

# Schritthaltende 3D-Kartierung zur mobilen Inspektion verfahrenstechnischer Anlagen

P. Kohlhepp, IAI; D. Fischer, FH Offenburg

## Problemstellung

Fahrzeuge, die unter Tage, in Fabrikanlagen, im Freien oder im Weltraum selbständig („autonom“) agieren, benötigen *dreidimensionale*, gleichwohl kompakte und für die Planung von Wegen und Aktionen nützliche Geometriemodelle. Ihre räumliche Wahrnehmung wird die heutiger Kanalroboter oder Reinigungsroboter bei weitem übersteigen. In diesem Beitrag geht es speziell um Serviceroboter, welche verfahrenstechnische Anlagen im Rahmen der zustandsabhängigen Instandhaltung mit Distanzsensoren von außen routinemäßig *inspizieren* sollen. Die Fahrzeuge sollen auf mehreren Ebenen der Anlage frei navigieren, um die Temperaturverteilung an isolierten Kesseln oder Öfen mit einer Wärmebildkamera zu messen, oder undichte Flansche oder Ventile mit der Elektronischen Nase zu erschnüffeln. 3D-Informationen sind mit nicht geometrischen Signalen wie Temperaturen und Gaskonzentrationen zu Aussagen wie *Hot Spot* oder *Leck* zu verknüpfen.

Gute Gründe sprechen dafür, dass die Fahrzeuge die Kartierung der Anlage, wie sie für ihre Aufgaben angemessen ist, selbst erledigen, statt ein extern und zu einem ganz anderen Zweck erstelltes CAD-Modell erst anzupassen. Zur Aufnahme eignen sich optische Sensoren wie Laserscanner, Stereokamera oder Infrarotkamera. Bei der Erkundung, ob autonom oder bedienergeführt, sind viele *Teilansichten* von unbekanntem oder unsicheren Positionen aus wie in

einem Puzzle lagerichtig zuzuordnen und redundanzfrei zusammensetzen: alle Teile sollen im Ganzen wiedererkannt, aber überlappende Teile nur einmal repräsentiert sein. Das Ziel lautet, zunächst den Grundzyklus *Zuordnen*→*Lokalisieren*→*Verschmelzen* für die Teilansichten zeitlich schritthaltend und trotz Messfehlern, Verdeckung und eingeschränkter Sichtbarkeit zuverlässig zu realisieren. Die Lagebeziehung zwischen der mit dem Fahrzeug verknüpften Teilansicht und einer zweiten Karte liefert die Fahrzeugposition. In dem Grundzyklus liegt der Schlüssel zur Lösung der meisten geometriebezogenen Probleme mobiler Systeme: Kartierung bei gleichzeitiger Selbstlokalisierung, Wegplanung, Inspektion und Objekterkennung. Der Artikel gibt im ersten Teil eine Übersicht über hierzu laufende Arbeiten am IAI und stellt im zweiten Teil die Zukunftsvision Mobile Inspektion vor.

## Repräsentation und Rekonstruktion

Erfolgsentscheidend für die Aktionen im „Puzzlespiel“ ist die Repräsentation der Teile wie des Ganzen. So ist eine *globale* Beschreibung der Geometrie eines Bauteils, etwa als Verteilung der Normalenvektoren, schwer handhabbar, wenn Teile des Objektes verdeckt oder nicht sichtbar sind, oder wenn eine solche Darstellung die Objekte nicht eindeutig charakterisiert. *Lokale* (oder *merkmalbasierte*) Modelle beschreiben dagegen explizit, wie ein Objekt sich aus einzelnen Merkmalen zusammensetzt. Sie

untergliedern sich in *Rastermodelle*, *geometrische* und *topologische* Modelle. Rastermodelle, z.B. Gitternetze oder Voxelmodelle, teilen den Gesamtraum in gleich große Zellen auf und ordnen ihnen einen diskreten Zustand „frei“ oder „belegt“, oder eine Wahrscheinlichkeit zu, durch Objekte belegt oder Aufenthaltsort des Fahrzeugs zu sein. Bei einer vorgegebenen Mindestauflösung des Raumes wächst ihr Aufwand proportional zum Volumen und unabhängig von der tatsächlichen Komplexität der Anlage. Dies ist bei drei Dimensionen nicht mehr tragbar. Hingegen bilden geometrische Modelle nur die real vorhandenen, miteinander verknüpften Elemente ab. Topologische Modelle ähneln den geometrischen, legen aber den Schwerpunkt mehr auf die qualitativen und funktionalen Zusammenhänge zwischen den Elementen als auf metrische Informationen. Die Elemente bilden die Knoten, und ihre Verknüpfungen die Kanten eines Graphen. Elemente wie Verknüpfungen tragen zusätzliche numerische oder symbolische Attribute, daher spricht man von *attributierten Graphen* [1].

Als Grundelemente kommen Punkte, Kanten, Oberflächenstücke oder Volumina in Frage. Zunehmende *Verdichtung* der Daten, wachsender Nutzwert für die Wiedererkennung und für die Planung von Aktionen durch ein Fahrzeug, aber auch wachsende Probleme gehen damit einher, die Elemente aus Sensordaten automatisch abzuleiten. Laser-Radar-Sensoren liefern durch punkt-, zeilen- oder flächenweise Abtas-

tung der Körperoberfläche ein 3D-Punktmodell.

Eine automatische *Segmentierung* kann daraus geometrisch sinnvolle *Oberflächenstücke* und *Flächenbeziehungen* (Relationen) generieren. Jedes Flä-

chenstück ist durch ein oder mehrere Polygone berandet. Sein Inneres wird durch eine Ebene oder quadratische Approximationsfläche angenähert und zusätzlich durch die Verteilung der Krümmungen charakterisiert. Schwerpunkt- und Richtungsvektor (ge-

mittelter Normalenvektor, der vom Material weg zeigt), Flächeninhalt und Ausdehnung sind weitere Attribute. Das Gewicht misst die Bedeutung der Fläche für die Teilansicht und hängt von Größe und Sichtbarkeit ab. Relationen kennzeichnen die Übergänge zwischen Flächenstücken, etwa als Unstetigkeiten des Abstands (Sprungkanten), der Richtungsvektoren (Schnittkanten) oder der Krümmungen. Zu den geometrischen Attributen kommen weitere hinzu: eine Fläche wird nach Vorgaben eines Bedieners einem Anlagenbauteil zugeordnet, erhält Vorschriften für die Inspektion und im Betrieb erhobene Inspektionsbefunde. Spezielle Flächen, zum Beispiel der Boden, dienen dem Fahrzeug zur Wegplanung (Abb. 1). Attributierte Oberflächenmodelle sind also kompakt, leicht erweiterbar und automatisch aus Sensordaten generierbar und eignen sich somit hervorragend als internes Weltmodell für ein Inspektionsfahrzeug.

Künstliche Landmarken (Beacons, Reflektoren [2]) können die Lokalisierung der Roboter und die Kartierung der Einsatzumgebung erleichtern. Sie erfordern aber eine aufwändige Präparierung der Anlage, ebenso wie im Gebäude installierte Kameranetze [3], welche die Fahrzeuge dirigieren. Satellitengestützte Navigationssysteme (GPS) gewährleisten in umbauten Fertigungsanlagen mit vielen Abschattungen keinen sicheren Empfang. Auch sei daran erinnert, dass der Einsatz von GPS eine Karte der Einsatzumgebung, welche Koordinaten mit Zielen verknüpft

