

Möglichkeiten und Grenzen zur Automatisierung des extrakorporalen Kreislaufs auf der Basis allgemeiner Steuerungs- und Regeltechnik – ersetzt der Autopilot den Kardiotechniker?

ZUSAMMENFASSUNG

Über 100.000 Menschen werden jährlich in der Bundesrepublik Deutschland am offenen Herzen operiert. Trotz eines routinierten, professionalisierten OP-Ablaufes besteht immer noch ein Restrisiko, postoperative neurologische Schäden davonzutragen. Dieses Thema ist Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte mit dem Ziel, zusätzliche Sicherheit durch Automatisierungsprozesse an der Herz-Lungen-Maschine (HLM) zu schaffen, vergleichbar mit einem Autopiloten. Die Steuerungs- und Regeltechnik bildet die Grundlage dieser Projekte. Klassische Regler kommen hier ebenso zur Anwendung wie digitale und intelligente Systeme. Niveauregulierung, Blasenerkennung und Gasflussregelung sind etablierte Regelmechanismen der HLM und werden von verschiedenen Institutionen wie z. B. der AmSECT (American Society of Extracorporeal Technology) regelmäßig durch Handlungsempfehlungen in ihrer Wichtigkeit unterstrichen.

Nach ersten Automatisierungsversuchen in den 70er und 80er Jahren wurde im Jahr 2002 ein virtuelles und miteinander verlinktes Patienten- und EKZ-Modell entworfen. 2010 konnte ein Untersucherteam der Technischen Hochschule Aachen mit drei Modellen virtueller, hydraulischer und tierexperimenteller Art gute Ergebnisse zur autonomen Hämodynamikregelung anhand einer ECLS-Konsole belegen. Hier fand ein „intelligenter“ Fuzzy-Regler Anwendung. Auch die Regelung von ECMO- und VAD-Systemen wurde von verschiedenen Gruppen untersucht. Gasflussanpassung an Partialdrücke (ECMO-Versuch) sowie Anpassung der Pumpleistung an den physiologischen Patientenbedarf (VAD) waren die erklärten Ziele. Die jüngsten Versuche zur Automation aus dem Jahr 2013 befassten sich mit der Korrelation von Gasfluss zu Blutfluss während der EKZ. Ein japanisches Team testete dies am experimentellen mechanischen Aufbau mit zwei Oxygenatoren und im Tierversuch.

Bisher veröffentlichte Studien zum Thema automatisierte HLM lieferten interessante Teilaspekte, welche den Handlungsspielraum und die Informationsbasis von Kardiotechnikern/innen erweitern können. Weniger erforscht sind z. B. die regelhafte Kontrolle des Antikoagulationsstatus sowie die konkrete Messung der realen Organperfusion als valide Rückführgröße. Auch die interdisziplinäre Kommunikation im OP erscheint im Kontext zur Automation der HLM schwierig. Die Forschungsansätze sind innovativ und deuten auf einen weiteren Ausbau des Automatisierungsgrades der HLM hin, lassen jedoch in naher Zukunft keine Regelung im Sinne eines Autopiloten erwarten.

SCHLÜSSELWÖRTER

Extrakorporale Zirkulation, Herz-Lungen-Maschine, Automation, Mess- und Regeltechnik, Signalverarbeitung, Sicherheit

ABSTRACT

Annually over one hundred thousand people in Germany receive open heart surgery. Despite a professional and well-practiced operation procedure the risk of post-operative neurological complications still remains. Various research projects have focused on this issue, with the aim of increasing safety through the automation of cardiopulmonary bypass (CPB), akin to an autopilot mode in aviation. All these efforts are based on control technologies, in which classic controls are implemented alongside digital and intelligent systems. Regulating levels and gas flow, and detecting bubbles are established control mechanisms of CPBs; various institutions, for example AmSECT (American Society of Extracorporeal Technology), regularly underscore their importance by recommending their application. After initial automatization attempts in the 1970s and 1980s, a computer-based model, investigating patients and cardiopulmonary bypass, was developed in 2002. In 2010 a research team from the Tech-

nical University of Aachen was able to demonstrate good results in regulating hemodynamics by using an ECLS computer console; the three models used in their research were of virtual, hydraulic and animal-experiment nature respectively. The Aachen team made use of an intelligent, fuzzy regulator. The regulation of ECMO and VAD systems was also researched by various groups.

