dass zwei PTC Heizelemente erforderlich sind, um eine möglichst gleichmäßige Aufheizung zu erreichen. Die Aufheizcharakteristik wurde im Versuch nachgeprüft (**Bild 14**).



Bild 14: Aufheizversuche mit den beiden PTC Heizelementen

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.2.3.2 Dimensionierung Schlauchdurchmesser im Hybridkabel

Mithilfe von Kapillarschläuchen und einem daran angeschlossenen Zylinder mit Kolben wurden die bei dem zu Verfügung stehenden Druck erreichbaren Schaltzeiten gemessen. Damit wurde der erforderliche Innendurchmesser der Pneumatikleitungen im Hybridkabel bestimmt

2.3 Testphase

2.3.1 Dichtheit Gesamtsystem: Messmodul, Sensorkassette, Hybridkabel, Steuermodul

Im ersten Ansatz wurde ein Micro - Doppelkopfkompessor der Fa. Schwarzer Präzision eingesetzt (**Bild 15**). Bei ersten Versuchen zeigte sich, dass das Hybridkabel eine geringe Leckage aufwies, die im Rahmen der Prototypenentwicklung nicht behoben werden konnte (**Bild 16**). Da außerdem auch für die übrigen Dichtstellen aus technischer Sicht keine hundertprozentige Dichtheit erreicht werden konnte, war der Kompressor bzgl. Luftleistung zu schwach. Das komplette Steuermodul wurde daraufhin umgearbeitet und mit einem größeren Kompressor und größeren Puffervolumina ausgestattet. Mit dem geänderten Aufbau konnte die pneumatische Funktion nachgewiesen werden (**Bild 17**).

