Heinrich C. Mayr, Martin Pinzger (Hrsg.): INFORMATIK 2016,
Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn 2016 1699

# Überlegungen zu Multi-Sensor-Aktor-Systemen und Kontrolle in intelligenten Arbeitsumgebungen

Lilian Schröder[1], Aljoscha Pörtner[1], Matthias König[1] und Martin Hoffmann[1]

**Abstract:** Zu einem modernen Arbeitsplatz gehört eine angenehme Arbeitsumgebung. Zahlreiche Forschungsergebnisse aus dem Bereich „Indoor Environment Quality“ liefern Informationen dazu, welche Parameter der Umgebung einen Einfluss auf Produktivität sowie Wohlbefinden der Personen haben. Erweitert werden diese Faktoren durch das Beobachten der Menschen selbst, ihrer Emotionen und ihrer Aktivitäten. Um eine intelligente Arbeitsumgebung zu schaffen, wird ein System gebraucht, das diese Parameter erfasst und darauf intelligent reagiert. Dafür muss zunächst vielfältige Sensorik miteinander verbunden werden. Nur dann kann das Zusammenspiel der Umweltfaktoren und die Interaktion zwischen Mensch und Umwelt berücksichtigt werden. Nicht zuletzt ist die Kontrolle eines Menschen über seine Arbeitsumgebung entscheidend für die Arbeitszufriedenheit. Die Wünsche und Einflussmöglichkeiten des Menschen müssen daher verstärkt berücksichtigt werden. Für die technische Umsetzung eines solchen Systems bietet sich ein Multiagentensystem an, welches die Komplexität auf Agenten verteilt, aber trotzdem eine übergeordnete Instanz bestitzt, welche ein menschliches Eingreifen ohne Umwege ermöglicht. Es werden Vorschläge gemacht, wie eine solche Architektur gestaltet werden könnte.

**Keywords:** Indoor Environment Quality, Multiagentensystem, Intelligente Gebäude, Organic Computing, Autonomic Computing

## 1 Einleitung

Was ist nötig, um eine angenehme, produktive Arbeitsumgebung zu schaffen? Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten haben zu dieser Frage Ergebnisse aus unterschiedlichen Bereichen geliefert (s.u.). Verschiedene Umwelteinflüsse, persönliche Faktoren und das Zusammenspiel aus Aufgabe und Umgebung beeinflussen nachweislich sowohl die Produktivität als auch die Zufriedenheit der Menschen an ihrem Arbeitsplatz. Moderne Technologien ermöglichen es, die Arbeitsumgebung auf vielen Ebenen flexibel an persönliche Bedürfnisse anzupassen. Im ersten Teil dieser Arbeit wird aufgezeigt, wie verschiedene Sensoren und Aktoren dafür genutzt werden können, alle interessanten Parameter zu erfassen, miteinander zu verknüpfen und so die Umgebung für den Menschen zu optimieren. Der zweite Teil dieser Arbeit befasst sich mit der technischen Umsetzung eines solchen Systems. Es wird ein Überblick über Multiagentensysteme als Basis für intelligente vernetzte Systeme gegeben und die Relevanz der Kontrolle über diese Systeme in den Fokus gerückt. Darauf folgend werden eine mögliche Architektur und die daraus resultierenden Forschungsfragen für das Gebäude der Zukunft diskutiert.

[1] Fachhochschule Bielefeld, Campus Minden, Artilleriestr. 9, 32427 Minden, [Vorname].[Nachname]@fh-bielefeld.de

Der erste Schritt in Richtung eines solchen Systems ist es, die relevanten Parameter zu bestimmen. Studien zu „indoor environment quality (IEQ)“ beschäftigen sich damit, welche Einflüsse der Umwelt Produktivität und Wohlbefinden sowie Zufriedenheit beeinflussen. Im Folgenden sollen die wichtigsten Erkenntnisse der bisherigen Forschung dargestellt werden, die die Grundlage für die Entwicklung eines Sensorsystems darstellen. Für viele einzelne Faktoren wurde bereits gezeigt, dass sie sich negativ auswirken und sogar die Gesundheit beeinträchtigen können. Die meisten Untersuchungen beschäftigen sich mit Arbeitsumgebungen und versuchen, diese zu bewerten. Um eine Bewertung zu erreichen, wird einerseits die Zufriedenheit der Mitarbeiter gemessen, andererseits werden die Arbeitsleistung und die Produktivität in Abhängigkeit von der Umgebung gemessen, z.B. über Performanz-Messungen [Ma04][BB98]. Die Zufriedenheit und das Wohlergehen können z.B. über Fragebogen ermittelt werden (Beispiele: Depression Anxiety and Stress Scale, Perceived Stress Questionnaire [MAT13]). Die Konzepte Job-Zufriedenheit und Produktivität müssen dabei für eine genaue Betrachtung durchaus getrennt gesehen werden [Ju01], es wird aber häufig nicht klar dargestellt, wie genau Zufriedenheit und Produkivität zusammenhängen. Insgesamt sind für die Forschung im Bereich intelligente Gebäude sowie IEQ beide Konzepte relevant. Weitere Faktoren, die in der Literatur als Einfluss auf die Produktivität genannt werden, sind Motivation [EJ00], sowie Stimmung, Emotion und Persönlichkeit (s.u. und [OPS09]). Kreativität hingegen kann als Variable gemessen werden, um die Qualität der Arbeit über die Produktivität hinaus bestimmen zu können. Dafür gibt es auch einige Methoden, z.B. einen Remote Associates Test oder eine Aufgabe, bei der Ideen generiert werden sollen [MZC12].