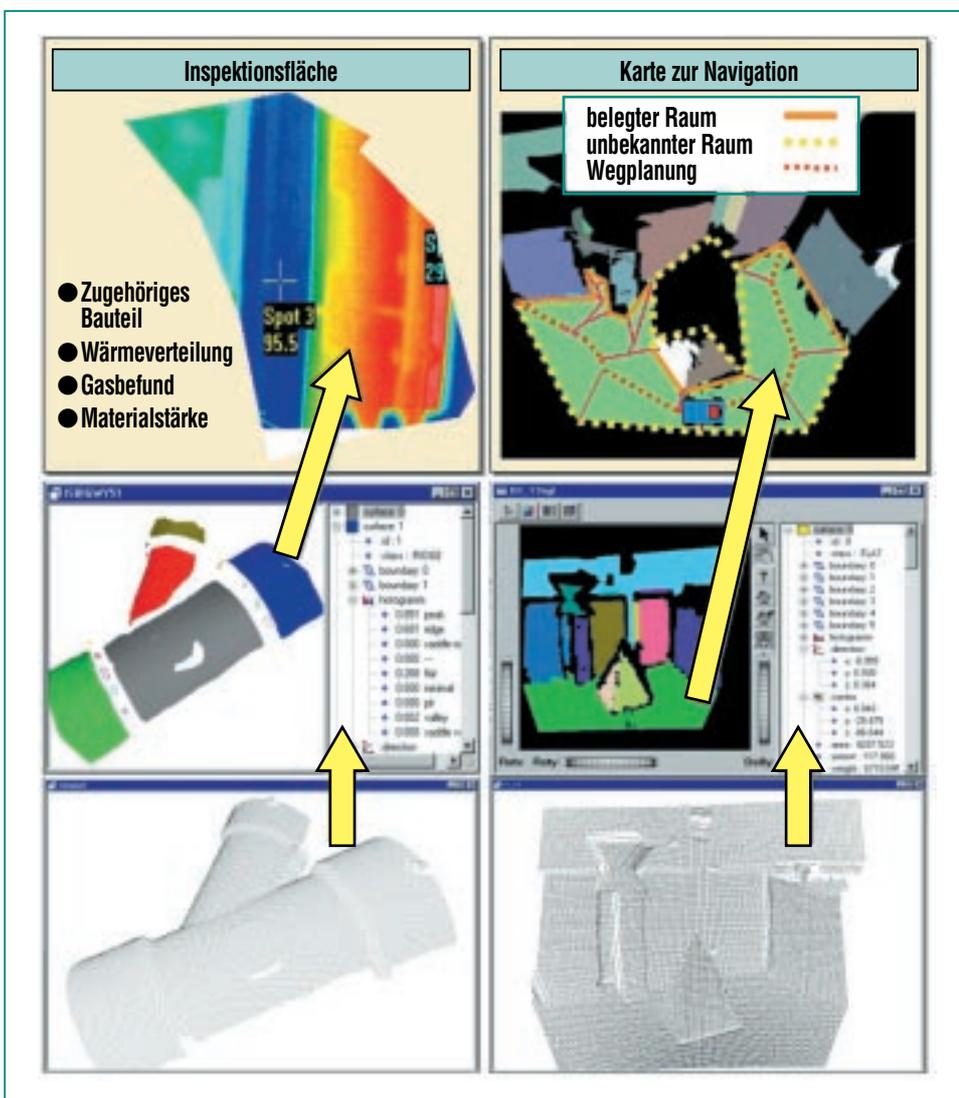


Abb. 1: Vom Tiefenbild (unten) über das attributierte Oberflächenmodell (Mitte) zum Weltmodell (oben), das mobilen Robotern gleichermaßen zur Inspektion wie zur Erkundung der Einsatzumgebung dient. Das Bild oben links zeigt ein der zylindrischen Fläche aufgeprägtes Infrarotbild (vom Drehrohrföfen der THERESA-Anlage). Im Bild oben rechts ist die Bodenfläche des Fahrzeugs als Grundriss dargestellt, an dem die Skelettierung, Wegplanung und Abgrenzung des belegten bzw. unbekanntes Raumes vorgenommen wird.

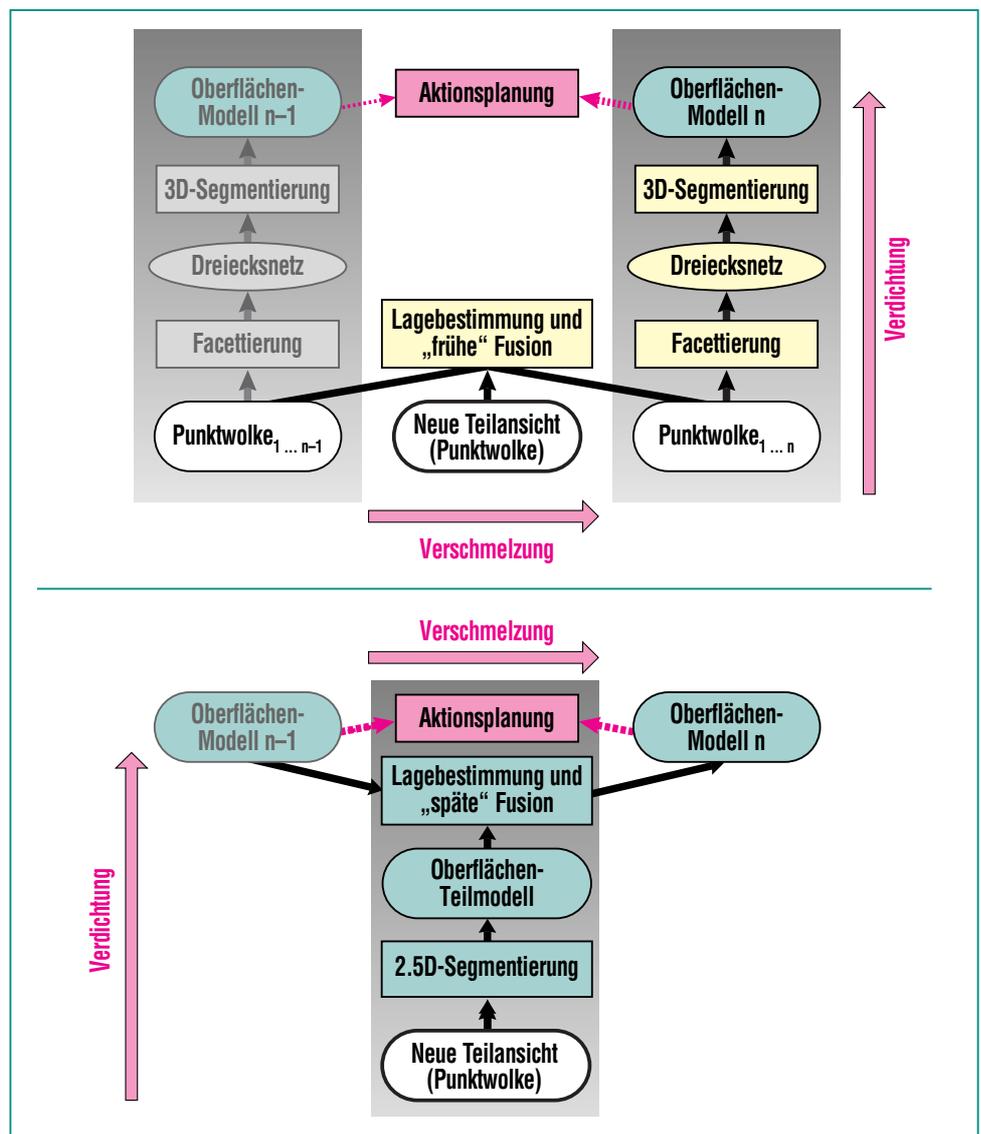
(beim Auto-Navigationssystem die digitalisierte Straßenkarte), *voraussetzt*, und nicht überflüssig macht. Mobile Systeme, die sich selbst charakteristische natürliche, ortsfeste Landmarken als Referenzen suchen, sind universeller und flexibler einsetzbar. Wand-, Boden- und Deckenflächen, Pfeiler, Röhren, Behälter oder sonstige auffällige Objekte können dazu dienen.

Ein beliebtes Verfahren zur Gewinnung von 3D-Modellen ist die *Rekonstruktion aus Silhouetten* [4]. Dabei rotiert das Objekt auf einem Drehteller, oder die Kamera fährt um das Objekt. Das Volumen wird durch sukzessive Schnittbildung von Kegelvolumina erzeugt, die den Blickpunkt als Scheitel und den Umriss des Objektes als Grundfläche haben. Dies funktioniert nur, wenn das Objekt als Ganzes im Sensorfenster sichtbar und vom Hintergrund einfach zu trennen ist, eine bei komplexen Anlagen nicht erfüllbare Annahme. Hier kommt nur die *Rekonstruktion aus überlappenden Teilansichten der Oberfläche (Projektionen)* [5] in Frage.

Die Rekonstruktion muss also die *Verschmelzung* immer größerer Karten, und gleichzeitig die *Verdichtung* von Punkten zu Flächen und schließlich symbolischen Merkmalen leisten. Es kommt nun darauf an, wie beide Aufgaben miteinander verzahnt sind. Fast alle Rekonstruktionsverfahren sammeln und verschmelzen dichte Punktmodelle aller Teilansichten (*Frühe Fusion*), und erzeugen daraus erst am Ende ein Flächenmodell [6]. Sie sind damit nicht Schritt haltend (Abb. 2). Ein

neues, am IAI entwickeltes Verfahren [7, 8] registriert und verschmilzt direkt die reduzierten Flächenmodelle (*Späte Fusion*). Das symbolische Modell zur Pla-

nung der Exploration, Navigation oder Inspektion wird also fortlaufend erweitert. Durch die Verdichtung verursachte Fehler und Informationsverluste wie Über-



**Abb. 2:** Zwei Wege zur fahrtbegleitenden Kartierung. Die frühe Fusion (oben) kann neue Teilansichten nur als Punktwolke oder Dreiecksnetz lagerichtig verschmelzen. Aus diesem wachsenden 3D-Punktmodell müsste eine zur Aktionsplanung geeignetere Karte, zum Beispiel Oberflächenmodell, jedes Mal neu abgeleitet werden. Facettierung und 3D-Segmentierung sind dabei kritische Operationen. Bei der späten Fusion (unten) wird jede Teilansicht sofort verdichtet (segmentiert) und direkt mit dem Oberflächenmodell der aktuellen Karte verschmolzen. Die Verschmelzung erfolgt also auf symbolischer Ebene; Rohdaten früherer Teilansichten sind nicht mehr verfügbar.

oder Untersegmentierung oder fehlende Flächen müssen dabei aber toleriert werden. Ein numerisch genaues, photorealistisch glattes, zusammenhängendes CAD-Modell ist ohne eine interaktive Nachbearbeitung [9] so nicht zu erreichen.

### Realisierte Verfahren zur Lokalisierung und Kartierung

#### Drei-Ebenen-Architektur

Wir beschränken uns hier auf die paarweise Verarbeitung segmentierter Teilansichten derselben

Umgebung mit unbekannter Überlappung. Die Zuordnung einander entsprechender („korrespondierender“) Flächen, und die Schätzung ihrer Lagebeziehung stehen in enger Wechselwirkung. Beide werden gleichzeitig so bestimmt, dass eine Gesamtähnlichkeit der Teilansichten maximal wird. Diese wird, vereinfacht gesagt, um so größer, je ähnlicher die korrespondierenden Flächenmerkmale unter der geschätzten Lage und je umfassender die Zuordnung. Da das Optimierungsproblem im ungünstigsten Fall exponentielle Komplexität besitzt, aber unter der Echtzeitbedingung

des mobilen Roboters steht, erweist es sich als sinnvoll, verschiedenartige Verfahren zu kombinieren, die auf drei Ebenen miteinander kooperieren und gleichzeitig um die beste Lösung in vorgegebener Zeit konkurrieren (Abb. 3).

