

# Multifunktionale Fassaden – Effektive Auslegung durch CAD-Einsatz

von Michael Viotto

## Überblick

Für optimalen Energieertrag sind zahlreiche technische Randbedingungen bei der Auslegung einer Photovoltaik (PV)-Fassade zu berücksichtigen (unterschiedliche Ausrichtungen/Neigungen der Module; mögliche Teilabschattung; höhere und unterschiedliche Betriebstemperaturen). Installation und Betrieb einer PV-Fassade erfordern die Abstimmung zwischen Architektur, Bauwesen und Elektrotechnik. Zur Unterstützung der Planer wurde das Programm PV-CAD entwickelt, das den Energieertrag unter Berücksichtigung von inhomogener Einstrahlung und Abschattung, Temperaturverhalten der Fassadenmodule sowie unterschiedlichen elektrischen Anlagenkonzepten schnell ermittelt; es fügt sich nahtlos in CAD-Arbeitsumgebungen ein.

The energetically optimal design of PV façades requires the consideration of many technical conditions (different elevations/orientations of modules; shading possibility; high and different module temperatures). It also requires the interface with architecture, civil and electrical engineering. To support this planning process, the software program PV-CAD was developed which rapidly calculates energy yield under conditions of inhomogeneous irradiance, shading, thermal behaviour of modules and electrical layout. PV-CAD is compatible with other civil and electrical engineering CAD programs and incorporates extensive databases (weather data; modules and inverter types).

## 1. Einleitung

Demonstrations- und Forschungsprojekte sowie industrielle Anwendungen haben gezeigt, daß die Integration von Photovoltaikmodulen in die Fassade eines Gebäudes eine sinnvolle Möglichkeit zur Bereitstellung regenerativer elektrischer Energie ist [1]. Die Module werden mit Hilfe einer ohnehin notwendigen Pfosten-Riegel-Konstruktion am Gebäude angebracht. Bei Einsatz von rahmenlosen Modulen lassen sich Befestigungssysteme verwenden, die bereits in großen Stückzahlen produziert werden. Dieses führt zu deutlichen Kosteneinsparungen gegenüber Solaranlagen, die eine spezielle Konstruktion benötigen. Ein weiterer Vorzug ist der verbesserte optische Eindruck, den eine integrierte Lösung gegenüber einer separat montierten Anlage bietet. Die Solarmodule einer Photovol-

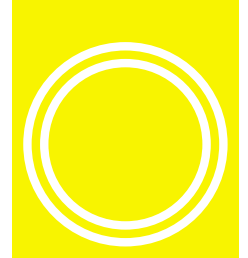
taik (PV)-Fassade ersetzen herkömmliches Material, das für den Aufbau der Fassade zum Einsatz gekommen wäre. Die spezifischen Kosten werden also um den Wert des entsprechend eingesparten Materials verringert. Aufgrund der geringen Leistungsdichte (maximal ca.  $1.000 \text{ W/m}^2$ ) des solaren Energieangebots ist die Photovoltaik eine Technik mit relativ hohem Flächenbedarf. In dicht besiedelten Regionen stehen gesondert nutzbare Flächen jedoch nicht bzw. nur unter großen Kosten zur Verfügung. Bei der Integration von Photovoltaik in Gebäuden fällt kein Aufwand zur Bereitstellung und Erschließung spezieller Flächen an. PV-Fassaden werden vorwiegend in Bürogebäuden Anwendung finden. An Tagen mit geringer Bewölkung deckt sich der elektrische Energiebedarf gut mit dem Angebot eines entsprechend dimensionierten Solargenerators. Der Solarstrom wird also zu einem hohen Anteil direkt im Gebäude genutzt.

Nachteil einer PV-Fassade ist die Komplexität des Systems. Im Gegensatz zu herkömmlichen Anlagen weisen die Module häufig unterschiedliche Ausrichtungen und Neigungen auf. Eine Abschattung der Anlage durch Nachbargebäude oder eine Eigenverschattung bei gebäudeintegrierten PV-Anlagen (Fassade ebenso wie Dach) kann auftreten. Das thermische Verhalten ist bei der Gebäudeintegration ebenfalls in Betracht zu ziehen, da hier deutlich höhere Temperaturen als bei freier Aufständigung der Module auftreten können. Installation und Betrieb einer PV-Fassade berühren zwei Fachgebiete – Bauwesen und Elektrotechnik – an deren Nahtstelle Fehler im Entwurf und bei der Realisierung entstehen können.