The defined goals were to regulate gas flows in terms of partial pressures (an ECMO experiment) and also to regulate pump performance in terms of physiological patient needs (VAD). The most recent automation experiments from 2013 were concerned with the correlation between gas flow and blood flow during cardiopulmonary bypass. A Japanese team tested this in an experimental mechanized set-up with two oxygenators, and in an animal experiment.

Published studies to date on the subject of automated CPBs communicated interesting aspects, which can broaden the possibilities of action and the information basis available to perfusionists. A regulated control of anti-coagulation status, and a concrete measurement of real organ perfusion as a valid feedback variable, remain examples of less-researched areas. Interdisciplinary communication during surgery also seems problematic in the context of automation of CPBs. The directions of research are innovative and indicate a further growth in the level of automation CPBs. However, regulation in the sense of full auto-pilot can not be expected in the near future.

KEYWORDS

Cardiopulmonary bypass, heart-lung machine, automation, measurement and control technology, signal processing, safety

EINLEITUNG

In der Bundesrepublik Deutschland werden jedes Jahr über 100.000 Menschen am offenen Herzen operiert [1]. Davon ist der

Teil der Patienten, welche „on pump“ behandelt werden, im Vergleich zu minimal-invasiven Verfahren immer noch sehr hoch. Aufgrund dessen kann man durchaus von einem routinierten, professionalisierten Ablauf des Eingriffes reden.

Tatsache aber ist, dass trotz stetiger technischer Weiterentwicklung der Herz-Lungen-Maschine (HLM) und zunehmender Fachkompetenz des Operationsteams immer noch ein entsprechendes Restrisiko besteht, z. B. postoperative neurologische Schäden davonzutragen.

Als Ursache wird neben einigen anderen die Minderperfusion der inneren Organe durch die HLM diskutiert, trotz entsprechend vorausgegangenem Setting der notwendigen Perfusionsparameter wie Flowberechnung anhand der Körperoberfläche und des Cardiac Index.

Da der tatsächliche Perfusionsbedarf der Organe bzw. der reale Perfusionsdruck nicht bestimmbar ist, muss diese Möglichkeit grundsätzlich in Betracht gezogen werden [2].

An dieser Stelle setzt die Entwicklungsarbeit zur Prävention solcher Ereignisse ein. Die Bereitstellung einer angepassten, individuellen Organdurchblutung durch optimierte Strategien ist Gegenstand vieler Forschungsprojekte in der Herzchirurgie. Es wurde und wird untersucht, ob eine mögliche automatische Regelung der HLM bzw. ihrer Teilbereiche hier hilfreich sein könnte. Würde gar eine Art Autopilot möglicherweise eine Reproduzierbarkeit schaffen und zur Qualitätssicherung und Sicherheit des Patienten beitragen?

Neben einer kurzen Einführung in die allgemeine Steuerungs- und Regeltechnik soll der vorliegende Artikel einen Einblick über einige der in den letzten Jahren durchgeführten Forschungsarbeiten zum Thema Automatisierbarkeit von HLM, VADs und ECMO geben.

STEUERUNGS- UND REGELTECHNIK

Was verbirgt sich hinter dem Begriff Regelungstechnik? Zunächst wird man dieses Thema wohl in einen primär technisch funktionellen Zusammenhang bringen wollen. Doch finden sich auch in vielerlei natürlichen Systemen Regelkreise, welche dazu geschaffen wurden, lebenswichtige Vorgänge in höheren Lebewesen zu etablieren, wie z. B. Regelung von Körpertemperatur, Blutzucker, Sauerstoff und Kohlendioxidgehalt oder die Akkomodation der Pupille. Verschiedene Kombinationen von Regelungen fügen sich zu Regelkreisen zusammen, wie der aufrechte Gang oder Radfahren [3].

Regelungstechnische Vorgänge im industriellen Umfeld haben in der heutigen Zeit eine Komplexität angenommen, welche eine manuelle Steuerung praktisch unmöglich macht. Darum ist man schon seit längerem dazu übergegangen, Einrichtungen zur automatischen Überwachung von Steuerung und Regelung zu schaffen. Beide Funktionen, Steuern und Regeln, werden gemeinhin unter dem großen Oberbegriff Automatisierung zusammengefasst. Sämtliche verfahrens- und fertigungstechnische Produktionsprozesse in Industrieanlagen, technische Meilensteine wie die Atomenergie oder die Raumfahrt wären ohne Automatisierung nicht realisierbar.