## 1.1 Indoor Environment Quality

Schon seit den achtziger Jahren gibt es Interesse daran, die Auswirkungen der Arbeitsbedingungen im Büro auf den Menschen zu erforschen (z.B. [CN89]). Klassische Themen sind Luftqualität und Temperatur, und seit dem Aufkommen von Großraumbüros besonders auch das Geräuschlevel in der direkten Arbeitsumgebung. Einen Überblick über die Thematik Indoor Environment Quality geben z.B. Kim und de Dear [KdD12]. Häufiger Gegenstand der Untersuchungen ist das Messen eines Zusammenhangs zwischen Umweltfaktoren und der Leistung und/oder dem Wohlbefinden. Für zahlreiche Faktoren der Umgebung gibt es Ergebnisse, die zeigen, wie eine Arbeitsumgebung gestaltet sein sollte:

- Temperatur: Sie ist ideal zwischen 21 und 22° [SFL06]; beeinflusst viele Parameter wie Konzentration und Arbeitsleistung aber auch gesundheitliche Aspekte, und ist abhängig von persönlichen Vorlieben, Kleidung, Außentemperatur und Luftbewegungen; eine Komfortzone kann aus mehreren Variablen für jede Situation berechnet werden [SSJ06];
- Geräusche: zu laute Umgebung lenkt ab, macht müde und reizbar und senkt die Arbeitsleistung; sie beeinflusst die Faktoren Konzentration, Performanz/work rate, Müdigkeit (z.B. [WWC02]) und Reizbarkeit [Ma04]; 70% der Mitarbeiter in einer Studie sagen, ihre Produktivität würde verbessert werden, wenn sie weniger

durch Geräusche gestört würden [Ma04]; durch hohe Lautstärke werden ergonomische Möglichkeiten weniger genutzt [EJ00]; der Einfluss der Lautstärke wird beeinflusst durch: u.a. speech intelligibility (STI, Sprachverständlichkeit) [Ma04] [Ve02] [KYE07] und Bedeutung des Geräuschs [Su94], Vorhersagbarkeit und Kontrolle über die Quelle, Variabilität des Geräuschs [Ma04], Alter und Art der kognitiven Aufgabe [Be05].

- Licht: Die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz beeinflussen Produktivität, Unfallrate, Performanz, Schlaf, Arbeitsmoral, Krankheitsrate, Aufmerksamkeit, Vitalität, Stimmung [PL00] [ET02] [VBVDB04] und Energiekosten. Am besten für den Menschen sind Tageslicht und Fenster, sie sind wichtig für biologische Funktionen (Hormone, Tagesrhythmus, Vitamin D-Produktion) und beeinflussen u.a. Arbeitsmoral, Laune und Ermüdung der Augen. Je ähnlicher das Licht dem Tageslicht ist, umso positiver ist der Einfluss des Lichts (bezogen auf Helligkeit und Spektrum, vgl. [ET02]). Die Auswirkungen des Lichts werden beeinflusst durch persönliche Präferenz [VBVDB04]. Diese Erkenntnisse finden bereits durch die „Human Centric Lighting“-Initiative den Weg in die Praxis und durchgeführte Marktstudien des Verbands untermauern dabei die Relevanz der Thematik [Ge13].
- Luftqualität: Die Luftqualität wird bestimmt durch die Konzentration bestimmter Stoffe in der Luft, besonders durch die „volatile organic compounds“ (VOCs), u.a. $CO_2$ (siehe z.B. [FDA98]). Die Luftqualität hat starke Auswirkungen auf die Produktivität und das Wohlbefinden [Wy04].
- Weitere Faktoren: Auch andere Faktoren haben einen Einfluss auf die Menschen, unter anderem Sauberkeit, verbaute Materialien, „visual comfort“, „sound privacy“, „ease of interaction“, „comfort of furnishing“ und Farben (siehe z.B. [KdD12][SJ09]). Diese sind i. A. nicht manipulierbar und daher hier nicht relevant.
- Gesundheitsbezogene Faktoren: Der Aufenthalt in Gebäuden kann durch vielerlei Faktoren gesundheitsschädigende Wirkung haben, beispielsweise zu Irritationen an Auge, Nase, Haut, sowie Asthma, Atemwegserkrankungen im Allgemeinen, Allergien und die Verbreitung ansteckender Krankheiten führen ([Fi00][Ja98][Ch03], vgl. Forschung „Sick Building Sydnrome (SBS)“). Diese beeinträchtigen auch die Zufriedenheit. Die meisten Faktoren, die die Gesundheit betreffen, sind nicht durch Aktoren beeinflussbar, trotzdem sollten Sensoren vorhanden sein, die Handlungsbedarf erkennen, z.B. für die Erkennung von Pilzsporen.
  Ein weiterer Aspekt, der hier berücksichtigt werden sollte, ist, dass auch die Arbeit an sich krank machen kann, z.B. durch zu starken dauerhaften Stress (z.B. [Wi13]).

Zusätzlich zu den direkten Auswirkungen einzelner Variablen wurden auch Zusammenhänge und Interaktionseffekte untersucht. Beispielsweise moderiert die Lautstärke den Einfluss, den die Temperatur auf die Fehlerrate bei einem Leistungstest hat [WWC02]. Es gibt weiterhin einen Zusammenhang zwischen Temperatur, Gerüchen und Luftqualität: je wärmer es ist, umso stärker werden Gerüche wahrgenommen, und je wärmer, umso schlechter ist die wahrgenommene Luftqualität [WWC02][Wy04]. Auch wurde festge-

stellt, dass die Art der Aufgabe die Bedürfnisse verändert, z.B. in Bezug auf Lautstärke oder Musik [Ma04].

