

Ivo Wolf
Dr. sc. hum.

**Konzepte zur effizienten Realisierung praxistauglicher
medizinischer Bildverarbeitungssysteme und ihre Nutzung
für die dreidimensionale Doppler-Echokardiographie**

Geboren am 26.3.1973 in Mannheim
Reifeprüfung am 27.5.1992 in Neckargemünd
Studiengang der Fachrichtung Biologie (Diplom) im WS 1993
Studiengang der Fachrichtung Physik (Diplom) vom SS 1994 bis SS 1999
Vordiplom am 13.11.1995 an der Universität Heidelberg
Diplom am 25.6.1999 an der Universität Heidelberg

Promotionsfach: Medizinische Informatik (DKFZ)
Doktorvater: Prof. Dr. sc. hum. H. P. Meinzer

Die Praxisrelevanz eines neuentwickelten Bildverarbeitungsprozesses lässt sich nur bei *frühzeitiger Anwendung* auf eine ausreichend *große Datenbasis* (mehr als nur wenige Testdatensätze) durch *medizinische Benutzer* sicherstellen. Demnach müssen neue Verfahren frühzeitig in ein *praxistaugliches*, d.h. vom medizinischen Anwender unter realitätsnahen Bedingungen einsetzbares, klinisches Bildverarbeitungssystem integriert werden. Die Realisierung praxistauglicher Anwendungen ist allerdings generell mit hohem Zeitaufwand verbunden, der im experimentellen Stadium wegen der notwendigen hohen Flexibilität weiter erhöht wird. Einerseits ist also eine frühzeitige praxistaugliche Realisierung eines neuen Verfahrens zur Sicherstellung der Praxisrelevanz und zum rechtzeitigen Test dringend wünschenswert, andererseits kann aufgrund des Risikos des Scheiterns jedes neuen Lösungsansatzes nicht allzu viel Zeit in eine praxistaugliche Realisierung investiert werden.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Konzepte eröffnen einen Ausweg aus diesem Dilemma, indem sie die Komplexität der Entwicklung von praxistauglichen Bildverarbeitungssystemen durch Operationalisierung reduzieren. Schwerpunktmäßig wird die Erfüllung der gegenläufigen Anforderungen (Praxistauglichkeit bei hoher Flexibilität und geringem Entwicklungsaufwand) im kritischen, experimentellen Stadium eines Bildverarbeitungsprozesses unterstützt. Der Einsatz der Konzepte ermöglicht die Entwicklungsarbeit weitgehend auf den eigentlichen Bildverarbeitungsprozess zu konzentrieren.

Das experimentelle Stadium eines Bildverarbeitungssystems bzw. -prozesses lässt sich – auf dem Weg zum Endprodukt – grob in mehrere Phasen einteilen, wobei die mit der anfänglich geforderten Flexibilität zwangsläufig einhergehende Komplexität des Systems mit jeder Phase abnehmen sollte. Die ersten Prototypen – nach gemeinsamer Spezifikation des zu erreichenden Ziels durch die beteiligten medizinischen und technisch-informatischen Projektpartner – werden hauptsächlich vom Entwickler selbst bzw. in Anwesenheit des Entwicklers benutzt. In der zweiten Phase wird das Verfahren von wenigen, speziell eingearbeiteten Ärzten selbständig, jedoch in Erreichbarkeit des Entwicklers, verwendet. Die folgenden Phasen umfassen von einer größeren Zahl medizinischer Anwender durchgeführte Studien, jedoch noch an der selben Institution und damit in Erreichbarkeit des Entwicklers, und schließlich zentrumsübergreifende Studien.

Eine in allen Phasen wichtige Eigenschaft für die Anwendbarkeit eines Systems ist ein gutes Antwortverhalten. Voraussetzung für ein gutes Antwortverhalten ist die Vermeidung nicht notwendiger Ladevorgänge bzw. Berechnungen. Die vorgestellten Konzepte zur Datenhaltung und einer Bildverarbeitungs-Pipeline erfüllen diese Forderung ohne zusätzlichen Entwicklungsaufwand. Das Pipeline-Konzept ermöglicht zudem die Kombinierbarkeit von Bildverarbeitungsverfahren zur Laufzeit und bildet damit die Basis der vor allem in den ersten Phasen benötigten Flexibilität. Weiterhin erleichtert das Pipeline-Konzept die Realisierung von – auch in den Zwischenergebnissen – kontrollierbaren und korrigierbaren Systemen, einer weiteren für die Praxistauglichkeit wichtigen Eigenschaft. Das vorgestellte Pipeline-Konzept zeichnet sich durch einfache Anwendung sowohl bei der Zusammenstellung von Pipelines als auch bei der Implementierung neuer Filter-Klassen aus und ist für vier- und mehr als vierdimensionale Daten einsetzbar.

Graphische Steuerungselemente zur Einstellung von Parameterwerten sind für die Bedienbarkeit unter praxisnahen Bedingungen unabdingbar. Die Generierung von Steuerungselementen beschleunigt den Entwicklungsprozess erheblich, insbesondere während der ersten Phasen der Entwicklung, in denen noch viele Parameterkombinationen und Kombinationen von Algorithmen getestet werden. Die lästige Aufgabe der manuellen Definition und Verknüpfung der Steuerungselemente mit der Implementierung des Bildverarbeitungsalgorithmus entfällt. Die Grundlage der Generierung von Steuerungselementen bilden Parameter-Metainformationen. Das vorgestellte Konzept erfordert für die Definition der Parameter-Metainformationen nur minimalen Aufwand (im Regelfall eine Zeile Quellcode je Parameter), reduziert die Fehleranfälligkeit durch weitgehende Typsicherheit zur Kompilationszeit, erlaubt die Realisierung mächtiger Steuerungselemente und die automatische Aktualisierung der Steuerungselemente auch bei indirekten oder programminternen Parameteränderungen. Zugleich wird durch Nutzung des Konzepts die Anforderung des Speicherns und Wiederherstellens von Parametersätzen – zur Protokollierung, zum Test verschiedener Einstellungsmöglichkeiten und als Vorgabewerte für unterschiedliche Aufgaben – ohne Zusatzaufwand erfüllt.