Die Technik des Steuerns und Regels beinhaltet, dass bestimmte Vorgänge des technischen Prozesses vom Menschen so beeinflusst werden können, dass das Betriebsergebnis ganz nach individuellen Vorstellungen schon als Sollwert vorgegeben werden kann. Eine wichtige Aufgabe der Domäne Regelungstechnik ist hierbei, dass für die vielen unterschiedlichen technischen Systeme die entsprechenden Regler entworfen werden müssen [4].

„Das Regeln, die Regelung ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst“ [DIN IEC 60050-351] (Abb. 1).

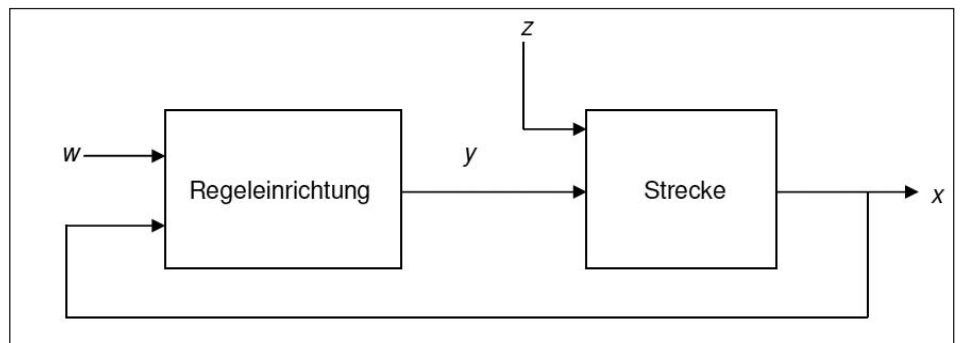


Abb. 1: Wirkungsplan einer Heizkreisregelung w = Führungsgröße (Temperatur Sollwert), y = Stellgröße (Heizwassertemperatur), x = Regelgröße (Temperatur Istwert), z = Störgröße.

Die so genannte Regeldifferenz bewirkt eine permanente Nachführung von x an w .

Regeldifferenz = Führungsgröße – Regelgröße

Formel: $e = w - x$

Klassische Regler

Die Wahl des jeweiligen Reglers richtet sich nach dem erforderlichen Zeitverhalten und der gewünschten Regelgenauigkeit der Regelstrecke. Man unterscheidet:

– P-Regler (proportional)

- I-Regler (integral)
- PI-Regler (proportional/integral)
- PD-Regler (proportional/differential)
- PID-Regler (proportional/integral/differential) [5].

Während der I-Regler einen relativ trägen Anstiegsverlauf beschreibt, sind die Regler proportionaler und differentialer Güte weitaus schneller im Ansprechverhalten.

Der PID-Regler wird im technischen Umfeld sehr häufig eingesetzt und vereinigt die Attribute aller drei Regelarten in sich.

Bei digitalen Reglern erfolgt die Signalverarbeitung nur noch über Mikroprozessoren statt der bei klassischen Reglern üblichen Operationsverstärker [6].

Fuzzy Regler

Dieser Reglertyp (Abb. 2) ist in der Lage, aufgrund seiner Struktur nicht klar abgrenzbare Inputs zu klar definierten Ausgangsfunktionen umzuwandeln. Unschärfe („fuzzy“) Begriffe wie z. B. kalt, warm oder indifferent werden durch hinterlegte Regelprämissen und sich daraus ergebende sogenannte Erfülltheitsgrade zu Stellgrößen verändert [7].

REGELTECHNIK AN DER HLM

Schaut man sich die HLMs an, welche derzeit in den deutschen Operationssälen zum Einsatz kommen, so kann man feststellen, dass diese Maschinen schon über eine ganze Anzahl von regelungstechnischen Einrichtungen verfügen. Teilweise stehen diese bereits unter automatischer Kontrol-

le der Maschine, teilweise stehen sie dem Kardiotechniker in seinem Handlungsspielraum direkt zur Verfügung. Alle sind aber in direkter Linie zu den vorweg beschriebenen grundlegenden Regelprinzipien zu sehen.