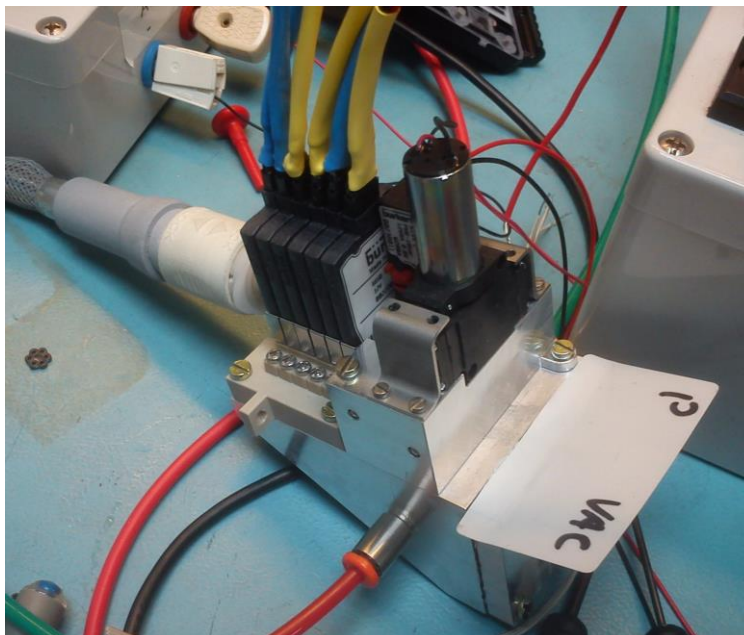


Bild 15: Steuermodul der ersten Generation mit Micro Kompressor

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

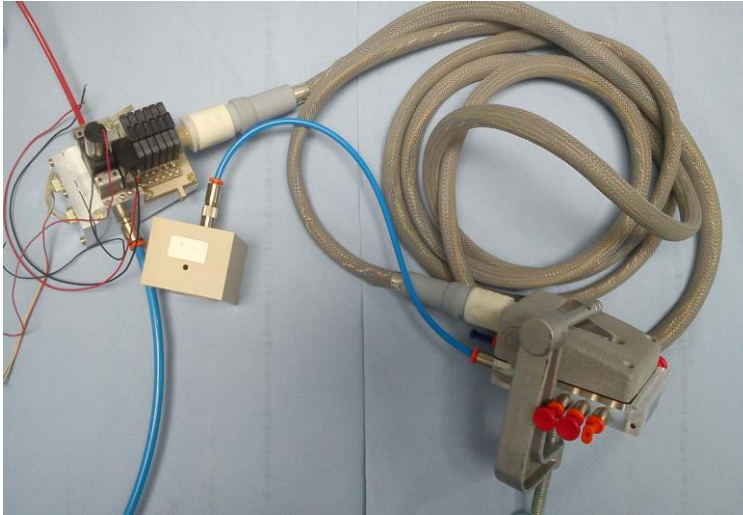


Bild 16: Erste Dichtheits-/Funktionstests mit Steuermodul, Hybridkabel und Messmodul