## 2 Erweiterung der Analyse

Die bisher geschilderten Untersuchungen konzentrieren sich auf die Umgebungsanalyse, unabhängig von den Personen, die sich in der Umgebung aufhalten und ihren Aufgaben, Aktivitäten, Stimmungen und persönlichen Präferenzen. Ein modernes System für die Gestaltung einer Arbeitsumgebung sollte diese Aspekte allerdings berücksichtigen. Es könnte beispielsweise für die Temperaturregelung relevant sein, wie viel die Person sich bewegt, oder für die Gestaltung des Umfelds insgesamt, welche Art von Aufgabe sie gerade erledigt. Die Stimmung und Emotionen einer Person sind ebenfalls relevante Parameter. Untersuchungen haben ergeben, dass Stimmung die kognitiven Prozesse („cognitive style“) und auch messbar die Arbeitsleistung beeinflusst. Leicht positive Stimmung sorgt für effektiveres und flexibleres Denken [SJ09]. Lisetti und Nasoz [LN04] schreiben, dass gesteigerte Emotionsintensität auch die Performanz steigere, aber nur bis zu einem bestimmten Punkt. Emotionen sind insgesamt stark involviert in Aufmerksamkeit, Wahrnehmung, Lernen, Gedächtnisprozesse, Problemlösen, Entscheidungen treffen, kreatives Denken und menschliche Interaktion (vgl. [AS05]). Eine Umgebung, die sich günstig auf die Stimmung auswirkt, ist also sowohl für Zufriedenheit als auch für die Produktivität relevant. Ein besonders wichtiger Aspekt des inneren Zustands einer Person am Arbeitsplatz ist das Stresslevel, das sie empfindet. Stress ist das zweithäufigste arbeitsbezogene Gesundheitsproblem in der EU [MAT13] und kann ernste Gesundheitsprobleme verursachen [EJ00][Wi13]. Durch die enge Verbindung physiologischer Reaktionen mit dem erlebten Stress ist es möglich, über Sensoren das Stresslevel mit sehr hoher Genauigkeit festzustellen [Sa11]. Um diese „Biosignale“ zu analysieren, werden spezielle Sensoren und Analysemethoden gebraucht. Der Trend der letzten Jahre hin zu immer kleineren, immer weiter verbreiteten „wearables“ ermöglicht eine immer komfortablere und unauffälligere Ermittlung physiologischer Parameter.

### 2.1 Kontrolle

Zusätzlich zu den genannten Parametern darf ein weiterer Aspekt nicht vernachlässigt werden. Mitarbeiter haben das Bedürfnis, Kontrolle über ihre Arbeitssituation zu haben. Dazu gehört auch die Kontrolle über das direkte physikalische Umwelt. Die Zunahme automatisierter Funktionen intelligenter Gebäude birgt die Gefahr, dass die Kontrolle des Einzelnen abnimmt und sich die Mitarbeiter möglicherweise bevormundet fühlen. Nach weit verbreiteter Ansicht beeinflusst der Umfang der Kontrolle, die eine Person über den Job hat, die Arbeitsleistung, den empfundenen Stress und die Gesundheit [HRC04]. Es wurde sogar ein signifikanter Zusammenhang zwischen einem niedrigen Level an Kontrolle und der Wahrscheinlichkeit, an kardiovaskulären Erkrankungen zu sterben, gefunden [Jo96]. Ein Aspekt der „job control“ ist die Kontrolle über die physikalische Umgebung und darin enthaltene externe Stressoren wie Geräusche. Dies wird bei Huang et al. [HRC04] als

„environmental control“ bezeichnet. Sie schreiben, Kontrolle über die Arbeitsumgebung könne positive Effekte auf die Gesundheit und Effektivität der Arbeiter haben. Umgebungskontrolle trage laut Untersuchungen direkt zu Arbeitsplatzzufriedenheit und Leistung bei. Indirekt beeinflusse sie diese Parameter, indem sie die Wahrnehmung verändere, z.B. von Ablenkungen, Privatsphäre, Stress und Kommunikation. Bei dem Entwurf eines umfassenden Systems mit vielen automatischen Funktionen sollte also der Aspekt der persönlichen Kontrolle berücksichtigt werden. Nicht nur bei Fehlfunktionen des Systems ist dies wichtig. Reijula et al. [Re11] betonen, dass wenn die Umgebung zu viel autonome Aktivität zeige, dies den Stress der Person vergrößern könne statt zu verringern. Es müsse daher eine übergeordnete Funktion („override“) geben, sodass der Benutzer die intelligente Umgebung abschalten könne, falls er von der Interaktion mit der Umgebung in irgendeiner Form irritiert sei. Laut Leaman und Bordass [LB99] wird die wahrgenomme Kontrolle über das eigene Umfeld beeinflusst durch: tatsächliche Kontrollmöglichkeiten, mögliches Feintuning durch den Benutzer sowie die Reaktionszeit des Systems.

## 3 Vernetzung und Aktorik

Basis für die Nutzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Steigerung des Wohlbefindes und der Produktivität innerhalb intelligenter Umgebungen ist ein System aus zahlreichen Sensoren und Aktoren. Reijula et al. [Re11] geben eine Definition für den Begriff „intelligent environment“ und nennen wichtige Kriterien, die eine intelligente Arbeitsumgebung erfüllen sollte: die Interaktion zwischen Umgebung und Benutzern solle erfasst, verarbeitet und im Kontext interpretiert werden; im Sinne der Benutzerbedürfnisse solle darauf reagiert werden; sie solle aktiv, autonom und allgegenwärtig sein und den Arbeitsfluss des Benutzers unterstützen, sowie die Wahrnehmung des Benutzers seines körperlichen und psychologischen Wohlbefindens verbessern [Re11, S. 234]. Auch bezieht sich die Definition nicht nur auf die physikalischen Aspekte, sondern betont, dass eine Wahrnehmung und Reaktion auf psychologische Aspekte wichtig ist. Ein weiteres gutes Beispiel für die Notwendigkeit eines komplexeren Bilds der Situation beschreiben Ramos et al. [RHD14]. Stresserkennung basiert darauf, dass das Stresslevel physiologische Vorgänge beeinflusst, wie z.B. eine Steigerung des Pulses. Es muss aber unbedingt bedacht werden, dass auch andere Dinge die gleichen Parameter beeinflussen, besonders die körperliche Aktivität. Wenn eine Person schnell geht, verändert sich der Puls, aber deswegen liegt noch kein Stress vor. Ramos et al. versuchen daher, Aktivitätserkennung mit Stressmonitoring zu verbinden und die Einflüsse so zu kontrollieren. Ein Ziel der weiteren Forschung sollte also sein, die Fülle an Informationen sinnvoll zu vernetzen.