Es bestehen daher noch Unsicherheiten bei der Auslegung von PV-Fassaden hinsichtlich des Energiegewinns unter Berücksichtigung von Abschattung, Temperaturverhalten und unterschiedlichen elektrischen Anlagenkonzepten, sowie des optischen Eindrucks der Gesamtanlage.

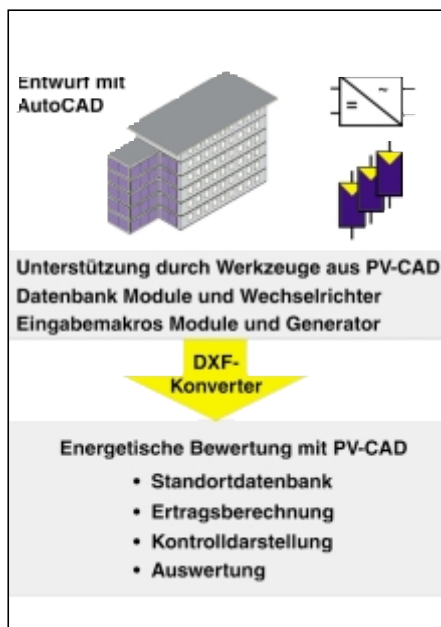
## 2. CAD-Integration

Die Fassade mit ihren vielfältigen Funktionen stellt einen wichtigen Teil jedes Gebäudes und gleichzeitig ein



wesentliches gestalterisches Element für den Architekten dar. Der Entwurf der Fassade ist ein Teil der – üblicherweise CAD-unterstützten – Planung des gesamten Gebäudes. Die Planung einer Solarfassade sollte sich daher möglichst nahtlos in den üblichen Entwurfsvorgang eines Gebäudes integrieren. PV-CAD unterstützt die Planung einer Solarfassade bereits bei der graphischen Eingabe des Gebäudes in ein CAD-System. Für das weit verbreitete Programm AutoCAD wurden Werkzeuge zur Auswahl und Platzierung von Solarmodulen erstellt, die auch große Generatoren mit vielen Modulen schnell in die Gebäudezeichnung einfügen. Der Gebäudeplaner arbeitet auch beim Entwurf der Solarfassade mit dem gewohnten CAD-System. Seine Erfahrung mit diesem System wird ebenso genutzt wie bereits getätigte Investitionen in diesem Bereich. PV-CAD liest die Gebäudezeichnung im DXF-Format ein, das von zahlreichen CAD-Programmen unterstützt wird, und extrahiert die für die Berechnung wesentlichen Daten. In Abhängigkeit von der Komplexität des Gebäudes können daher auch sehr preiswerte CAD-Programme eingesetzt werden. Auch für ein derar-

Abbildung 1: Makros für das weitverbreitete Konstruktionsprogramm AutoCAD erleichtern die Platzierung und die elektrische Verbindung von Modulen. Die Zeichnungsdatei wird von PV-CAD eingelesen und dient als Basis für die Ertragsberechnung.



tiges Programm wurden angemessene Werkzeuge erstellt, die den Entwurf deutlich beschleunigen. Die Schaltpläneingabe orientiert sich an Standards und nutzt vorhandene Lösungen. Das Auslegungsprogramm importiert Daten im SPICE-Format, die mit herkömmlichen Elektro-CAD-Programmen erstellt worden sind. Eine weitere Möglichkeit ist die Eingabe der Generatorschaltung unter AutoCAD direkt in die Gebäudezeichnung mit den bereitgestellten Werkzeugen. Verfügt der Elektroplaner über kein CAD-System, bietet PV-CAD mit einer editierbaren Ansicht der Generatorflächen ebenfalls eine leicht zu bedienende Schaltungseingabe. Mit diesem Werkzeug werden die Module in einer projizierten 3D-Ansicht des Gebäudes zu Strängen und Generatoren verbunden. Die Eingabe der Schaltung wird durch Datenbanken für Solarmodule und Wechselrichter unterstützt. Die elektrischen Daten des Generators werden mit Hilfe dieser Datenbank berechnet und stehen dem Planer zur Verfügung. Die vielfältigen Eingabemöglichkeiten für Gebäude und elektrische Schaltung sichern einen flexiblen Einsatz von PV-CAD in unterschiedlichen Konstellationen der Zusammenarbeit von Gebäude- und Elektroplaner.