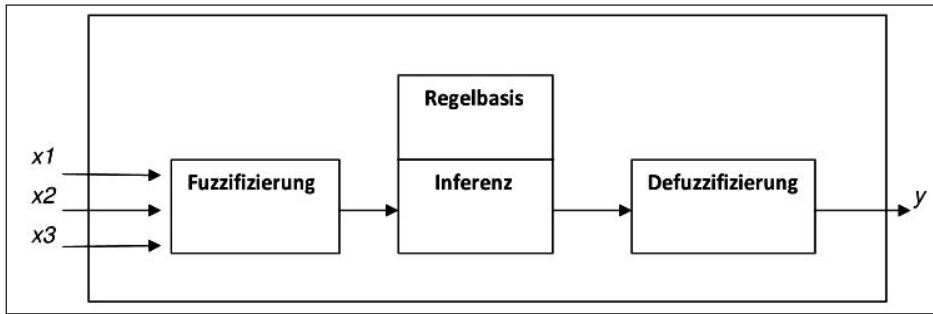


Abb. 2: Fuzzy-Controller

Versucht man das komplexe Thema der Steuerungs- und Regeltechnik mit einer HLM in Verbindung zu bringen, sollte zunächst eine Auseinandersetzung mit den relevanten Sicherheitsaspekten erfolgen, welche mit der Perfusionstechnik bzw. der extrakorporalen Zirkulation eng verbunden sind. Wird im Rahmen einer herzchirurgischen OP oder einer kreislaufunterstützenden Maßnahme eine EKZ durchgeführt, so ist dies mit erheblichem Gefahrenpotenzial verbunden. Dies ist Thema vieler Richtlinien und Empfehlungen. Organisationen wie z. B. die American Society of Extracorporeal Technology (AmSECT) oder das damit verbundene International Consortium for Evidence Based Perfusion (ICEBP) machen sich seit etwa 20 Jahren Gedanken über effektive Patientensicherheit mit der EKZ und geben dazu auch entsprechende Handlungsempfehlungen heraus. So sind neben der kontinuierlichen Weiterbildung und Qualifizierung der Kardiotechniker, der speziellen Weitergabe von evidenzbasiertem Wissen auch sicherheitsspezifische Details einer HLM Teil der Empfehlungen. So werden im neuesten Report von Robert A. Baker aus dem Jahre 2013 im Rahmen von 15 aufgestellten Standards die sogenannten „Safety devices“ (Standard 6) aufgeführt. U. a. werden als wichtige Sicherheitsvoraussetzung genannt: „Pressure monitoring, bubble detector, level sensor, temperature monitoring“ [8].

Eine moderne HLM der heutigen Zeit hat standardmäßig eine Fülle von installierten technischen Sicherheitseinrichtungen. Diese lassen sich unterteilen in rein mechanische Komponenten wie arterieller Filter oder ein Vent Ventil und solche, die an einen elektronischen Überwachungs- oder Messkreislauf angeschlossen sind. Dies sind z. B. der Niveausensor (Regeltrigger durch Kapazitätsänderung eines Dielektrikums), der Blasensensor (Regeltrigger durch Ultraschalldetektion von Luftblasen) oder der elektronische Gasblender (Regeltrigger nach dem Prinzip der thermischen Massendurchflussmessung).

FORSCHUNGSKONZEPTE ZUR AUTOMATISIERUNG VON HLM, ECMO UND VAD

Bereits in den 70er und 80er Jahren gab es Bestrebungen, die damals noch nicht ausgereifte Technik der HLM durch Automatisierungsversuche zu optimieren. 1978 machten sich Prilutskii et al. erste Gedanken zu einem möglichen Design und Kontrollsystemen für eine Automatisierung. Hämodynamik, Oxygenierung, Gefäßsystem und Temperaturparameter standen damals schon im Vordergrund [9].

Virtueller Versuchsaufbau von Boschetti

Um einer zusätzlichen Sicherheit während eines herzchirurgischen Eingriffs näherzukommen, entwarfen Boschetti et al. 2002 in Mailand einen virtuellen Patienten und ein ebenso virtuelles EKZ-Modell. Fünf Hauptbereiche repräsentierten das menschliche Modell:

- Hämodynamik (Blutzirkulation, Blutdruck, Flow)
- Biochemie (Blutgastransport, Säure-Basen, O₂-Sättigung, HCO₃)
- Körpervolumen (Flüssigkeitshaushalt)
- Thermik (Kerntemperatur, venöse Bluttemperatur)
- Medikamentenwirkung (arterielle und venöse Vasodilatoren, Diuretika, Bikarbonat)

Biometrische Daten wie Gewicht und Größe konnten in gleicher Weise simuliert werden, um eine genaue und realistische Berechnungsgrundlage zu schaffen.