Flexibilität in der Anwendung durch Kombinierbarkeit der in das System integrierten Funktionalitäten ist vor allem in den ersten Phasen der Entwicklung von großer Bedeutung, nicht nur zur Zusammenstellung eines leistungsfähigen Bildverarbeitungsprozesses, sondern auch zur Kontrolle von dessen Ergebnissen. Insbesondere Funktionalitäten zur Visualisierung können dazu dienen, die Ergebnisse von anderen Funktionalitäten, beispielsweise zur Segmentierung oder Registrierung, zu überprüfen. Statt für jede Aufgabe einen eigenständigen Prototyp mit dementsprechend eingeschränkter Funktionalität zu realisieren, ergeben sich bei Integration einer wachsenden Anzahl implementierter Funktionalitäten in ein System zunehmend Synergieeffekte. Das Konzept zur Realisierung von Multi-Mode-Applikationen ermöglicht es, das System auch bei einer großen Zahl von integrierten Funktionalitäten in einer wartbaren Form zu halten. Aus den implementierten Funktionalitäten kann auf einfache Weise ein bedarfsspezifisches System zusammengestellt werden. Das Konzept der Daten-Pools erlaubt eine flexible, kombinierte Nutzung der in das System integrierten Funktionalitäten. Die Kombination kann temporär durch den Benutzer des Systems erfolgen, z.B. durch Auswahl der Ergebnisse einer Funktionalität zur Weiterverarbeitung durch eine andere Funktionalität, oder vorkonfiguriert werden. Beispielsweise können mehrere Funktionalitäten zur Arbeit auf den selben Daten konfiguriert werden, sodass sich eine Änderung der Daten sofort in allen diesen Funktionalitäten (z.B. dreidimensionale Visualisierung und multiplanare Reformatierung) auswirkt. Daten-Pools dienen als Mittler zwischen den Funktionalitäten, sodass Funktionalitäten als selb-

ständige Einheiten implementiert und somit unabhängig voneinander eingesetzt werden können.

Die entwickelten Konzepte werden detailliert beschrieben und im Anschluss diskutiert. Erst im Detail werden alle Vorteile und Möglichkeiten der Konzepte deutlich und somit für die Anwendung durch Dritte nutzbar. Die Leistungsfähigkeit von Konzepten zeigt sich oftmals erst nach intensiver Nutzung in einer Vielzahl von Anwendungsfällen. Echokardiographisches Bildmaterial stellt aufgrund seiner Komplexität (zeitlich aufgelöste, dreidimensionale Morphologie- und Geschwindigkeitsdaten in nicht-kartesischen Koordinaten) einen idealen, allgemeinen Erprobungsfall für Konzepte zur Realisierung von Bildverarbeitungssystemen dar.

Die entwickelten Konzepte wurden mit Erfolg zur Realisierung eines umfangreichen Systems für die drei- bzw. vierdimensionale Doppler-Echokardiographie, des EchoAnalyzer-Systems, eingesetzt. Die Entwicklung der Funktionalitäten des Systems erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung für Herzchirurgie der Chirurgischen Klinik der Universität Heidelberg im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 414 „Informationstechnologie in der Medizin – Rechner- und sensorgestützte Chirurgie“, Projekt H1 „Klinische Applikation und Entwicklung dreidimensionaler Verfahren zur Unterstützung der Diagnostik und Therapie“. Entwickelt und integriert wurden Funktionalitäten zur zwei- und dreidimensionalen Visualisierung, zur Segmentierung von Herzkavitäten und Herzklappenringen, zur Quantifizierung von Regurgitation, zur Analyse von Blutflussprofilen und zur dreidimensionalen Bestimmung globaler Parameter der Herzmuskelvitalität (Schlagvolumen, Ejektionsfraktion). Die neuentwickelten Methoden zur Analyse drei- bzw. vierdimensionalen Doppler-echokardiographischen Bildmaterials und die während ihrer Integration in das System als wichtig für die Praxistauglichkeit erkannten Aspekte werden dargestellt. Mit dem EchoAnalyzer-System steht nun ein klinisch einsetzbares Software-Paket zur Evaluation, routinemäßigen Anwendung und Unterstützung der Weiter- und Neuentwicklung dreidimensionaler echokardiographischer Methoden zur Verfügung. Bereits durchgeführte wie zukünftig geplante klinische Anwendungen werden vorgestellt.

Viele Funktionalitäten sind auch außerhalb des Anwendungsbereichs Echokardiographie einsetzbar. Die Leistungsfähigkeit und das Anwendungsspektrum der Konzepte und realisierten Funktionen wird durch die Tatsache unterstrichen, dass Zusammenstellungen von Funktionalitäten des EchoAnalyzer-Systems bereits in mehreren Projekten (derzeit neun) außerhalb des Projekts H1 des Sonderforschungsbereichs 414 und des Anwendungsbereichs Echokardiographie genutzt werden.

Resümierend lässt sich feststellen, dass aufgrund der vorgestellten Konzepte und bereits realisierten Funktionalitäten eine deutlich effizientere Entwicklung neuer, in der Praxis einsetzbarer Bildverarbeitungsprozesse möglich wird. Mit der Entwicklung des leistungsfähigen EchoAnalyzer-Systems wurde der Erfolg der Gesamtkonzeption unter Beweis gestellt.