Die unterste Ebene paart Flächen in einer tiefenbegrenzten Baumsuche, welche Sektoren begrenzter Knotenzahl nacheinander absucht und lageunabhängig die Gesamtähnlichkeit maximiert. Sie ist damit auch robust gegenüber unbekannter oder falscher Anfangslage. Die mittlere Ebene verfeinert die besten Zu-

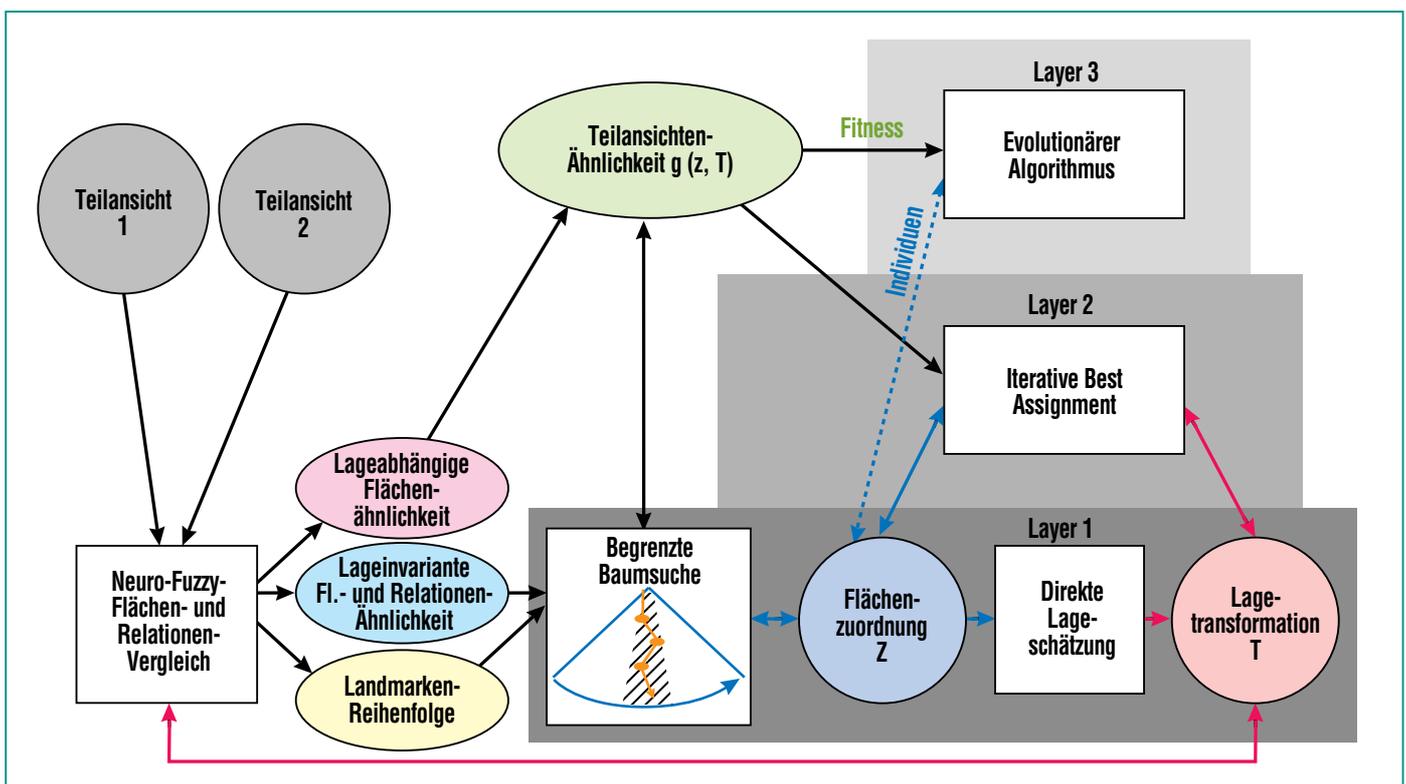


Abb. 3: Verfahren, das Oberflächenmodelle unbekannter Überlappung lagerichtig zusammen fügt („registriert“). Layer 1 findet korrespondierende Flächen durch breiten- und tiefenbegrenzte Baumsuche und schätzt daraus eine erste grobe Lagetransformation. Layer 2 optimiert gleichzeitig die Flächenzuordnung und verfeinert die Lagetransformation. Layer 3 mutiert und rekombiniert Zuordnungen, um aus lokalen Minima zu entkommen. Gemeinsame Zielfunktion ist die Ähnlichkeit der Teilansichten, die sich aus den lageabhängigen Ähnlichkeiten der korrespondierenden Flächen und Flächenbeziehungen zusammen setzt.

ordnungen und daraus geschätzte Lagetransformationen im Hinblick auf maximale lageabhängige Ähnlichkeit. Die oberste Ebene, ein evolutionärer Algorithmus, bringt ein stochastisches Element ein: sie verändert Zuordnungen über die genetischen Operatoren der Mutation und Rekombination, und bedient sich wiederum der beiden unteren Ebenen zur Feinoptimierung der Lage und zur Ähnlichkeitsberechnung. Die Teilansichten-Ähnlichkeit dient als Fitnessfunktion zur Bewertung. Während bei großer Überlappung der Teilansichten oder eindeutiger Lösung die unteren Ebenen zuerst erfolgreich sind, entkommt die obere Ebene leichter den lokalen Optima der Lagetransformation, sofern insgesamt mehr Zeit zur Verfügung steht.

### Flächen-Ähnlichkeitsmaße

Für eine gute Bewertung der Lösungen sind schon auf Merkmals-ebene *Ähnlichkeitsmaße* wichtig, welche Verdeckung, begrenzte Sicht, ungenaue Flächenattribute sowie Formabweichungen der Berandungen in einem hohen Maße tolerieren und gleichwohl unterscheidungs-fähig bleiben. Drei solcher Maße wurden als Neuro-Fuzzy-Regelwerke entwickelt: die lageinvariante und die lageabhängige Flächenähnlichkeit sowie die Relationenähnlichkeit. Normierte Differenzen oder Quotienten der Attributwerte bilden den Eingabevektor, ein Wert im Intervall [0,1] das Ausgangssignal. Die Verknüpfung wird durch ein Fuzzy-Regelwerk beschrieben; dazu müssen die Ein- und Ausgangssignale als lingu-

istische Variable mit Zugehörigkeitsfunktionen spezifiziert werden. Deren Parameter und die Regelgewichte werden – nach Training an Beispielen – durch ein Neuronales Netz eingestellt, das dem Fuzzy-Regelwerk äquivalent ist und das durch ein kommerzielles Entwicklungswerkzeug (FuzzyTech 5.01) automatisch erzeugt wird [7].

Typischerweise bestimmen einige der Eingangsattribute die Wirkung anderer auf den Ausgang. Die Verknüpfung ist also nichtlinear. Ist zum Beispiel das Attribut „Verdeckungsgrad“ bei zwei Flächen hoch, was hohe Unsicherheit bedeutet, haben Flächeninhalte oder Formeigenschaften nur geringen Einfluss auf ihre lageinvariante Ähnlichkeit. Oder: solange der „Versatz“ einer Fläche normal zu einer anderen hoch ist, bleibt deren lageabhängige Ähnlichkeit durchweg niedrig. Wenn die Fehler normal zur Oberfläche dagegen klein und die Richtungsvektoren fast gleich sind, zählt der Grad der Überlappung der – gegenüber Rauschen und Verdeckung empfindlichen – Berandungen, der letztlich für die Verschmelzbarkeit der Flächen wichtig ist.

### Zuordnung nach Landmarkenkriterium

Als entscheidend für den Erfolg der *Baumsuche* [10] erweist sich, ob es gelingt, diejenigen Flächen einer Teilansicht zuerst zuzuordnen, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit überhaupt eine korrespondierende in der Nachbaransicht besitzen, und zu denen die passende Fläche möglichst eindeutig und zuverlässig ange-

geben werden kann. Flächen mit diesen Eigenschaften bezeichnen wir als gute natürliche *Landmarken*. Um sie zu finden, werden mehrere Kriterien verwendet, die Flächeneigenschaften einer oder beider Teilansichten bewerten. Eine gute Landmarke

1. ist vorzugsweise eben (hat einen hohen Anteil lokal planarer Pixel)
2. ist unverdeckt (hat einen hohen Anteil von Berandungen, der durch Relationen zu Nachbarflächen erklärt ist)
3. hat viele Nachbarflächen, die in Relation zu ihr stehen
4. ist gut sichtbar (nahe am Sensor, dem Sensor zugewandt, hat hohe Punktdichte)
5. ist markant: wenige Flächen der Vergleichsansicht, aber mindestens eine, haben ähnliche Merkmale
6. ist relational verträglich: für die beste Zuordnung zur Nachbaransicht ist die mittlere relationale Ähnlichkeit aller diese beiden Flächen enthaltenden Flächenpaare hoch
7. hat eine zumindest mittlere Größe
8. liegt zentral und grenzt möglichst wenig an den Rand des Sensorblickfeldes
9. hat oft eine invariante Orientierung im jeweiligen Sensor- bzw. Fahrzeugkoordinatensystem
10. besitzt eine gewisse Stetigkeit, war also in Nachbaransichten bereits korrespondierend.

Die Reihenfolge der Flächen nach absteigender Landmarkenqualität wird sogar dynamisch in Abhängigkeit vom aktuellen Suchpfad angepasst (*Forward Checking* [11]). Dies vermeidet die Leerzuweisung von Flächen (*Wildcard* [10]) mit ihrer kombinatorischen Aufblähung, die bei starrer Reihenfolge notwendig ist, wenn mit Flächen ohne Korrespondenten zu rechnen ist. Die *Wildcard* macht jede Komplexitätsreduktion, die für die echten Zuordnungen durch die Ähnlichkeitsbeschränkungen erzielt wurde, wieder zunichte.