Mithilfe der IEQ-Forschungsergebnisse kann ein konkreter Sollzustand für jede Variable formuliert werden und es gibt Manipulationsmöglichkeiten, um diesen Zustand zu erreichen: z.B. können die Lichtverhältnisse über spezielle Lampen gesteuert werden oder die Geräuschkulisse durch Maskierungsgeräusche oder im Vorfeld durch die Architektur des Arbeitsplatzes verbessert werden. Auch der innere Zustand des Menschen ist durch Sensorik erfassbar, hier gibt es aber kaum konkrete Handlungsanweisungen, wie auf diese Informationen reagiert werden soll. Ein Ansatz ist, die Musik in einer Stresssituation leiser zu machen oder unwichtige Nachrichten abzuschalten [Ha04, HP05]. Hier entstehen also neue Forschungsfragen, deren Betrachtung durch umfangreiche Sensorsysteme

möglich wird. Für die zahlreichen Parameter, die den inneren Zustand oder die Aktivität des Menschen betreffen, müssen erst Möglichkeiten der Einflussnahme erforscht und definiert werden. Sie hängen natürlich stark von der individuellen Zielsetzung ab.
Im Rahmen des Affective Computing wird vorgeschlagen, die Emotionen aktiv durch Maßnahmen zu beeinflussen, um positive Emotionen zu fördern. Ein System, das die Emotionen erkennen kann, könnte den Einfluss von Emotionen nutzen, indem es Stimuli präsentiert, die erwünschte Stimmungen aufrechterhalten oder alternativ unerwünschten entgegenwirken. Frustrierte Benutzern könnten beispielsweise zu einer anderen Aufgabe oder einem anderen Aspekt der Arbeit geleitet werden, oder es könnte ihnen zu einer Pause geraten werden [Zi03, S. 2].

## 4 Kenetic Software Design in intelligenten Umgebungen

Innerhalb der beschriebenden intelligenten Umgebungen stellt die technische Kontrolle dieser komplexen Sensor-Aktor-Netze eine nicht minder schwere Aufgabe dar. Diese müssen sich auf der einen Seite an die Bedingungen der Umgebung anpassen (vgl. Absatz 1.1) und auf der anderen Seite die implizit oder explizit geäußerten Präferenzen des Nutzers beachten (vgl. Absatz 2.1) und so gut wie möglich erfüllen. Hierbei bietet sich die Modellierung als Multiagentensystem (MAS) und die Umsetzung mittels des durch Ferber in [Fe99] beschriebenen Kenetic Software Design an. Ferber bezieht hierbei auf Systeme, welche durch Interaktion, Adaption und Reproduktion evolvieren [Fe99]. Die Umgebung kann dabei beschrieben werden als eine endliche Menge $E$ aus diskreten, momentanen Zuständen:

$$E = \{e, e', ...\}.$$

Die einzelnen Komponenten besitzen die Möglichkeit, die Umgebung auf Basis der ermittelten Daten und übereinstimmend mit vorgebenen Zielen zu transformieren. Hierzu besitzt jeder Aktor eine endliche Menge an Aktionen. Sei

$$Ac = \{\alpha, \alpha', ...\}.$$

die endliche Menge an Aktionen, welche durch den einzelnen Aktor durchgeführt werden können. Dann ist die typische Sequenz einer Interaktion mit der Umgebung innerhalb eines Sensor-Aktor-Netzes eine alternierende Folge von verzahnten Umgebungszuständen und darauf basierenden Aktionen:

$$s : e_0 \xrightarrow{\alpha_0} e_1 \xrightarrow{\alpha_1} e_2 \xrightarrow{\alpha_2} e_3 \xrightarrow{\alpha_3} ... \xrightarrow{a_{u-1}} e_u.$$

wobei $R$ die Menge aller möglichen endlichen Sequenzen über $E$ und $Ac$ ist, $R^{Ac}$ die Teilmenge der Sequenzen, welche mit einer Aktion $\alpha \in Ac$ enden und $R^E$ die Teilmenge der Sequenzen, welche in einem Zustand $e \in E$ enden. Der Effekt, welcher sich auf die Umgebung durch die Ausführung von Aktionen ergibt, wird dargestellt durch eine *state transformer function* [Fa95]:

$$\tau : R^{Ac} \rightarrow \rho(E),$$

wobei $\rho(\cdot)$ ebendiese Funktion darstellt. Formal lässt sich eine Umgebung $Env$ nun als ein Tripel $Env = \langle E, e_0, \tau \rangle$ beschreiben, wobei $E$ die Menge der Umgebungsstatus ist, $e_0 \in E$ der Initialzustand ist und $\tau$ die *state transformer function* ist. Somit lässt sich eine Kombination aus Sensoren und Aktoren als *Agent* innerhalb des Systems auffassen. Dieser

Agent lässt sich als Funktion, welche Sequenzen ausführt, modellieren [Wo09][RS95]:

$$Ag : R^E \rightarrow Ac.$$

Der Agent wählt also eine entsprechende Aktorkonfiguration auf Basis der Umgebungszustandshistorie. Hierbei gilt die Annahme, dass, obwohl Umgebungen nicht-deterministisch sind, die entsprechenden Agenten deterministische Entscheidungen treffen [Wo09]. Betrachtet man die heutigen vernetzten Umgebungen als eine Menge von Sensoren und Aktoren, wobei vertikale Kombinationen wiederum einen Agenten bilden [Fo83] (siehe Abbildung 1), ist *AG* die Menge aller Agenten innerhalb einer intelligenten Umgebung. Die derzeitig existieren Umgebungen bestehen auf Basis dieser Annahme häufig nur aus *reaktiven*, manchmal auch als *tropistisch* (von griechisch trepô, "wende") [GN87] bezeichneten, Agenten, welche Perzeptionen auf direktem Wege in Aktionen umwandeln:

$$Ag : E \rightarrow Ac.$$

Als Beispiel hierfür lässt sich die Lichtsteuerung eine Raumes anführen. Hier werden typischerweise zwei Sensoren verwendet - Lichtsensor und Lichtschalter. Ein reaktiver Agent besteht dabei aus diesen beiden Sensoren und einem Aktor - der Lichtsteuereinheit -, welche folgendermaßen definiert werden kann:

$$Ag(e) = \begin{cases} \text{Licht an} & \text{falls (Helligkeit } = \neg OK) \vee (\text{Lichtschalter} = \text{ON}) \\ \text{Licht aus} & \text{sonst.} \end{cases}.$$