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

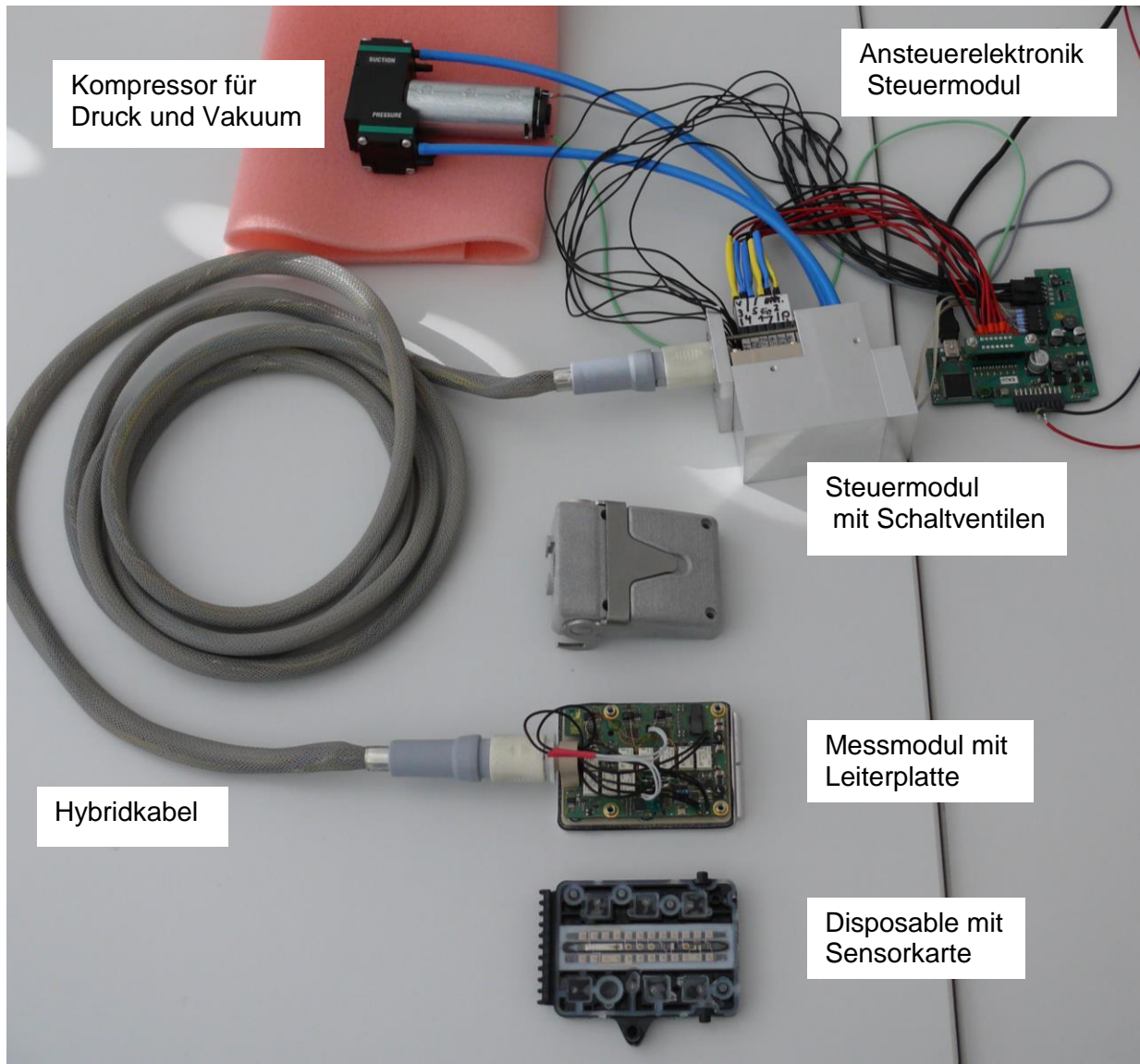


Bild 17: Funktionstest des finalen Komplettsystems

Schlussbericht

Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

2.3.2 Handhabung des Geräts

Das Hybridkabel hat eine sehr hohe Flexibilität und übt nur geringe Momente auf das Messmodul aus, das am Arm des Patienten angebracht ist. Gleichwohl wäre wünschenswert, auf das Kabel ganz zu verzichten. Dies erscheint im Rahmen der Weiterentwicklung von kompakteren Komponenten (Ventile, Kompressor usw.) denkbar.

Um das Messmodul auf die Sensorkassette aufzusetzen bedarf es noch zu großer Kräfte. Dies kann durch Änderung der Hebelverhältnisse zukünftig optimiert werden.

2.4 Einsatz der Fördermittel

Ein Schwerpunkt beim Einsatz der Fördermittel war die Konzeption der verschiedenen Lösungsansätze für den Antrieb von den im Disposable integrierten Pumpe und Ventile. Hier wurden die verschiedenen technischen Optionen sehr detailliert ausgearbeitet und die Integration im Messmodul überprüft. Ein hoher Detaillierungsgrad war erforderlich da sonst keine eindeutige Aussage möglich gewesen wäre.

Weiterhin mussten bei der Entwicklung zahlreiche Varianten aufgebaut, getestet und nach Optimierung wiederum aufgebaut werden. Vielfach wurden Lithografierteile für erste Messungen eingesetzt, um Kosten und Zeit einzusparen.

Aufgrund des komplexen und sehr kompakten Aufbaus mussten spezielle Aufnahmen und Testvorrichtungen konzipiert und gebaut werden.

3 Ergebnisse

Mit Abschluss der Arbeiten ergibt sich das Konzept eines Messmoduls, das in der Lage ist, in einem Disposable integrierte Fluidkomponenten wie Pumpen und Ventile zu betätigen und gleichzeitig die auf dem Disposable integrierte Sensorkarte auszulesen und die Signale zur Auswertung an ein entferntes Steuermodul weiterzuleiten.

Außerdem realisiert das Konzept durch den Einsatz eines Hybridkabels eine entfernt angeordnete Pneumatikversorgung. Durch die pneumatische Ansteuerung sind sehr hohe Betätigungskräfte bei gleichzeitig extrem kompaktem Aufbau der Fluidik möglich (**Bild 18**).

Damit wurden durch dieses Projekt die Voraussetzungen geschaffen für zukünftige Weiterentwicklungen im Bereich der Point of Care Diagnostik, aber auch in anderen Bereichen, bei denen Einweg Sensorik oder Einweg Fluidik zum Einsatz kommen.