### Direkte Lageschätzung

Aus dem best bewerteten Suchpfad jedes Baumsektors werden korrespondierende Flächenmerkmale extrahiert und daraus eine Transformation geschätzt, die im einfachsten Fall aus einer Drehung im Raum (Rotationsmatrix) und einer Verschiebung (Translationsvektor) besteht. Zur Schätzung existieren geschlossene Verfahren, welche Euklidische Vektorabstände minimieren [12]. Sie minimieren zwar nicht direkt unser komplexeres Ähnlichkeitsmaß, liefern aber brauchbare Startwerte für die optimale Lage.

Paare von Richtungs- oder Achsenvektoren korrespondierender Flächen legen zunächst nur die Rotation fest. Die Bestimmung der Translation erfordert zusätzlich Punkte, etwa korrespondierende Flächenschwerpunkte oder Stützpunkte der Berandungspolygone. Da diese Merkmale stark von der Blickrichtung, Verdeckung und Segmentierung abhängen, dürfen sie nicht direkt aufeinander abgebildet werden. Vielmehr sind die Lotabstände der Punkte zu ihren Partnerflächen zu minimieren (Punkt-Flächen-Korrespondenzen). Da dieses Problem nicht auf eine geschlossene Lösung für Rotation und Translation gemeinsam führt, wird aus Vektorpaaren zuerst die Rotation bestimmt, und zu dieser dann im zweiten Schritt die Translation, die die quadratischen Lotabstände minimiert.

### Iterative Verfeinerung

Da die Baumsuche nur lageinvariante Beschränkungen einsetzt, muss es weder eine Lagetransformation geben, die alle Flächen des Suchpfades paarweise aufeinander abbildet, noch muss die Zuordnung die größtmögliche sein. Zuordnung und Lage sind also weiter zu verbessern. Dabei wird abwechselnd die Lage fixiert, Flächen aus der Zuordnung entfernt und neue ihr hinzugefügt, solange die Ähnlichkeit der Teilansichten wächst, und dann die Zuordnung fixiert und die optimale Lage dazu neu geschätzt. Anders als bei dem bekannten *Iterative-Closest-Point*-Algorithmus [13] zur Registrierung von 3D-Datensätzen schrumpft oder wächst

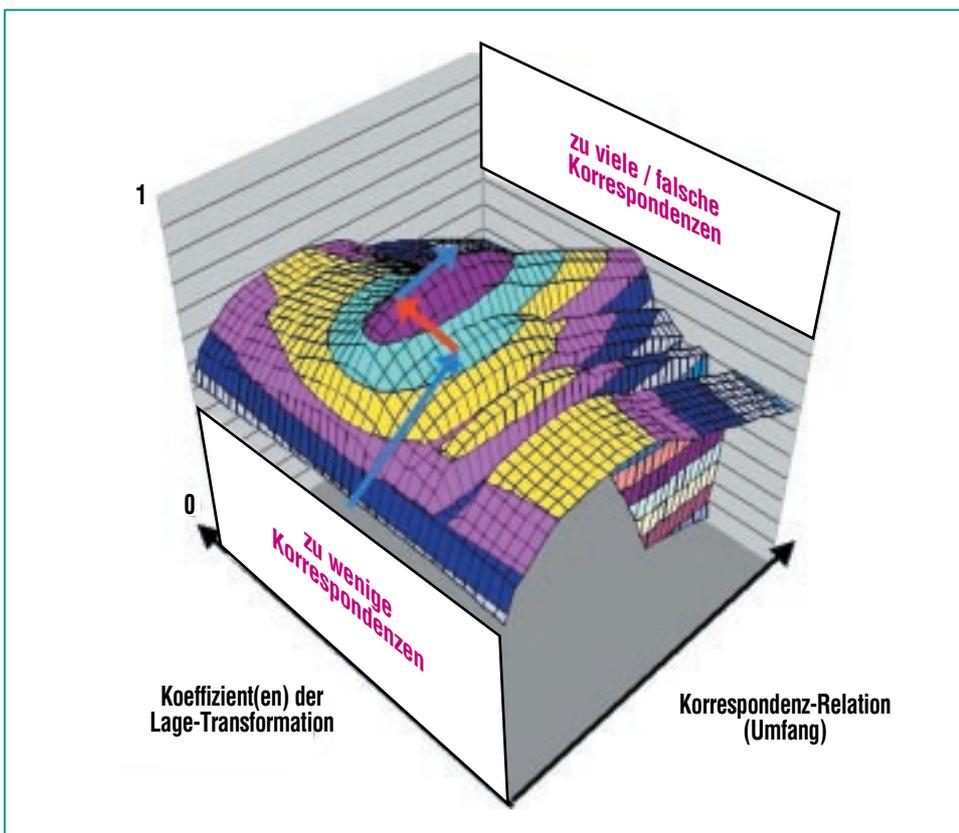


Abb. 4: Teilansichtenähnlichkeit als Funktion der Lagetransformation und Zuordnung für zwei konkrete, segmentierte Teilansichten eines Innenraums (vgl. auch Abb. 5). Der blau-rot gezeichnete Pfad symbolisiert das abwechselnde Erweitern (oder Schrumpfen) der Zuordnung und das Nachjustieren der Lagetransformation.

hier also die Menge korrespondierender Merkmale.

In Abb. 4 ist die lageabhängige Ähnlichkeit zweier Teilansichten beispielhaft und vereinfacht als Funktion nur eines von sechs Lagekoeffizienten und der Anzahl zugeordneter Flächen dargestellt. Die zugrunde liegenden Flächen- und Relationenähnlichkeiten sind um Strafterme vermindert, die aus der Verteilung der Ähnlichkeiten automatisch berechnet werden und die Gesamtähnlichkeit bei Hinzunahme schlecht korrespondierender Merkmale sinken lassen. Mit zunehmender Größe der Zuordnung sinkt also die Ähnlichkeit wieder ab. Zu gegebener Zuordnung bewertet die Ähnlichkeit den Lagefehler der Transformation, der im Fall zu weniger Korrespondenten aber nur wenig Aufschluss über die gesuchte Transformation gibt („flache“ Flanke), im Fall zu vieler oder falscher Korrespondenten dagegen viele lokale Lagemaxima aufweist („zerklüftete“ Flanke).

### Lagefortschreibung

Grundsätzlich funktioniert das Verfahren, auch wenn das Fahrzeug ohne Vorwissen über seine Lage in der Umgebung ausgesetzt wird. Steht solches Wissen in Form von Weggebersignalen (Odometrie und Koppelnavigation) zur Verfügung, kann es zu einer effizienteren fortlaufenden Lokalisierung genutzt werden. Dazu werden die Positions- und Richtungsänderungen des Fahrzeugs zwischen zwei Teilansichten zunächst aufintegriert und daraus eine Transformation geschätzt. Besonders die Rotati-

on wird nach längerer Fahrt sehr ungenau. Ist die Verteilung, oder sind obere Schranken für die Schätzfehler der Transformation bekannt, so kann aus der Distanz zwischen vorhergesagter (transformierter) Lage von Merkmalen der ersten und beobachteten Merkmalen der zweiten Ansicht ein Ähnlichkeitswert zwischen 0 und 1 angegeben werden, der Merkmalszuordnungen außerhalb des Unsicherheitsbereiches ausschließt. Damit wird der Suchbaum nochmals drastisch ausgedünnt.

### Verschmelzung von Oberflächenmodellen

Nachdem die größtmögliche Flächenzuordnung bestimmt und eine der beiden Teilansichten unter der berechneten Lage transformiert wurde, wird versucht, alle Flächenstücke, die über Zuordnungen direkt oder indirekt verknüpft sind, miteinander zu verschmelzen. Dazu werden die Berandungspolygone so fusioniert („vernäht“), dass die Vereinigungsmenge der Teilflächen umschlossen wird. Ein neuartiger Algorithmus erkennt und mittelt im 3D-Raum *gleichlaufende* Konturstücke mit geringem Abstand und verfolgt an *Verzweigungs- oder Kreuzungsstellen* die *lokal erweiternde* der beiden Konturen [8]. Neben der äußeren Berandung können bei diesem Prozess zusätzliche innere Berandungen („Löcher“) entstehen. Andere Flächenattribute wie Schwerpunkte oder Richtungsvektoren werden aus den Attributen der Teilflächen gewichtet gemittelt.

Flächen ohne Korrespondenten oder solche, deren Verschmel-

zung scheitert, werden der Resultatbeschreibung hinzugefügt, falls keine Sichtbarkeitskonflikte mit weiteren Flächen bestehen. Andernfalls werden sie gelöscht. Zur Prüfung der Sichtbarkeit werden die Berandungen in einem gemeinsamen Koordinatensystem dargestellt und die Überlappungen festgestellt.

### Beispiele zur Kartierung

Die in Visual C++ 6.0 realisierten neuen Algorithmen zur Rekonstruktion von Objekten und Innenräumen werden zunächst an mehreren Bildserien erprobt, bevor sie auf ein Fahrzeug portiert werden. In diesem Beitrag werden segmentierte Tiefenbilder (128x128 Pixel) untersucht, die in einer Laborumgebung an *unbekannten* Positionen von einem realen Fahrzeug mit Laserscanner aufgenommen und von der University of South Florida [14] zur Verfügung gestellt wurden. Abb. 5 zeigt ein Verschmelzungsergebnis von sieben Teilansichten. Die Tiefe des Suchbaums ist auf 12 begrenzt, und jeder Sektor umfasst 1000 Knoten. Alle Ergebnisse beruhen auf der besten Zuordnung des *ersten* Sektors des Suchbaums, daher sind die Laufzeiten für paarweise Zuordnung und Registrierung auf 300-800 msec begrenzt (auf einem 650-MHz-PC). Die eigentliche Verschmelzung hat einen ähnlichen Zeitbedarf. Der Anteil der Fehlzuweisungen in der Baumsuche liegt hier bei etwa 3.5%. Abb. 6 zeigt mit der Rekonstruktion eines Sessels aus 16 Teilansichten, dass das Verfahren auch große Messfehler und Verzerrungen verkraftet.