Modelliert werden kann dieser Agent mittels einer Funktion $percept : E \rightarrow Per$, welche eine Zuweisung von einer Menge an Umgebungsstatus $E$ zu einer nicht-leeren Menge an Perzeptionen *Per*, typischerweise mittels der Sensoren, vornimmt und einer Funktion $action : Per* \rightarrow Ac$, welche einer Sequenz an Perzeptionen eine Menge an Aktionen zuordnet. Der Nutzer interagiert in diesem Fall nur indirekt mit dem System und gibt keine oder nur wenig direkte Anweisungen. Ferber [Fe99] nutzt hierfür den Vergleich des Schäfers und seiner Schafherde, welcher Aktionen der Individuen (Agenten) nur durch sein, mittels der Sensoren der Schafe aufgenommenes, Verhalten auslöst. Er nennt dieses Beispiel unter Bezug auf *Kenetic Software Design* und konkretisiert damit das Konzept der Nutzung von Agenten und deren Interaktion zur Lösung von Problemen in komplexen Systemen. Der Einsatz von MAS in drahtlosen bzw. drahtgebundenen Sensor-Aktor-Netzen ist durchaus kein neuer Lösungsansatz. So nutzen Sandhu et al. [SAA04] verteiltes Lernen in MAS zur intelligenten und adaptiven Steuerung der Beleuchtung in Gebäuden. Boman et al. [BDY99] realisieren ein MAS mit komplexen Agenten zur Wärmeregulierung in Gebäuden auf Basis von Entscheidungsbäumen und *Influence Diagrams* (IDs), wobei das System an sich nicht evolviert, sondern auf Basis von definierten Plänen mit *a-priori*-Informationen agiert. Hagras et al. [Ha03] studieren das Lernen und Adaptieren in Agenten-orientierten autonomen Architekturen am Beispiel eines integrierten Gebäudesystems, wobei sie Autonomie als die Fähigkeit beschreiben sich zu adaptieren und eigene Regeln zu erzeugen [Ha03]. Wang et al. [WYW10] adressieren in ihrem Paper ausdrücklich das Konfliktpotenzial zwischen Energieeffizienz des Gebäudes und dem gewünschten Komfortlevel des Nutzers. Sie nutzen für die Lösung des Problems ein System aus miteinander verhandelnden zentralen und lokalen Agenten. Die zentralen Agenten fokussieren dabei die Energieaufnahme und die lokalen Agenten die jeweiligen

Bedürfnisse des Nutzers. Um die zugrundeliegenden nicht-linearen Systeme bestmöglich an die Nutzerwünsche zu adaptieren, ist der Controller mit einer auf Fuzzylogik basierenden Kontrolleinheit ausgestattet. In [WYW11] wird dieses System zur Nutzung in Smart-Grids (SGs) erweitert. Zur Optimierung des Systems wird eine Abwandlung des Partikelschwarmoptimierungsalgorithmus (PSO) von Kennedy und Eberhart [KE95] angewandt, welches sich in der Arbeit durch seine hohe Konvergenzgeschwindigkeit bezüglich globaler Extrema, bei gleichzeitiger Vermeidung lokaler Extrema, auszeichnet.

### 4.1 Kontrolle in nutzerzentrierten intelligenten Umgebungen

Problematisch an dieser Form der Selbst-Organisation bzw. Selbst-Optimierung ist die fehlende Möglichkeit des Nutzers auf die Entscheidungen und Regeln des Systems expliziten Einfluss zu nehmen. Daher wird im Bereich des Organic Computing (OC) der Begriff der kontrollierten Selbst-Organisation eingeführt [Sc10]. Hierbei handelt es sich um die Möglichkeit, ungewolltes emergentes Verhalten innerhalb des organischen Systems zu beheben und somit letztendlich dem Nutzer die volle Kontrolle über das System zu gewährleisten [Sc10]. Eine typischerweise hierfür verwendete Architektur ist die *Observer/Controller-Architektur* [SMS05][MS04][Ri06]. Hierbei wird das häufig als zentralistisch angenommene System von Sensoren und Aktoren dezentralisiert und somit in diverse Subsysteme aufgeteilt. Diese Subsysteme oder auch *Systems under Observation/Control* (SuOC) werden innerhalb der Architektur einer darüberliegenden Monitoring und Kontrollschicht untergeordnet. Der Observer überwacht und aggregiert die Informationen (*Situations Parameter*) und trifft Vorhersagen über das zukünftige Verhalten des Systems auf Basis eines definierten Observationsmodells. Sollten die Ergebnisse nicht mit dem gewünschten Verhalten des Systems übereinstimmen, greift der Controller in das Verhalten der einzelnen SuOCs ein und versucht dieses zu optimieren [Ri06]. Diese Form der Kontrolle in technischen Systemen wurde bereits erfolgreich erprobt, bspw. in der Verkehrsflusskontrolle [Pr11] oder der Robotik [Mö06].

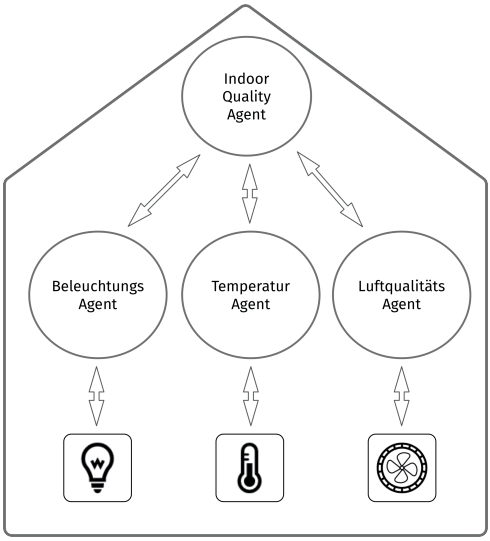

Abb. 1: MAS in intelligenten Gebäuden

## 5 Status Quo und Vision eines intelligenten Gebäudes

Beide beschriebenen Beispiele sowie das Beispiel der intelligenten Umgebung haben zwei Aspekte gemein: (1) Dezentralisierung eines zentralistischen Systems und (2) Hetero-