Schlussbericht Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

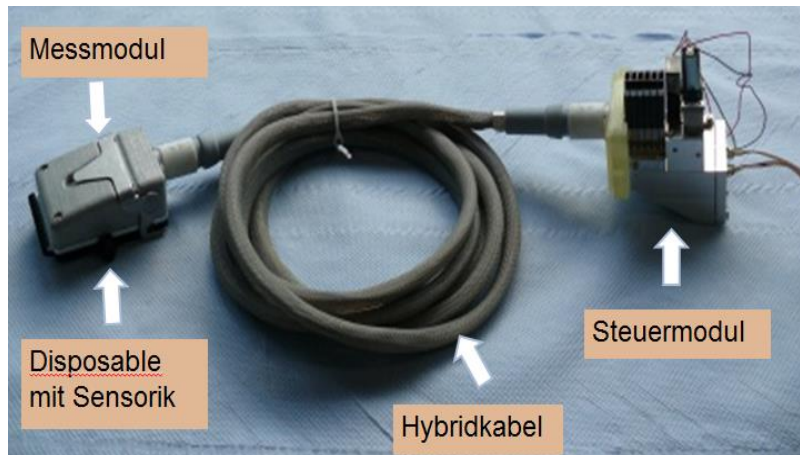


Bild 18: Komplettsystem

4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

4.1 Antriebskonzepte für Einwegsysteme

Auf die Analyse der verschiedenen Antriebskonzepte kann bei zukünftigen Projekten zurückgegriffen werden. Der Markttrend zeigt, dass im Bereich der Medical Care zukünftig verstärkt Einwegsysteme eingesetzt werden. Damit ergibt sich aber fast immer die Problematik, dass die meist teuren und aufwändigen Antriebe von den Einwegkomponenten getrennt aufgebaut werden. Im Rahmen des Projekts wurden dafür die wichtigsten Grundlagen geschaffen, um sich hier für geeignete Verfahren entscheiden zu können.

4.2 Hybridkabel für mehrfach elektrische und pneumatische Verbindungen

Das entwickelte Kabel stellt einen Meilenstein dar in Bezug auf Kompaktheit und einfaches Handling. Es kann in weiteren Anwendungen eingesetzt werden, bei denen eine elektrische und pneumatische Versorgung über mehrere Meter erfolgen muss.

4.3 Funktionsnachweis für einen pneumatisch betätigten und lösbaren Antrieb für eine Einwegkassette (Disposable)

Kritisch sind hierbei die erforderliche Dichtheit, auch nach mehrmaligem Abnehmen des Disposables und vor allem die Verriegelungskräfte, die nicht zu hoch sein dürfen, um eine einfache Bedienung und den für den Patienten nötigen Komfort zu gewährleisten. Hierfür wurden durch die Entwicklung wichtige Rahmenbedingungen definiert.

Schlussbericht

Förderprojekt Click & Go

Teilprojekt: Antriebs- bzw. Messmodul, Verbindungskabel
und Steuermodul

4.4 Realisierung eines System mit mechanischen, fluidischen, pneumatischen, elektronischen und sensorischen Elementen

Die Entwicklung und der Aufbau eines derart komplexen Systems erfordert besondere Fähigkeiten insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass die Zusammenarbeit über mehrere Partnerfirmen erfolgte. Insofern entstand durch das Projekt ein übergreifendes Netzwerk von externen Partnern, das für weitere Projekte genutzt werden kann.

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Blutgas - Analysemodul

Bild 2: Komponenten des Gesamtsystems

Bild 3: Zeitplan für die Entwicklung

Bild 4: Grobkonzept für elektromotorischen Antrieb der Ventile im Disposable

Bild 5: Verriegelungsmechanismus Messmodul <-> Disposable

Bild 6: Lage der beiden Heizelemente (1) und des Temperatursensors (2)

Bild 7: Elektronik im Messmodul (1); Kontaktstifte (2)

Bild 8: CAD Entwurf Steckverbindung Hybridkabel

Bild 9: Hybridkabel mit Steckkupplung

Bild 10: Aufbau Steuermodul

Bild 11: Ursprünglich geplantes Gehäuse mit Anzeigeeinheit

Bild 12: CAD Entwurf Messmodul mit Elektronik

Bild 13: Versuch zur Wärmeverteilung im Messmodul

Bild 14: Aufheizversuche mit den beiden PTC Heizelementen

Bild 15: Steuermodul der ersten Generation mit Micro Kompressor

Bild 16: Erste Dichtheits-/Funktionstests mit Steuermodul, Hybridkabel und
Messmodul

Bild 17: Funktionstest des finalen Komplettsystems

Bild 18: Komplettsystem