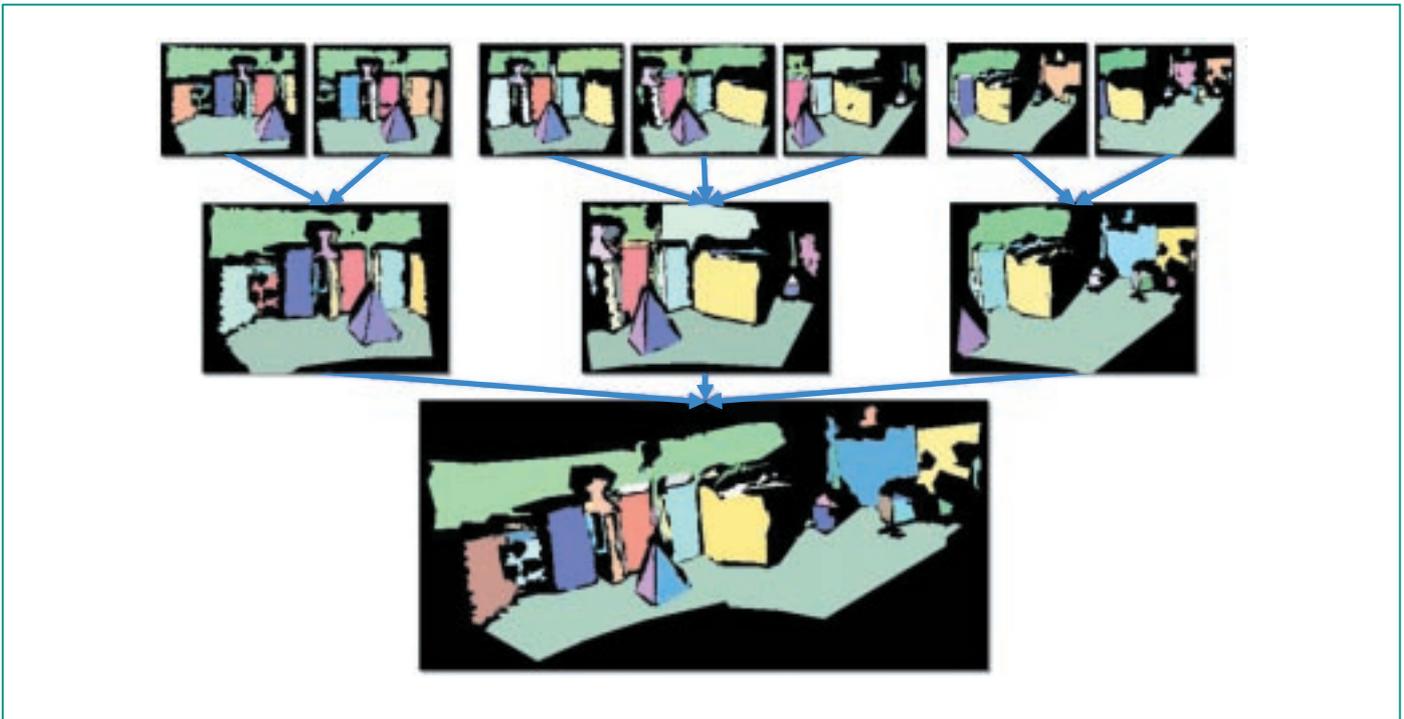


Abb. 5: Verschmelzung einer Sequenz aus sieben segmentierten Oberflächenmodellen eines Laborinnenraums. Die zugehörigen Aufnahmepositionen des Fahrzeugs sind unbekannt.

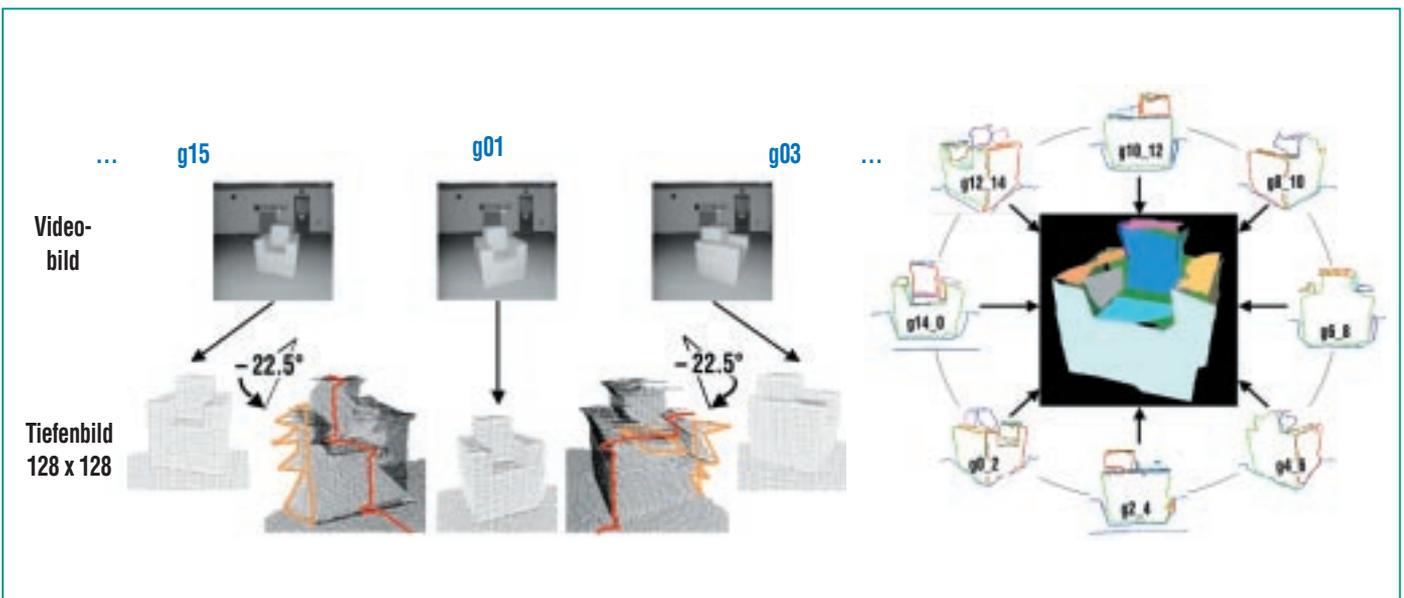


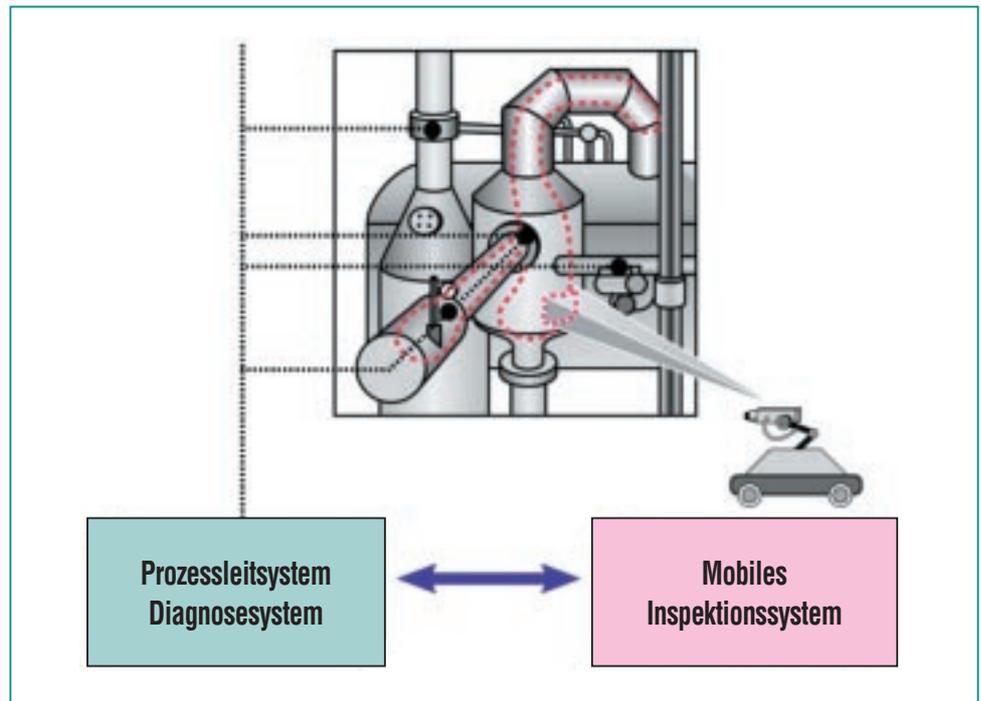
Abb. 6: Rekonstruktion eines Sesselmodells aus 16 Tiefenbildansichten, die grobe Messfehler in Richtung der optischen Achse aufweisen (linkes Bild, die rote Scanlinie verdeutlicht den Verlauf von Konvex- und Konkavkanten, orange Bereiche stehen für 'mixed-points'). Diese Fehler werden durch Drehung des linken bzw. rechten Tiefenbildes um  $\pm 22.5^\circ$  in die Perspektive der mittleren Ansicht sichtbar. Das Bild rechts illustriert das Ergebnis der letzten acht Verschmelzungsschritte, wobei jedes Teilmodell aus drei benachbarten, segmentierten Ansichten entstand.

Neben einer systematischen quantitativen Bewertung und weiterer Verbesserung der Zuverlässigkeit arbeiten wir an der gemeinsamen Lageoptimierung von mehr als zwei überlappenden Teilansichten durch elastische Graphen. Zur Geometriebeschreibung von Kesseln, Rohrleitungen etc. sollen in Zukunft generalisierte Zylinder an Stelle allgemeiner quadratischer Oberflächen eingesetzt werden.