Drei Hauptbereiche stellten den virtuellen Maschinenkreis dar:

- Gas-Transfer (arterieller pO₂, pCO₂, pH, O₂-Sättigung)
- Wärmetauscher (arterielle Bluttemperatur)
- Hämodynamik (Pumpe, Oxygenator, Filter, Schlauchsystem, Kanülen, Druck und Flowraten)

Beide Simulationen wurden miteinander verlinkt, um interagieren zu können.

Boschetti bescheinigte seinem Simulationsmodell eine gute Reproduzierbarkeit

und empfahl es zu Lehr- und Trainingszwecken für Kardiotechniker. Fernerhin sah er es als wichtigen zukunftsweisenden Schritt in Bezug auf weitere Forschung und Entwicklung zur Automatisierung einer HLM.

Fuzzy-Regelung der EKZ von Baumgartner

Baumgartner und Kollegen entwickelten im Jahr 2010 drei verschieden geartete Versuchsaufbauten, um einen selbstkontrollierenden extrakorporalen Kreislauf anhand eines Fuzzy-Reglers zu schaffen. Die Studie wurde aufgrund der Überlegung durchgeführt, dass es sinnvoll wäre, neben der Entlastung von Kardiotechnikern im OP-Umfeld auch im außerklinischen Notfall eine unkomplizierte und weitgehend autonome, mobile Maschine zur Hand zu haben. Damit wäre in akuten Stresssituationen eine zusätzliche Patientensicherheit gegeben. [10]

Getestet wurden eine mechanische Zirkulation und ein virtuell generierter Kreislauf. Des Weiteren wurde an normalen Hausschweinen eine tierexperimentelle Untersuchung durchgeführt.

Der Fuzzy-Regler innerhalb der Kontrolleinheit hatte die primäre Aufgabe, Hämodynamik eigenständig zu regulieren. Oxygenierung, Blutgasregelung oder anderes waren nicht Gegenstand der Untersuchung. Der Regler wurde mit zwei Eingängen und einem Ausgang ausgestattet. Bei Flow- oder Druckabsenkung bestand die Regelantwort in Erhöhung der HLM-Drehzahl, bei Flow- oder Druckerhöhung war die Antwort folglich eine Absenkung der Drehzahl.

In allen drei Versuchsanordnungen wurde eine lineare Anpassung der Pumpendrehzahl erreicht.

Das Untersucherteam um Baumgartner empfand die Regelung auf Basis eines Fuzzy-Reglers darum als durchaus geeignet für die speziellen Anforderungen, welche im extrakorporalen Kreislauf zu bewältigen sind.

ECMO-Regelung

Eine relativ aktuelle Arbeit zu einem Versuchsaufbau einer geregelten ECMO mit Schwerpunkt Gastransfer veröffentlichten Tobias Wartzek und Kollegen von der RWTH Aachen im Jahr 2009. Hier wurden grundlegende physikalische Modelle mit der Simulationssoftware Matlab/Simulink mathematisch verwirklicht. Die nötigen Regelalgorithmen wurden mit Parametern erstellt, die aus anderen Veröffentlichungen, Datenblättern und Studien bekannt waren [11].

Vorrangig ging es in dieser Arbeit um die zielgenaue Regelung des Gastransfers anhand der gemessenen Blutgaswerte pO_2 und pCO_2 (Regelgrößen). Diese wurden mit dem Blutgasanalysator CDI 500 der Firma Terumo gemessen und ermittelt und zwar vor und nach dem Oxygenator. Die entsprechenden Stellgrößen, Sauerstoff und Gasfluss, lieferte ein elektronischer Gasblender, das Stellglied innerhalb des Regelkreises. Bei einer Messdauer von max. 250–300 s konnte die Einregelung auf den Sollwert von FiO_2 und pO_2 bereits innerhalb von 50–70 s bei ausreichender Stabilität erreicht werden.

Regelversuch VAD

Ein wissenschaftlicher Versuch am Helmholtz Institut für Biomedizinische Technik in Aachen befasste sich 2004 mit der automatischen Anpassung der Pumpleistung eines Rotations-VAD an den physiologischen Bedarf des Patienten. Dieser wird in der Regel manuell eingestellt und richtet sich nach den biometrischen Daten und den jeweiligen klinischen Erfordernissen des Körpers. Es kann sich nicht dynamisch auf niedriges Vorlastvolumen (Gefahr des Ansaugens) oder hohes Volumenangebot einstellen (Abb. 3).