### 3. Datenbanken

Informationen über Einstrahlung und Temperatur am Gebäudestandort bilden die Basis der Energieertragsrechnung. Diese meteorologischen Daten sind häufig nicht verfügbar oder sie liegen lediglich als gedrucktes Tabellenwerk vor, aus dem die Werte manuell in den Rechner übertragen werden müssen. Das Computerprogramm PV-CAD enthält daher für weltweit etwa 2.000 Standorte Monatsmittelwerte der benötigten Eingangsdaten. Aus den Angaben dieser Datenbank synthetisiert PV-CAD für den gewählten Ort Zeitreihen mit stündlicher Auflösung von Einstrahlung und Umgebungstemperatur [2]. Die Datenbank verfügt über Suchfunktionen, die das Auffinden von Daten aus der Nähe eines Anlagenstandortes erleichtern. Der Datenbestand entstammt dem Simulationssystem INSEL [3] und läßt sich einfach durch den Anwender um weitere Standorte erweitern.

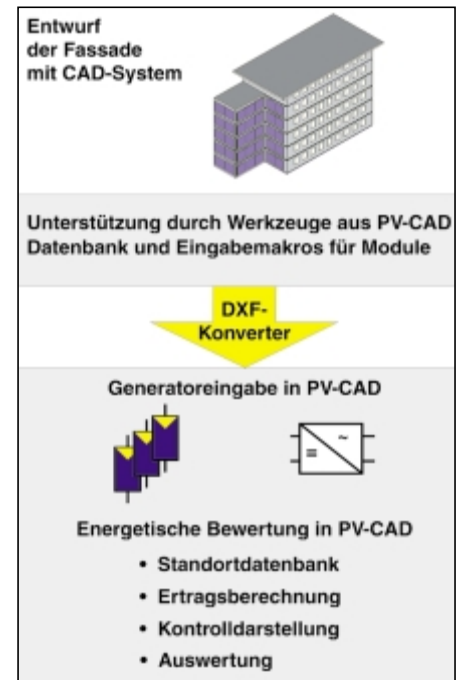
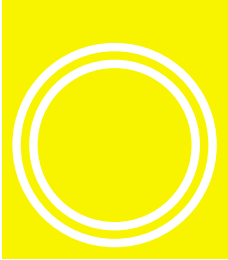


Abbildung 2: Verfügt der Elektroplaner über kein CAD-Programm, kann er die Zeichnungsdatei vom Architekten übernehmen und die Schaltungseingabe direkt in PV-CAD vornehmen. Hohe Investitionen in CAD-Software sind daher nicht unbedingt erforderlich.

Die integrierte Datenbank für Solarmodule und Wechselrichter baut auf dem Informationssystem Erneuerbare Energie (ISEE) [4] auf und bietet mit über 300 Solarmodulen und fast 100 Wechselrichtern eine umfangreiche und aktuelle Basis für die Auslegung von Anlagen. Die Benutzeroberfläche ist auf einfache und intuitive Bedienung optimiert. Sie erleichtert dem Anwender die schnelle Auswahl des passenden Moduls über die Angabe der gewünschten elektrischen und geometrischen Eigenschaften. Außer den für die Simulation benötigten Informationen können weitere Daten, z. B. die elektrische Schutzklasse oder die Herstelleradresse, zu einem ausgewählten Modul oder Wechselrichter dargestellt werden. Die Datenbank ist erweiterbar und beinhaltet auch Abbildungen von Modulen.

### 4. Algorithmen

Aus der Gebäudegeometrie sowie der geographischen Lage und den Wetterdaten werden die Einstrahlungsverläufe auf die einzelnen Module der



Fassade berechnet. Die Abschattung durch benachbarte Bebauung oder das Gebäude selbst wird berücksichtigt. Verluste aufgrund der richtungsabhängigen Reflexion an der Moduloberfläche und Einschränkungen der Diffusstrahlung gehen ebenfalls in die Berechnung ein. Dies ermöglicht es, Ertrag und Betriebsverhalten des PV-Generators genau zu berechnen und die Wirkung von verschiedenen Varianten der Strangführung zu ermitteln. Für die Berechnung der Direktbeschattung wird ein Projektionsalgorithmus mit Clippingroutinen verwendet. Die Umrechnung der meteorologischen Einstrahlungswerte auf geneigte Flächen erfolgt mit dem Diffusstrahlungsmodell nach Perez [5]. Die Zeitreihen der Einstrahlung auf die Module und der Umgebungstemperatur sind die Grundlagen der Berechnung des PV-Generators. Die elektrischen Kennlinien einzelner PV-Module werden mit einem vereinfachten Modell [6] beschrieben. Zur Charakterisierung eines Solarmoduls genügen die üblichen Datenblattangaben (Kurzschlußstrom, Leerlaufspannung, MPP-Strom und Spannung), die in der integrierten Komponentendatenbank vorliegen. Das vereinfachte Modell leistet die geforderte Geschwindigkeit bei der Berechnung der resultierenden elektrischen Charakteristik eines Photovoltaik-Generators. Bei der Addition der Modulkennlinien zur Generatorcharakteristik werden die individuellen Modultemperaturen und -bestrahlungsstärken berücksichtigt. Zur Beschreibung des im Generator verwendeten Wechselrichters werden ebenfalls nur Angaben benötigt, die üblichen Datenblättern entnommen werden können: Nennleistung, Wirkungsgrad, Mindesteingangsleistung, Maximalstrom sowie die minimale und maximale Eingangsspannung.