### Zukunftsvision Mobile Inspektion

Mobile Roboter, einzeln oder im Team, sollen einmal großtechnische Anlagen mit Hilfe von Wärmebildkameras, elektronischen Mikronasen und weiteren zerstörungsfreien Prüfsensoren flächendeckend von außen inspizieren und so eine Störungserkennung betreiben. Gegenstand der Inspektion können Rohrleitungen, Öfen oder Kälteanlagen mit ihrer Isolierung, Kessel, Kolonnen und Reaktoren, Ventile, Abluft- und Filterstrecken, Siebe, Pumpen und Lüfter, aber auch z.B. elektrische Anlagen sein. Das mobile System ergänzt das stationäre, über Prozessleitsystem (PLS) erschlossene In-line-Messstellennetz und soll wie dieses routinemäßig im Einsatz sein (Abb. 7).

Die Gesamtaufwendungen für Instandhaltung und Wartung liegen in Deutschland bei ca. 10% des Bruttosozialproduktes und betragen 1996 rund 265 Milliarden DM. Einen **Bedarf** für solche mobilen Systeme für Inspektion und Wartung sehen wir in folgenden Entwicklungen:



**Abb. 7: Die Führung und Überwachung verfahrenstechnischer Anlagen durch Prozessleitsysteme mit diskreten, stationären, im Innern angeordneten Sensoren wird ergänzt durch ein mobiles, auf Fahrzeuge verteiltes Sensornetz zur flächendeckenden Außeninspektion.**

1. Inspektion und Instandhaltung spielen eine wachsende Rolle im integrierten Kosten-, Qualitäts- und Umweltmanagement. Aus welchen Motiven auch immer – flexiblere Produktion, gesetzliche Auflagen zur Emissionsminderung, Senkung der Unfallzahlen, Senkung der Energiekosten und Klimaschutz, Werterhalt der Anlagen und Steigerung ihrer Verfügbarkeit – der Trend geht auch in der Instandhaltung zu formalisierten, standardisierten und zum Teil automatisierten Arbeitsweisen (*computer-aided facility management*, CAFM).
2. Die genannten Gründe führen auch dazu, dass auf derselben Anlage in immer kürzerer Folge neue Verfahren und Prozesse, Varianten und Verbesserungen „ausprobiert“ werden. Dies bedingt häufigeres An- und Abfahren oder Umstellen der Fahrweise, Befüllen, Entleeren und Reinigen. In solchen speziellen Wartungsaktionen scheint neben unerkanntem Verschleiß von Bauteilen eine Hauptursache von Betriebsstörungen und Unfällen in Anlagen zu liegen [15].
3. Stammpersonal für eine qualifizierte manuelle Inspektion bei den Betreibern ist knapp. Diese wenigen Fachleute, z.B. Thermographen, haben Wichtigeres zu tun, als routinemäßig in lauten, heißen oder emissionsintensiven Anlagen zu patrouillieren. Mit lei-

stungsfähigen Werkzeugen könnten sie mehr erreichen. Oftmals werden externe Anbieter von Inspektions-Dienstleistung gerufen, wenn Probleme auftreten. Eine wirklich flächendeckende Zustandserhebung wird aus Zeit- und Kostengründen oft nicht realisiert.

4. Stationäre Sensornetze sind zu grobmaschig zur Störungsfrüherkennung und zur Ortung von Defekten. Es erscheint impraktikabel, in einer komplexen Anlage überall dort einen Druck-, Temperatur- Gas- oder Lecksensor oder eine Kamera vorbeugend zu installieren, wo jemals ein Wächter sinnvoll werden könnte. Die Fehlerdia-

gnose allein aufgrund von In-line-Messgrößen erfolgt nicht zeitnah und nicht ursachenah: eine sich langsam anbahnende Funktionseinbuße wirkt sich oft erst über eine längere Ereigniskette an einem anderen Bauteil aus, wo sie vom Prozessleitsystem etwa als Druckabfall oder Notabschaltung bemerkt wird (Abb. 8).

5. Zur Innen- und zum Teil auch Außeninspektion von Rohrleitungen wurde eine Reihe schwimm- oder kriechfähiger Spezialsysteme mit Ultraschall-, Magnetstreulicht- oder Röntgensensoren [16, 17, 18] entwickelt. Die bekannten Lösungen sind in ihrem Einsatz-

spektrum durch Rohrdurchmesser, Rohrgeometrie, zulässige Wandstärken und Material stark eingeschränkt.

Mobile Inspektion verspricht wichtige **Vorteile** gegenüber dem geschilderten Stand der Technik:

**Flächendeckend und reproduzierbar:** Mobile, oft kostspielige Inspektionssysteme sind flexibel einsetzbar, wo immer sie benötigt werden, statt dort zu messen, wo ein System installiert ist. Speziell Infrarotkameras liefern flächenhafte Bilder hoher Auflösung. So können die Fahrzeuge auch große Anlagen effizient absuchen, etwa vom Weitwinkel-Panorama zum schwer zugänglichen

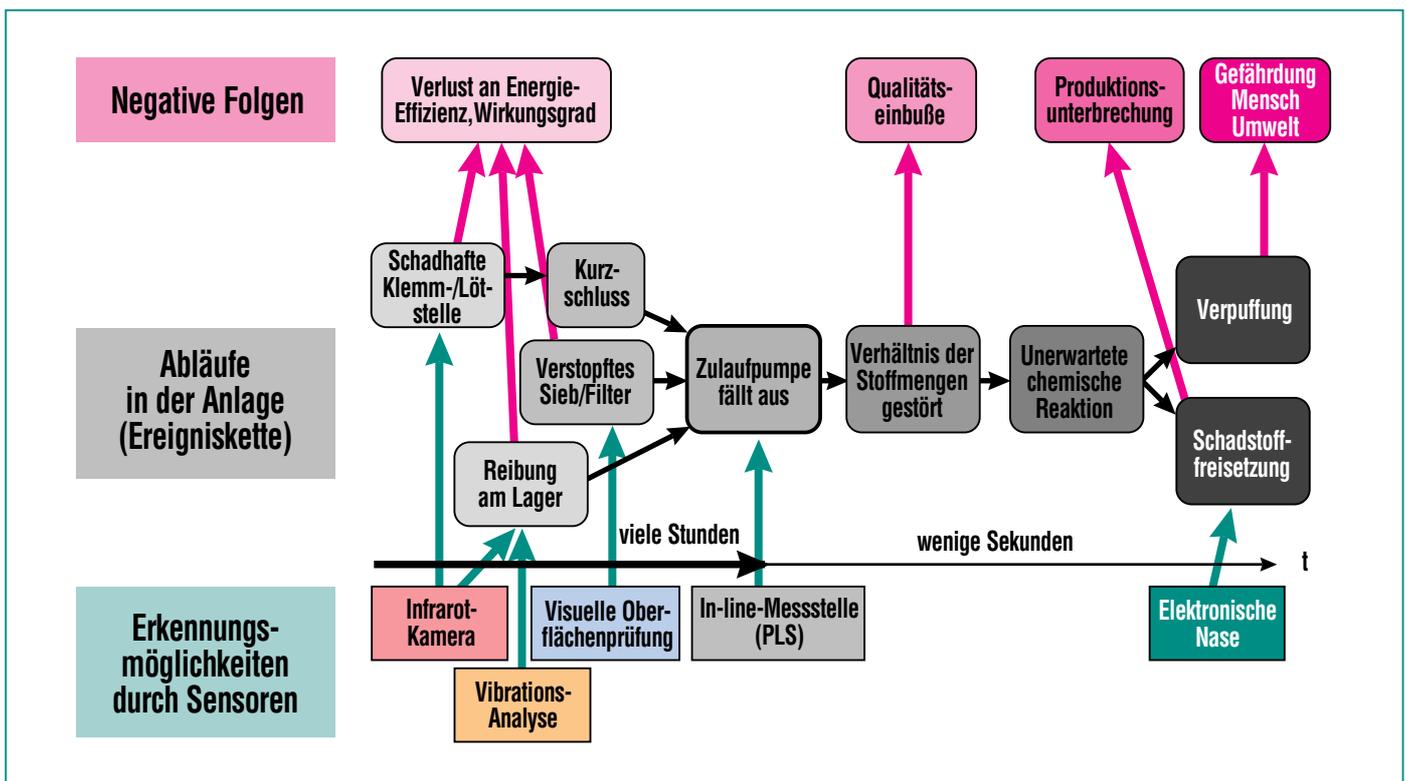


Abb. 8: Ereigniskette in einer chemischen Anlage, die letztlich zu einem Ausfall führen könnte, mit sensorielle Erkennungsmöglichkeiten. Zur Störungsfrüherkennung eignen sich in diesem Beispiel Infrarotkamera, visuelle Oberflächenprüfung oder Vibrationsanalyse, in anderen Szenarien Elektronische Nasen. Das Prozessleitsystem erhält vom Ausfall der Pumpe aber erst Kenntnis, wenn es für eine Störungsfrüherkennung zu spät ist.

Detail, zeitlich periodisch oder zustandsabhängig. Die Fahrzeuge können sich exakt und reproduzierbar zu bestimmten Bauteilen positionieren und vergleichbare Bildausschnitte immer wieder aufnehmen. Ihre individuelle und langfristige zeitliche Entwicklung („Anamnese“) liefert entscheidende Hinweise für eine automatische Auswertung wie für das Fachpersonal. Abweichungen von Normwerten für Temperaturverteilungen oder Gaskonzentrationen, auch wenn sich diese über einen Produktionszyklus ändern, lassen sich nachvollziehbar und lückenlos darstellen.

**Unbegrenzte Raumauflösung und Ortung:** Hochempfindliche *Elektronische Nasen* wie die am Institut für Instrumentelle Analytik (IFIA) entwickelten Systeme KAMINA [19] oder SAGAS werden, auf mobilen Fahrzeugen montiert und mit Geruchskarte und Suchalgorithmen ausgestattet, erst zu *Elektronischen Schnüffelhunden*, die selbständig etwa den Ort maximaler Konzentration eines austretenden Gases aufspüren. Auch die IR-Kamera kann im Zusammenspiel mit dem Lasersensor *Hot (oder Cold) Spots* in 3D lokalisieren.