Die Gruppe um Finocchiaro hatte die Idee, mit Hilfe eines Kreislaufsimulators ähnliche physiologische Mechanismen wie den Frank-Starling-Effekt des Herzens in einem VAD zu implementieren und über die Drehzahlerhöhung eine automatische Anpassung der Pumpe an das Füllvolumen des Herzens zu ermöglichen. Dies sollte mit der Messung des Vorhof(soll)drucks durch spezielle Drucksensoren an der Einlasskanüle des VAD geschehen. Zusätzlich sollte die Pumpleistung sich auf physiologische Zustände wie Tachykardie bei körperlicher Belastung einstellen können. Ein weiterer Drucksensor im Auslass des VAD registrierte hierzu die Aortendruckpulse zur weiteren Verarbeitung als Frequenzsignal. Ein PID-Regler innerhalb der Regelstrecke gab die Sollfrequenz der Pumpe vor [12].

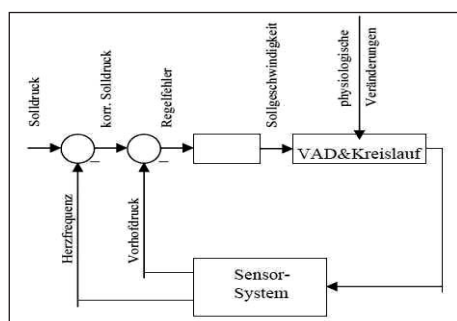


Abb. 3: VAD-Regelung

Die beschriebenen guten Ergebnisse in dieser Studie ermutigten die Untersucher, in einem nächsten Schritt die Regelung unter den Bedingungen eines Tierversuchs zu testen und weiter zu verbessern.

Synchronisation von Sauerstoff und Blutfluss

Eine der jüngsten experimentellen Untersuchungen zum Thema Automatisierungskonzepte für die HLM führten Okahara et al. im Jahr 2013 durch (Abb. 4). Um ein optimales Ventilations-Perfusions-Verhältnis (V/Q) zu schaffen, unternahmen sie den Versuch, Blutflow und Sauerstoffflow aufeinander abzustimmen. Die Versuchsreihen wurden in vitro und in vivo (Tierexperiment) mit dem Ziel gestartet, einen neuen Mechanismus zu konstruieren, der einen sicheren Gasaustausch vor allem zu Beginn der extrakorporalen Zirkulation (EKZ) garantieren sollte. Dies gelang durch die Verlinkung eines Flowmeters mit der Gasblender-Einheit des Sauerstoffs über einen speziell entwickelten Massenfluss-Controller (MFC), wodurch von Beginn an ein konstanter pO_2 -Level erreicht werden konnte [13].

Für die In-vitro-Untersuchung wurde 37 °C warmes Erythrozytenkonzentrat benutzt. Ein primärer Oxygenator versorgte das Blut mit Sauerstoff und eliminierte das Kohlendioxid. Ein zweiter Oxygenator hatte die gegenteilige Aufgabe, also CO_2 und Stickstoff über die Membran in das Blut zu transferieren und somit zu deoxygenieren. Letzteres simulierte quasi den Sauerstoffverbrauch und die CO_2 -Produktion eines Organismus. Eine zentrale Controllereinheit empfing die Blutflowraten vom Ausgang einer Zentrifugalpumpe und

setzte sie im Verhältnis zu einem V/Q-Setting, in diesem Fall mit einer Ratio von 0,5 pro 1 l Blutflow. Ausgangsseitig war die Controllereinheit mit dem Massenflussgerät (MFC) verbunden und dieses wiederum mit einem elektronischen Gasblender. Es war nun möglich, den Gasfluss in Abhängigkeit vom Pumpenfluss, welcher auf 1, 2 und 3 l eingestellt wurde, dem Oxygenator zuzuleiten. Die Sauerstoffkonzentration wurde auf 50 % festgelegt. Ein CDI-500 Blutgas-Monitorgerät war für die kontinuierliche Messung von pO_2 , pCO_2 und SvO_2 zuständig.