genität bezüglich der technischen Komponenten. Und obwohl moderne *Building Automation Systems* (BAS) bereits durch eine verteilte Architektur gekennzeichnet sind, bilden sie in der Praxis häufig ein unflexibles monolithisches System. Komponenten werden installiert und aufwendig konfiguriert [Di10]. Ein geeignetes Applikationsmodell für erweiterte Logik bzw. Intelligenz des Gebäudes fehlt [PGK09]. Praus et al. [PGK09] schlagen für die Lösung des Problems einen erweiterten Applikationslayer vor, welcher Entwicklern die Möglichkeit gibt, vordefiniertes Verhalten einfacher in das System einzubringen. Diese Form der Kontrolle hat zwei Nachteile: Zum einen wird die Komplexität des Systems nicht abstrahiert, sondern transformiert, d.h. der Entwickler muss sich auf einer höheren Ebene mit dieser Problematik beschäftigen, und zum anderen evolviert dieses System nicht auf Basis der Wünsche und Präferenzen des Nutzers, sondern maximal auf Basis der Regeln des Entwicklers. Wir schlagen daher eine Architektur auf Basis der in Kapitel 4 diskutierten MAS-Perspektive vor (siehe Abbildung 1). Subsysteme bestehend aus Sensor-Aktor-Konfigurationen werden als modulare regelbasierte Agenten realisiert. Ziele und Regeln werden auf höchster Ebene symbolisch definiert. Hierzu werden die Erkenntnisse aus Kapitel 4.1 miteingebezogen (siehe Abbildung 2). Innerhalb der verschachtelten SuOCs kann sowohl mit symbolischen als auch mit subsymbolischem Wissen gearbeitet werden, um beispielsweise die Helligkeit innerhalb eines Raumes zu adaptieren. Hieraus ergibt sich, dass der spätere Nutzer des Systems und seine Umgebung die Aktionen des Systems explizit und implizit beeinflussen kann und somit die geforderte Kontrolle behält. Die vorgeschlagene Architektur wirft dabei einige zukünftige Forschungsfragen auf, welche teilweise mit den in der Forschung zu intelligenten technischen Systemen im Generellen und organischen technischen Systemen im Speziellen genannten Forschungsfragen übereinstimmen. Neben den Fragen auf Ebene der Spezifikation müssen unter anderem die Fragen nach der Kooperation zwischen den Agenten und der Interaktion zwischen dem MAS und dem Nutzer adressiert werden. Weiterhin müssen Möglichkeiten der Selbst-Konfiguration und Optimierung untersucht werden, sowie Maßnahmen und Techniken zur Stabilisierung des Systems. Es muss also die Frage verfolgt werden, inwieweit das integrierte Gebäudesystem ausgefallene Komponenten kompensieren kann. Im Hinblick auf Datenschutz und Sicherheit des Systems sollten auch Maßnahmen zur autonomen Abwehr von Angriffen und Fehlern erforscht und entwickelt werden.

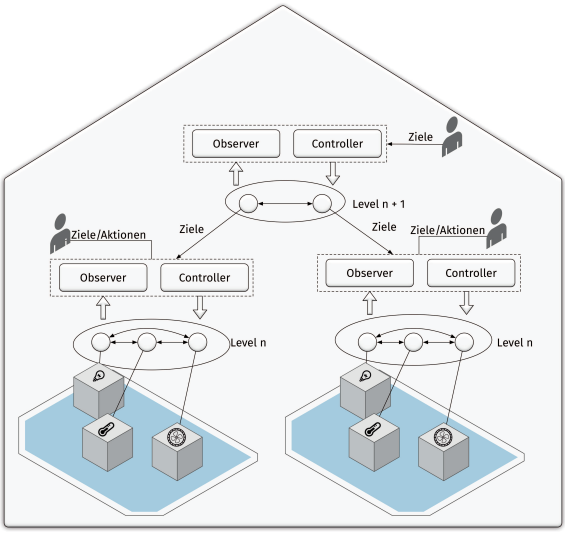


Abb. 2: Vision des Gebäudes der Zukunft

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Vernetzte Umgebungen werden immer mehr Einzug in unseren Alltag erhalten. Die Gebäude, in denen wir leben und arbeiten, sollten in Zukunft nicht nur energetisch bestmöglich agieren, sondern auch im Hinblick auf die Bedürfnisse der darin lebenden Menschen optimiert werden. Die vorliegende Arbeit gibt für die dafür nötige Sensorik eine zusammenfassende Darstellung der wissenschaftlich relevanten Parameter sowie Faktoren und diskutiert die Auswirkung auf die Arbeitsleistung und das Wohlbefinden der darin lebenden und arbeitenden Personen. Des Weiteren wird die Relevanz der Kontrolle über diese Systeme und die Autonomie der Menschen innerhalb dieser Umgebungen in den Fokus gerückt und erörtert. Hierbei wird festgehalten, dass obwohl die Steuerung und Verwaltung vernetzter Umgebungen und Gebäude bereits einen gewissen Grad der Reife erreicht haben, die Konzepte zur Kontrolle intelligenter Umgebungen noch unausgeprägt sind. Methoden und Techniken aus dem Bereich des *Autonomic* bzw. *Organic Computing* bieten dabei Möglichkeiten und Vorschläge, um Intelligenz und die damit zusammenhängende Selbst-Organisation dieser Systeme beherrschbar und durch den Anwender kontrollierbar zu gestalten. Als Basis hierfür wird die Nutzung von *Multiagentensystemen* als konzeptioneller Rahmen vorgeschlagen und an Beispielen erläutert. Für den Ausblick lässt sich festhalten, dass neben den bereits andiskutierten konkreten technologischen Fragestellungen zur Nutzung von Methoden der künstlichen Intelligenz in technisch-physikalischen Systemen, auch die Erforschung und Beobachtung der Nutzerakzeptanz eine gravierende Rolle für die Etablierung solcher Systeme im Alltag spielen wird. Hierfür müssen die adressierten Personen ein subjektives Relevanzempfinden entwickeln und die Systeme sowie die damit zusammenhängende Sensorik und Aktorik als sinnvoll und unterstützend wahrnehmen. Unabdingbar hierfür ist die interdiszplinäre Zusammenarbeit zwischen den Fachgebieten der Architektur, des Bauigenieurwesens, der Psychologie sowie der Informatik und Elektrotechnik, um diese Fragen auf Basis eines wissenschaftlichen Syntheseprozesses zu beantworten. Teile dieser Fragen werden im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte und auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse adressiert. Eine Umsetzung und Evaluation der vorgeschlagenen Architektur ist geplant.