**Zeit- und ursachennahe Störungsdiagnose:** da Alterung von Bauteilen oder Überlast sich oft langsam anbahnen, bringen die räumlich und zeitlich engmaschige Überwachung und die Kenntnis der realen Abnutzung von Bauteilen selbst bei plötzlichen Ausfällen einen Reaktionsvorteil. Ist die Inspektion auf mehrere Fahrzeuge verteilt, die über ein Mobilfunknetz kommunizieren, kann an weit entfernten Orten ei-

ner Anlage gleichzeitig gemessen werden.

**Nicht-invasive Inspektion:** Erstens wird das tatsächliche Betriebsverhalten während der Produktion beobachtet. Zweitens kann das Inspektionssystem nachträglich in einer bestehenden Anlage installiert werden; über die Stromversorgung (Akku-Ladestationen) hinaus stellt das System keine harten Anforderungen an die Infrastruktur.

**Informationstechnische Vernetzung:** die Fahrzeuge sind über eine Basisstation mit dem Leitsystem oder mit Systemen zur Diagnose oder Instandhaltungsplanung vernetzbar. Automatisch erstellte Inspektionsprotokolle können sicherheitstechnische Abnahmen erleichtern. Mit zusätzlichen Software-Modulen lassen sich Abnutzungsvorräte von Bauteilen für eine zustandsorientierte Instandhaltung schätzen. Auf der Basis modellgestützter thermographischer oder chemischer Auswertung können Bilanzen zur Energieeffizienz, Emissionen oder Produktqualität erstellt werden.

### *Meilensteine der Entwicklung*

Leitbild soll die Inspektion einer intakten und über Ebenen oder Rampen im Prinzip zugänglichen Anlage sein, nicht das „Trümmerszenario“, das zur Entwicklung vielgliedriger Fahrzeuge oder Schreitwerke mit komplexer Mechanik und Bewegungssteuerung herausfordert. Der Roboter soll auf einer kommerziell verfügbaren fahrbaren Grundplattform aufbauen; er sollte klein und wen-

dig sein (Wenderadius Null) und dank geeigneter Radsätze kleinere Hindernisse wie Kabel, Schläuche oder Stufen bis ca. 8 cm problemlos überwinden können. Um auf verschiedenen Niveaus aktiv zu werden, sollen mehrere Fahrzeuge eines Teams geeignet verteilt werden. Wo dies möglich ist, sind Lastenaufzüge oder Kräne zur Niveauüberwindung per Funk zu nutzen. Trotz des visionären Gesamtzieles lassen sich überschaubare Szenarien und Meilensteine der Entwicklung angeben.

### **1. Trainingsphase:**

Der Wartungsingenieur bringt dem Fahrzeug die Grundprogramme zur Inspektion der Anlage durch *Vormachen* bei. Er bestimmt den Fahrkurs und spezifiziert, welche Anlagenkomponenten mit welchen Sensoren oder Kameras zu beobachten, prüfen oder messen sind. Das Manövrieren des Fahrzeugs und das Positionieren der Kamera über Schwenk-Neige-Kopf können manuell per Joystick, mit Hilfe optischer Zeigeinstrumente (Laser-Pointer) oder durch Erkennung menschlicher Hautfarbe, Gesichter oder Gestik durch das Fahrzeug erfolgen. Der Bediener benennt die Komponenten, kommentiert über Spracheingabe die Sensorbilder („aktuelles Wärmebild gehört zu *Pumpe X / Kessel Y ...*“) und spezifiziert wichtige Informationen über Zustandsabhängigkeit von Soll- oder Normbereichen (... „im Zustand *EIN* bzw. *AUS* von *X*, zu *Beginn* oder *am Ende* der Aufheizphase von *Y*“). Bei den elektronischen Nasen sind die für den Anlagenabschnitt relevanten Gasgemische zu

trainieren; sie werden als Referenzmuster abgelegt. Weitere für die Fahrzeuge wichtige Fähigkeiten, wie das Andocken an eine Akku-Ladestation zum Aufladen, die Prozedur zur Benutzung von Betriebsmitteln der Anlage, oder die Ausgrenzung „verbotener“ Bereiche wie Treppen werden ebenfalls per Training erworben. Alle Fahrprogramme dieser Phase beginnen und enden bei der Ladestation.

### **2. Automatische Inspektion:**

Das Fahrzeug kann die eingelesenen Inspektionsfahrten dank der im Training aufgebauten Anlagenkarte und seiner externen Lokalisierung nachvollziehen, situationsgerecht Messungen vornehmen und die „Sinneseindrücke“ zu den entsprechenden Bauteilen eintragen. Der Bediener soll Fahrkurse aus zuvor gelernten Bausteinen auch neu zusammensetzen können.

Während seines Einsatzes muss der Inspektionsroboter temporär auftretende Hindernisse erkennen und ihnen lokal ausweichen. Ferner muss er den Ladezustand seiner Akkus ständig überwachen, bei Bedarf die nächste Ladestation aufsuchen (mindestens eine sollte auf jedem Niveau vorhanden sein) und dann seine Mission fortsetzen. Ferner sind der Selbsttest der Komponenten, die Überwachung von Temperatur, Luftfeuchte und anderen Umgebungsbedingungen notwendig.

Eine leistungsfähige automatische Datenkompression und ein gegenüber thermischem Rauschen oder allmählicher Oxydation der Oberflächen toleranter Vergleich mit den eingelernten

Befunden sind bei umfangreichen Infrarotbildserien unerlässlich. Damit Bildausschnitte vergleichbar sind, müssen kleinere Positionsfehler durch automatische Bildregistrierung ausgeglichen werden. Nicht zuordenbare Befunde oder auffällige Abweichungen von gelernten Sollwerten oder Sollverläufen werden geeignet aufbereitet und dem Bediener an einer Basisstation präsentiert.

Ferner kann der Bediener die örtliche Eingrenzung auffälliger Werte, z.B. Gasbefunde, anfordern. Dabei spürt das Fahrzeug in einem lokal begrenzten Suchprozess („Stichfahrt“) das Konzentrationsmaximum auf.

### **3. Autonome Exploration:**

Sobald eine zusammenhängende Karte eines Anlagenbereiches vorliegt, ist der mobile Roboter auf eingelernte Wege nicht mehr angewiesen, sondern kann jede Kombination erreichbarer Bauteile selbst zu einer Inspektionsfahrt verbinden. Darüber hinaus kann er die bekannte Karte auch erweitern: nachdem etwa eine Pumpe durch Vormachen inspiziert wurde, wird er aufgefordert, gleichartige Komponenten innerhalb eines Bereiches selbständig zu finden und sie inspektionstechnisch gleich zu behandeln. Eine noch ehrgeizigere Aufgabe besteht darin, unbekannte Bereiche aufgrund eines digitalisierten Anlagenschemas (Graphen) selbständig zu erkunden, welches nur qualitativ die erwarteten Komponenten, ihren Materialfluss und die inspektionstechnische Bedeutung (was ist womit und wie zu messen?) zeigt. Das detaillierte Geometriemodell erzeugt das Fahrzeug selbst und

benutzt es, um den weiteren Fahrweg zu planen.

In dieser Phase sollen auch die Aufgabenteilung mehrerer Fahrzeuge untereinander und die Kooperation mit dem Prozessleitsystem, der Instandhaltungsplanung oder einem Diagnosesystem realisiert werden. Das Prozessleitsystem profitiert von den neuartigen mobilen Messdaten wie Temperaturverteilungen, Alterungszuständen, Gaskonzentrationen, so wie umgekehrt inline-Messgrößen oder ein verhaltensbasiertes Prozessmodell die Diagnose störungsverdächtiger Inspektionsbefunde unterstützen kann.

### **4. Wartungsunterstützung:**

Spezielle Fähigkeiten zur Handhabung werden zuletzt entwickelt. Für die Vergleichsmessung per Kontaktthermometer, Materialprüfung mit einem Magnetstreulicht-Sensor, oder um an schwer zugänglichen Stellen zu „schnüffeln“, kann ein Leichtbau-Teleskoparm sinnvoll werden. Beschränkte sich die bisherige Funktion auf das Beobachten, so entwickelt sich vielleicht ein Fahrzeug des Teams zum Spezialisten, welches mit Werkzeugen und ggf. einer Wechseleinrichtung ausgerüstet wird, um die Techniker auch beim *Reinigen* der Anlage, dem *Nachstellen* oder *Auswechseln* bestimmter Teile zu unterstützen.

Zur Verbesserung der Inspektion schwer zugänglicher Anlagen können ultraleichte selbsttragende Flugkörper, zum Beispiel Miniatur-Luftschiffe, als Assistenzsysteme einem Bodenfahrzeug zur Seite stehen. Heute schon

sind Infrarotkameras verfügbar, die nur ca. 200g wiegen. Dennoch besteht ein Zielkonflikt: mit Helium als Füllgas ist ein Volumen von ca. 5m<sup>3</sup> erforderlich, um überhaupt Nutzlast zu tragen. Dies würde aber bei der vorherrschenden Zeppelinform die Manövrierfähigkeit und Zugänglichkeit zu stark einschränken.

**Wissenschaftliche Herausforderung**

Um vorhandene Komponententechnologien moderner Service-roboter nutzbar für die Inspektion und Instandhaltung industrieller Anlagen zu machen, sind große, interdisziplinäre Anstrengungen erforderlich. Ein Kernpunkt liegt in

der Fusion der Ergebnisse von Oberflächen-, Wärme- und speziellen Inspektionssensoren, die sich optimal ergänzen können (Abb. 9).