Die gleichen für das Experiment entwickelten Geräte wurden in einem zweiten Versuch an einem Hausschwein verwendet. Das Tier wurde nach entsprechender Anästhesie und Intubation sternotomiert und komplett kanüliert an eine HLM mit offenem venösen Reservoir angeschlossen. Ein Herzstillstand wurde mit kardioplegischer St.-Thomas-Lösung herbeigeführt. Hier war das Ziel der Untersuchung, die automatische Gasinsufflation unter verminderten Blutflow-Bedingungen, 4 l/min und 2 l/min am lebenden Organismus zu testen. Zusätzlich sollte im Versuch die Körpertemperatur von 37 °C ausgehend, auf 32 °C, 28 °C und 25 °C abgesenkt werden.

Es wurde festgestellt, dass die Kohlendioxidwerte in der Kühlphase interessanterweise anstiegen, jedoch niemals kritische Werte erreichten. Die pO_2 -Werte hingegen bewiesen Stabilität und stiegen (erwartungsgemäß) bei Abkühlung und niedrigem Flow an, die venösen Sättigungswerte reagierten adäquat bis leicht erniedrigt unter Normaltemperatur. Die Gasinsufflation funktionierte spontan nach V/Q-Maßgabe. Für die Zukunft sah das Untersucherteam

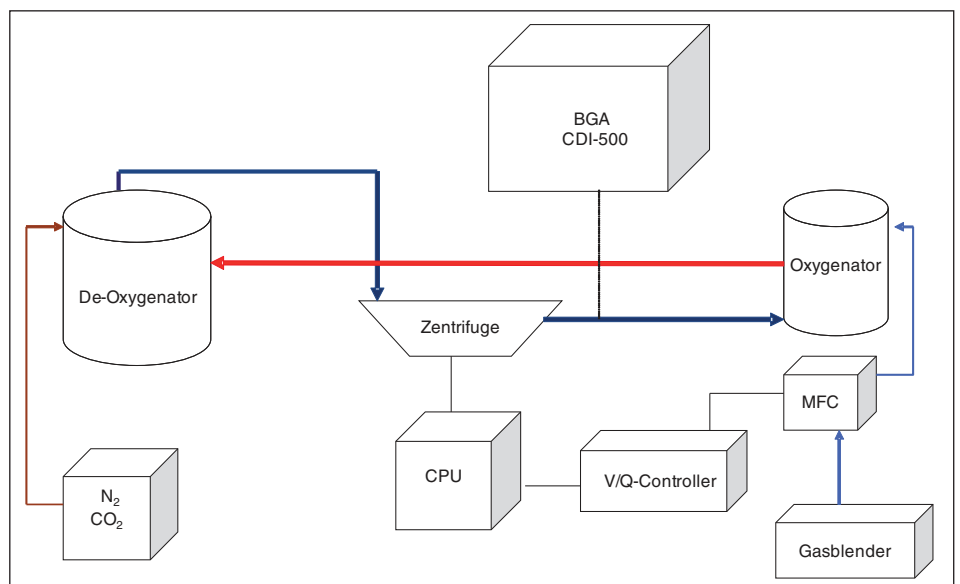


Abb. 4: In-vitro-Versuch nach Okahara

weiteren Entwicklungsbedarf, um die Sicherheit des experimentellen Aufbaus auch unter klinischen Bedingungen zu erproben.

DISKUSSION UND AUSBLICK

Resümiert man die vorliegenden Fakten, so ergeben sich vielerlei Lösungsansätze, um die Informationsbasis und den Handlungsspielraum des/der Kardiotechnikers/in zu erweitern.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Ergänzung vorhandenen Wissens, stellen aber bislang keinesfalls ein Äquivalent zur konventionellen EKZ dar. Die bisher veröffentlichten Studien lieferten kein Gesamtkonzept, sondern untersuchten im Wesentlichen umrissene Teilbereiche. Viele Aspekte bleiben unklar, da es bis dato noch an konkreten Rückführgrößen wie der Messung der Organperfusion mangelt, um ein wirklich sicheres Perfusionsmonitoring zu gewährleisten.

Die permanente automatische Überwachung der Blutgase und des Säure-Basen-Haushalts, sowie die daraus resultierenden möglichen Konsequenzen auf Automationsebene sind allenfalls rudimentär erforscht und bieten keine Alternative zur manuellen Intervention.

Weitere Teilbereiche kardiotechnischer Aufgabengebiete an der HLM wie Antikoagulation, erforderliche Gabe von Blutkomponenten und Medikamenten sowie die ständige Kontrolle des Antikoagulationsstatus sind im Kontext der Automatisierung ebenfalls noch nicht erforscht.