## Literaturverzeichnis

[AS05] Anttonen, Jenni; Surakka, Veikko: Emotions and heart rate while sitting on a chair. In: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. ACM, S. 491–499, 2005.

[BB98] Banbury, Simon; Berry, Dianne C.: Disruption of office-related tasks by speech and office noise. British Journal of Psychology, 89(3):499–517, 1998.

[BDY99] Boman, Magnus; Davidsson, Paul; Younes, Håkan L.: Artificial Decision Making Under Uncertainty in Intelligent Buildings. In: Proceedings of the 15th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. UAI'99, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, S. 65–70, 1999.

[Be05] Beaman, C. Philip: Auditory distraction from low-intensity noise: a review of the consequences for learning and workplace environments. Applied Cognitive Psychology, 19(8):1041–1064, 2005.

[Ch03] Chao, H Jasmine; Schwartz, Joel; Milton, Donald K; Burge, Harriet A: The work environment and workers' health in four large office buildings. Environmental Health Perspectives, 111(9):1242, 2003.

[CN89] Crouch, Andrew; Nimran, Umar: Perceived facilitators and inhibitors of work performance in an office environment. Environment and Behavior, 21(2):206–226, 1989.

[Di10] Dietrich, D.; Bruckner, D.; Zucker, G.; Palensky, P.: Communication and Computation in Buildings: A Short Introduction and Overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(11):3577–3584, Nov 2010.

[EJ00] Evans, Gary W.; Johnson, Dana: Stress and open-office noise. Journal of Applied Psychology, 85(5):779–783, 2000.

[ET02] Edwards, L; Torcellini, Paul A: A literature review of the effects of natural light on building occupants. National Renewable Energy Laboratory Golden, CO, 2002.

[Fa95] Fagin, R.; Vardi, M.; Moses, Y.; Halpern, J. Y.: Reasoning About Knowledge. The MIT Press, Cambridge, MA, 1995.

[FDA98] Fisk, William J; De Almeida, Anibal T: Sensor-based demand-controlled ventilation: a review. Energy and buildings, 29(1):35–45, 1998.

[Fe99] Ferber, Jacques: Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1999.

[Fi00] Fisk, William J: Review of health and productivity gains from better IEQ. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

[Fo83] Fodor, J.A.: The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology. The MIT Press, Cambridge, MA, 1983.

[Ge13] German Electrical and Electronic Manufacturers Association (ZVEI): , Human Centric Lighting: Going Beyond Energy Efficiency. `http://www.lightingeurope.org/uploads/files/Market_Study-Human_Centric_Lighting._Final_July_2013.pdf`, Juli 2013. [Online; Zugriff 01.05.2016].

[GN87] Genesereth, Michael R.; Nilsson, Nils J.: Logical Foundations of Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1987.

[Ha03] Hagras, Hani; Callaghan, Victor; Colley, Martin; Clarke, Graham: A Hierarchical Fuzzy-genetic Multi-agent Architecture for Intelligent Buildings Online Learning, Adaptation and Control. Information Sciences - Informatics and Computer Science: An International Journal - Special issue on recent advances in soft computing, 150(1-2):33–57, Marz 2003.

[Ha04] Haag, Andreas; Goronzy, Silke; Schaich, Peter; Williams, Jason: Emotion recognition using bio-sensors: First steps towards an automatic system. In: ADS. Springer, S. 36–48, 2004.

[HP05] Healey, Jennifer A; Picard, Rosalind W: Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 6(2):156–166, 2005.

[HRC04] Huang, Yueng-Hsiang; Robertson, Michelle M; Chang, Kuo-I: The role of environmental control on environmental satisfaction, communication, and psychological stress effects of office ergonomics training. Environment and Behavior, 36(5):617–637, 2004.

[Ja98] Jaakkola, Jouni J. K.: The Office Environment Model: A Conceptual Analysis of the Sick Building Syndrome. Indoor Air, 8(S4):7–16, 1998.

[Jo96] Johnson, Jeffrey V; Stewart, Walter; Hall, Ellen M; Fredlund, Peeter; Theorell, Tores: Long-term psychosocial work environment and cardiovascular mortality among Swedish men. American Journal of Public Health, 86(3):324–331, 1996.

[Ju01] Judge, Timothy A; Thoresen, Carl J; Bono, Joyce E; Patton, Gregory K: The job satisfaction–job performance relationship: A qualitative and quantitative review. Psychological bulletin, 127(3):376, 2001.

[KdD12] Kim, Jungsoo; de Dear, Richard: Nonlinear relationships between individual IEQ factors and overall workspace satisfaction. Building and Environment, 49(3):3e40, 2012.

[KE95] Kennedy, J.; Eberhart, R.: Particle swarm optimization. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Jgg. 4, S. 1942–1948, Nov 1995.

[KYE07] Kitapci, Kivanc; Yilmazer, Semiha; Erkip, Feyzan: Effect of speech intelligibility on visual short-term memory performance. In: INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Jgg. 2007. Institute of Noise Control Engineering, S. 4370–4380, 2007.

[LB99] Leaman, Adrian; Bordass, Bill: Productivity in buildings: the „killer“ variables. Building Research & Information, 27(1):4–19, 1999.

[LN04] Lisetti, Christine Lætitia; Nasoz, Fatma: Using noninvasive wearable computers to recognize human emotions from physiological signals. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2004(11):1–16, 2004.

[Ma04] Mardex, Justin: Auditory, visual, and physical distractions in the workplace. Cornell University, Department of Design and Environmental Analysis,[online] http://www. justinmardex. com/media/jrmavpdpdf. pdf, 2004.

[MAT13] Muaremi, Amir; Arnrich, Bert; Tröster, Gerhard: Towards measuring stress with smartphones and wearable devices during workday and sleep. BioNanoScience, 3(2):172–183, 2013.