Die Infrarotkamera bildet den idealen Leitsensor zur **Verdachterhebung**, da sie flächendeckend und effizient arbeitet und viele Schwachstellen einer Anlage sichtbar macht, lange bevor es zum Ausfall oder Störfall kommt. So gehen Schwelbrände oft von fehlerhaften Klemmverbindungen der Elektrik, schadhafter Isolierung, überlasteten Transformatoren oder heißlaufenden Lagern aus, und in allen diesen Fällen tritt lokal überdurchschnittliche Wärmeentwicklung

auf. Hier wird IR-Thermographie in der Industrie schon heute intensiv eingesetzt. Auch Lecks verraten sich oft durch lokale Abweichungen der Temperaturverteilung (Verdunstungskälte, heiße Flüssigkeiten), ebenso schadhafte Wärme- oder Kälteisolierungen oder Wärmebrücken an Schweißnähten. Verschmutzungen von Abluftkanälen und Filtern durch Staub, oder das Absintern von Dämmmaterial lassen sich ebenfalls oft erkennen.

Mit einer kalibrierten optischen Anordnung von IR-Kamera und Laserscanner werden Temperaturextrema nicht nur in der Bildebene, sondern auch in der Tiefe lokalisiert (**3D-Ortung**). Die 3D-

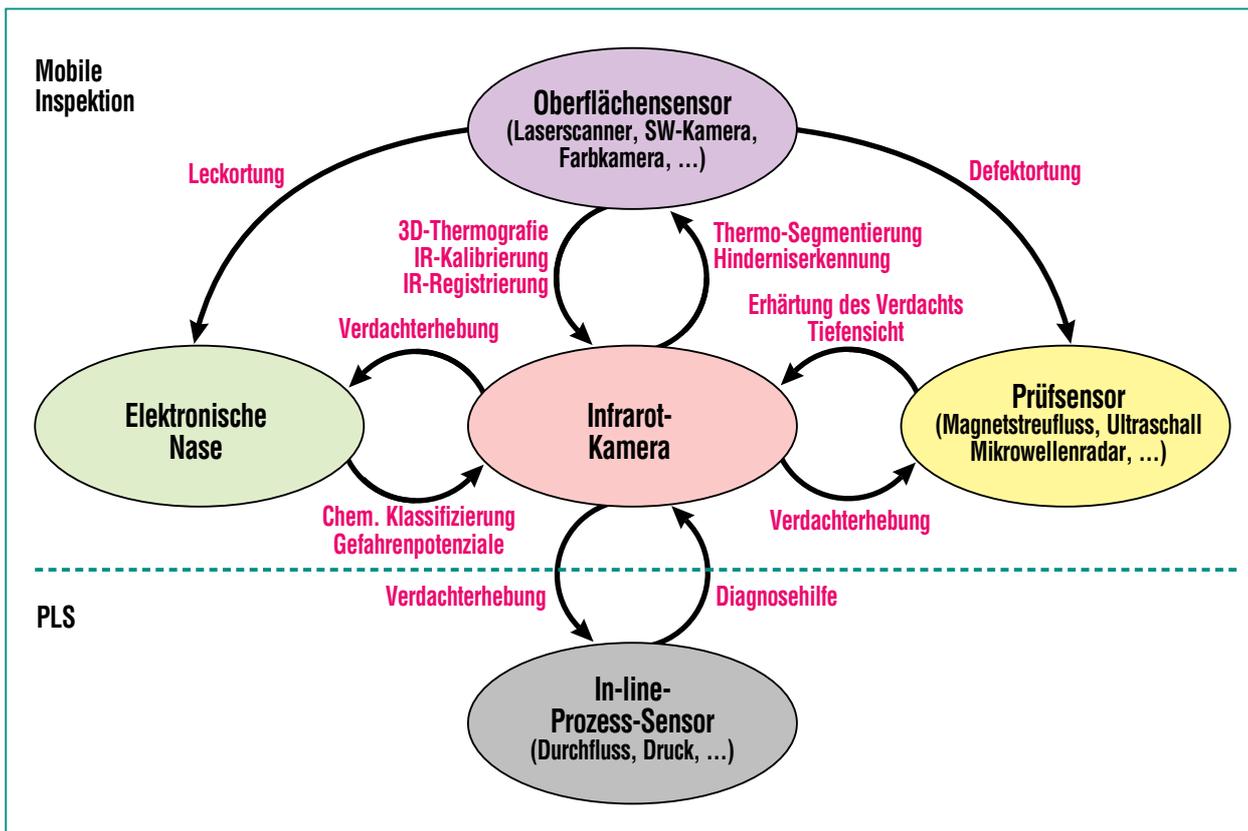


Abb. 9: Kooperation von Oberflächen-, Wärme-, chemischen und Materialprüfsensoren bei der Störungserkennung und Diagnose.

Lokalisierung an natürlichen Landmarken erlaubt identische, vergleichbare IR-Bildausschnitte zu erfassen bzw. sie aufeinander abzubilden (zu registrieren). Wichtiger noch bei der Messung von Wärmestrahlung ist die Bestimmung des Emissionsgrades eines Objektes und der Hintergrundstrahlung. Für dieses schwierige Problem eröffnen sich bei bekannter Szenengeometrie (Oberflächennormalen!) neue Lösungsmöglichkeiten. Umgekehrt profitiert die Tiefenbildverarbeitung von den individuellen Temperaturprofilen, die Stränge verfahrenstechnischer Anlagen auszeichnen. Durch sie wird eine zuverlässigere und effizientere Objektsegmentierung und -erkennung möglich, als es das Tiefenbild allein mit seinem Labyrinth von Rohren und Kesseln erlaubt. Auch für die Erkennung temporä-

rer, dynamischer Hindernisse (z.B. vorbeilaufende Menschen) eignen sich IR-Bilder besser als Tiefen- oder Videobilder. Diese neuartige Fusion von Lasersensor und Infrarotkamera bezeichnen wir als *3D-Thermographie*.

Doch leistet IR-Thermographie allein wegen ihrer mangelnden Selektivität keine sinnvolle Zustandsbeurteilung. Selbst wenn Wärmedurchschläge an einem isolierten Rohr sichtbar werden, zeigen diese noch nicht, ob die Ummantelung oder der metallische Kern schadhaft ist, ob bereits Flüssigkeit oder Gas ausgetreten ist, um welche chemischen Substanzen es sich ggf. handelt und wie das Gefahrenpotential einzuschätzen ist (**Klassifizierung**). Letzteres können z.B. elektronische Nasen beurteilen.

Zur Eingrenzung und Erhärtung dienen auch Prüfsensoren, die einen Blick unter die Oberfläche erlauben (Ultraschall, Mikrowellenradar, Magnetstreulicht), ferner berührungslose Füllstands- und Durchfluss-Messungen oder Druckmesswerte von In-line-Sensoren. Welche dieser Inspektionssensoren zusammen den Kosten-Nutzen-optimalen „Werkzeugkasten“ ergeben, ist dabei noch offen. Die Sensitivität und die Selektivität, Einsatzvoraussetzungen (Materialeigenschaften), Kosten und Platzbedarf der Sensoren, die Fähigkeit Materialien zu durchdringen, Abstand und Anordnung zum Prüfobjekt und daraus erwachsende Zugänglichkeitsprobleme, sind dabei abzuwägen.

## Literatur

- [1] L.G.Shapiro, R.M.Haralick, *IEEE PAMI* 4(11), 1982, 595-602
- [2] F. Peters, M. Kasper, M. Eßling, E. von Puttkamer, *Autonome Mobile Systeme 2000*, 20.-21. Nov. 2000, Karlsruhe, 157-164
- [3] J.-H. Lee, G. Appenzeller, H. Hashimoto, *International Conference on Field and Service Robotics*, 8.-10. Dez. 1997, Canberra
- [4] E.Boyer, M.-O.Berger, *Int. Journal of Computer Vision* 22(3), 1997, 219-233
- [5] M.Soucy, D.Laurendeau, *IEEE PAMI* 17(4), 1995, 344-358
- [6] A.W. Fitzgibbon, D.W. Eggert, R. B. Fisher, *Computer-Aided Design* 29(4), 1997, 321-330
- [7] D. Fischer, *Dissertation, FernUniversität Hagen*, August 1999
- [8] D. Fischer, P. Kohlhepp, *IEEE Conference CVPR'2000*, Hilton Head, USA, 13.-15. Juni 2000, 405-412
- [9] A.D. Bailey, C. Fröhlich, *Numerisation 3D '99*, Paris, France, 19.-20. Mai 1999
- [10] W.E.L. Grimson, T. Lozano-Perez, *IEEE PAMI* 9(4), July 1987
- [11] X. Jiang, H. Bunke, *Dreidimensionales Computersehen*, Springer Verlag 1997
- [12] B.K.P. Horn, *J. Opt. Soc. Am.* 4(4), 1987, 629-642
- [13] P.J.Besl, D.N.McKay, *IEEE PAMI* 14(2), 1992, 239-256
- [14] *University of South Florida*, <http://marathon.csee.usf.edu/range/icons/Odet-cam-mot.html>
- [15] *BASF Deutschland*, <http://www.basf.de/de/corporate/environment/ub00/>, 2000
- [16] H.-B. Kuntze, D. Schmidt, H. Haffner, M. Loh, *NODIG '95*, Dresden, 19.-22. Sept. 1995, 367-374
- [17] J.H.J. Stalenhoef, J.A. de Raad, *Proc. 7th European Conference on Non-Destructive Testing*, Kopenhagen, 26.-29. Mai 1998
- [18] H. Willems, O.A. Barbian, A. Hugger, T. Klaus, M. Wittstock, *DGZfP NDT Conference Dresden*, 1997
- [19] P.Althainz, J. Goschnik, S.Ehrmann, H.J. Ache, *Sensors and Actuators B* (33), 1996, 72-76