Weitere Unwägbarkeiten ergeben sich im Hinblick auf die menschliche Kommunikation während des CPB. Es stellt sich hier die Frage, wie eine „Autopilot-HLM“ wohl in die wichtige interaktive Kommunikation aller an der Herzoperation beteiligten Personen miteinbezogen werden könnte. Hier wäre die Entwicklung von Spracherkennung notwendig. Noch gravierender erscheint die Frage vor dem Hintergrund von Stress und Notfallsituationen, welche schnelles situatives Handeln erfordern. Es erscheint schlüssig, dass nur ein selbständig handelnder Mensch mit entsprechender Fachkompetenz auf dem Gebiet der kardiovaskulären Perfusion den genannten Anforderungen entsprechen kann.

Der klinische und sicherheitstechnische Nutzen der schon implementierten Regelmechanismen an der HLM ist unstrittig und nicht mehr wegzudenken. Die vorgestellten Forschungsansätze bieten in Teilbereichen innovative Ergebnisse, welche weiterhin einen Ausbau des Automatisierungsgrades der HLM erwarten lassen. Jedoch erscheint

angesichts des jetzigen Forschungsstands eine komplette Automatisierung im Sinne eines Autopiloten für die nähere Zukunft wenig wahrscheinlich.

LITERATUR

1. Deutsche Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie (DGTHG): Herzbericht 2011, unter: [http://www.dgthg.de/PM_2013\(02/2013\)](http://www.dgthg.de/PM_2013(02/2013))
2. Meyrowitz G: *Automatisierung der Herz-Lungen-Maschine*. Berlin: Mensch und Buch 2005: 271
3. Schumacher W, Maurer M: *Grundlagen der Regelungstechnik*. Vorlesungsskript Technische Universität Braunschweig; 10/2011: 1–2
4. Krah JO: *Skript zur Vorlesung Regelungstechnik* Ingenieurwissenschaftliches Zentrum der FH Köln. 02/2013: 5–10
5. http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik#Vergleich_der_Reglertypen, 12/2013
6. Michels K, Klawonn F, Kruse R, Nürnberger A: *Fuzzy-Regelung*. Grundlagen, Entwurf, Analyse. Berlin/Heidelberg: Springer 2002, 109–115
7. Ottens M, Jaouad S: *Einführung in die Regelungstechnik mit Fuzzy-Logik*. Skript zur Lehrveranstaltung der Technischen Fachhochschule Berlin; Fachbereich VI, WS 2009/2010: 4–5
8. Baker RA et al: *Report from AmSECT's International Consortium for Evidence-Based Perfusion: American Society of ExtraCorporeal Technology Standards and Guidelines for Perfusion Practice*. *Journal of Extra Corporeal Technology JECT* 2013; 45: 161–162
9. Prilutskii V, Tropskii S, Khrenov V, Slavyak Y: *Analysis of control systems for extra-corporeal circulation equipment*. *Biomedical Engineering* 1978 Jul; 12(4): 196–199
10. Baumgartner B, Mendoza A, Schreiber U, Eichhorn S, Krane M, Bauernschmitt R, Knoll A: *A comprehensive approach towards extracorporeal-circulation control using fuzzy logic*. Technische Universität München, unter: <http://www6.in.tum.de/Main/Publications/Baumgartner2010b.pdf> (01.2014)
11. Wartzek T, Walter M, Stollenwerk A, Kopp R, Kashefi A, Leonhardt S: *Automatisierung der extrakorporale Membranoxygenierung*. Tagungsband *Automed 2009 VDI Verlag*: 25–26
12. Finocchiaro T, Mussmann B, Kwant PB, Reul H (RWTH-Aachen): *Regelung eines pulsartigen Herzzunterstützungssystems (VAD)*. Tagungsband *Automed*: 97–98
13. Okahara S, Ninomiya S, Miyamoto S, Takahashi H, Kurosaki T, Sueda T: *A novel measurement and delivery system for synchronizing oxygen gas flow with blood flow during cardiopulmonary bypass*. *Perfusion* 2013, 28(5): 403–408

INTERESSENKONFLIKT

Die Autoren haben keine finanziellen Interessen oder Beziehungen, die zu Interessenkonflikten führen könnten.

Burkhard Seibel
Universitätsklinikum Gießen und Marburg
GmbH
Standort Gießen
Klinik für Herz-, Kinderherz- und Gefäß-
chirurgie
Abt. Kardiotechnik
Rudolf Buchheim Str. 7
35392 Gießen
Burkhard.Seibel@paediat.med.uni-giessen.de