[Mö06] Mösch, Florian; Litza, Marek; El Sayed Auf, Adam; Maehle, Erik; Großpietsch, Karl E.; Brockmann, Werner: Self-Organizing Systems: First International Workshop, IWSOS 2006, and Third International Workshop on New Trends in Network Architectures and Services, EuroNGI 2006, Passau, Germany, September 18-20, 2006 Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Kapitel ORCA – Towards an Organic Robotic Control Architecture, S. 251–253, 2006.

[MS04] Müller-Schloer, C.: Organic computing - on the feasibility of controlled emergence. In: Proceedings of the International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis. S. 2–5, Sept 2004.

[MZC12] Mehta, Ravi; Zhu, Rui Juliet; Cheema, Amar: Is noise always bad? Exploring the effects of ambient noise on creative cognition. Journal of Consumer Research, 39(4):784–799, 2012.

[OPS09] Oswald, Andrew J; Proto, Eugenio; Sgroi, Daniel: Happiness and productivity. Bericht, IZA discussion papers, 2009.

[PGK09] Praus, F.; Granzer, W.; Kastner, W.: Enhanced control application development in Building Automation. In: Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics. S. 390–395, June 2009.

[PL00] Partonen, Timo; Lönnqvist, Jouko: Bright light improves vitality and alleviates distress in healthy people. Journal of Affective disorders, 57(1):55–61, 2000.

[Pr11] Prothmann, Holger; Tomforde, Sven; Branke, Jürgen; Hähner, Jörg; Müller-Schloer, Christian; Schmeck, Hartmut: Organic Computing — A Paradigm Shift for Complex Systems. Springer Basel, Basel, Kapitel Organic Traffic Control, S. 431–446, 2011.

[Re11] Reijula, Jori; Gröhn, Matti; Müller, Kiti; Reijula, Kari: Human well-being and flowing work in an intelligent work environment. Intelligent Buildings International, 3(4):223–237, 2011.

[RHD14] Ramos, Julian; Hong, Jin-Hyuk; Dey, Anind K: Stress Recognition-A Step Outside the Lab. In: PhyCS. S. 107–118, 2014.

[Ri06] Richter, Urban; Mnif, Moez; Branke, Jürgen; Müller-Schloer, Christian; Schmeck, Hartmut: Towards a generic observer/controller architecture for Organic Computing. In (Hochberger, C.; Liskowsky, R., Hrsg.): Proceedings of Informatik für Menschen! (INFORMATIK 06). Jgg. P-93, S. 112–119, 2006.

[RS95] Russell, Stuart J.; Subramanian, Devika: Provably Bounded-optimal Agents. Journal of Artificial Intelligence Research, 2(1):575–609, Januar 1995.

[Sa11] de Santos Sierra, Alberto; Ávila, Carmen Sánchez; Casanova, Javier Guerra; Pozo, Gonzalo Bailador Del: A stress-detection system based on physiological signals and fuzzy logic. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 58(10):4857–4865, 2011.

[SAA04] Sandhu, Jaspal S.; Agogino, Alice M.; Agogino, Adrian K.: Wireless Sensor Networks for Commercial Lighting Control: Decision Making with Multi-agent Systems. In: Proceedings of the Associaton for the Advancements of Artificial Intelligence (AAAI) Workshop on Sensor Networks. S. 131–140, 2004.

[Sc10] Schmeck, Hartmut; Müller-Schloer, Christian; Çakar, Emre; Mnif, Moez; Richter, Urban: Adaptivity and Self-organization in Organic Computing Systems. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 5(3):10:1–10:32, September 2010.

[SFL06] Seppanen, Olli; Fisk, William J; Lei, QH: Effect of temperature on task performance in office environment. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.

[SJ09] Sears, Andrew; Jacko, Julie A: Human-Computer Interaction Fundamentals. CRC Press, 2009.

[SMS05] Schöler, Thorsten; Müller-Schloer, Christian: In (Beigl, Michael; Lukowicz, Paul, Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Architecture of Computing Systems. Innsbruck, Austria, S. 139–153, 2005.

[SSJ06] Saberi, Ommid; Saneei, Parisa; Javanbakht, Amir: Thermal comfort in architecture. WINDSOR 2006: Comfort and Energy Use in Buildings-Getting them right, 2006.

[Su94] Sundstrom, E.; Town, J. P.; Rice, R. W.; Osborn, D. P.; Brill, M.: Office Noise, Satisfaction, and Performance. Environment and Behavior, 26(2):195–222, 1994.

[VBVDB04] Van Bommel, WJM; Van Den Beld, GJ: Lighting for work: a review of visual and biological effects. Lighting Research & Technology, 36(4), 2004.

[Ve02] Veitch, Jennifer A; Bradley, John S; Legault, Louise M; Norcross, Scott; Svec, Jana M: Masking speech in open-plan offices with simulated ventilation noise: noise level and spectral composition effects on acoustic satisfaction. Institute for Research in Construction, Internal Report IRC-IR-846, 2002.

[Wi13] Wijsman, Jacqueline; Grundlehner, Bernard; Liu, Hao; Penders, Julien; Hermens, Hermie: Wearable physiological sensors reflect mental stress state in office-like situations. In: Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), 2013 Humaine Association Conference on. IEEE, S. 600–605, 2013.

[Wo09] Wooldridge, Michael: An Introduction to MultiAgent Systems. Wiley Publishing, 2nd. Auflage, 2009.

[WWC02] Witterseh, Thomas; Wyon, David; Clausen, Geo: The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on office work. In: Proceedings of Indoor Air 2002. 2002.

[Wy04] Wyon, DP: The effects of indoor air quality on performance and productivity. Indoor air, 14(s7):92–101, 2004.

[WYW10] Wang, Zhu; Yang, Rui; Wang, Lingfeng: Multi-agent intelligent controller design for smart and sustainable buildings. In: Proceedings of the 4th IEEE Systems Conference. S. 277–282, April 2010.

[WYW11] Wang, Z.; Yang, R.; Wang, L.: Intelligent multi-agent control for integrated building and micro-grid systems. In: Proceedings of the IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). S. 1–7, Jan 2011.

[Zi03] Zimmermann, Philippe; Guttormsen, Sissel; Danuser, Brigitta; Gomez, Patrick: Affective computing - a rationale for measuring mood with mouse and keyboard. International journal of occupational safety and ergonomics, 9(4):539–551, 2003.