## 5. Visualisierung

Der Benutzer kann eine Bildschirmdarstellung der Gebäudegeometrie und der Platzierung der Module aufrufen und damit die Dateneingaben kontrollieren. In einem Bedienmenü kann der Blickwinkel und der Bildausschnitt gewählt werden. In der Geometriedarstellung werden die Bestrahlungssummen für die PV-Elemente mit einer Farbcodierung wiedergegeben und die jeweils zu einem seriellen

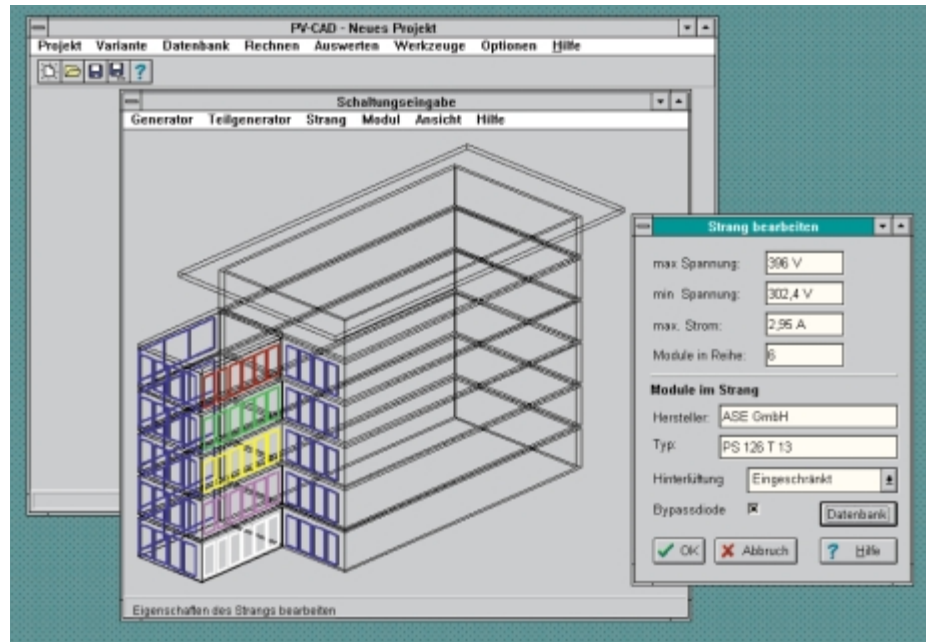


Abbildung 3: Die integrierte Schaltungseingabe bietet eine 3D-Ansicht des Gebäudes zur Eingabe der Stränge und Generatoren. Die Eingabe der Schaltung wird durch Datenbanken für Solarmodule und Wechselrichter unterstützt.

Strang gehörenden PV-Module angezeigt. Diese Darstellung unterstützt den Planer bei der Optimierung des PV-Generators, da er Schwachstellen in der Anordnung und Verkabelung der Module unmittelbar erfassen und Verbesserungsmöglichkeiten erkennen kann. Die Energieerträge unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen werden graphisch aufbereitet und dienen dem Nutzer zur Optimierung der Anlagenauslegung. Das Einlesen und die Ausgabe der Ergebnisse in Standardprogrammen wie z. B. Winword oder Excel ist mit Hilfe von Makros ebenfalls möglich.

## 6. Zusammenfassung

PV-CAD ermöglicht als anwendungsorientiertes Werkzeug eine rationelle Auslegung von PV-Fassaden. Es läßt sich mit bereits vorhandenen CAD-Systemen kombinieren, so daß bereits getätigte Investitionen genauso genutzt werden wie die mit diesen Systemen erworbenen Erfahrungen. Offene Schnittstellen gestatten die Einbindung weiterer Entwurfswerkzeuge. PV-CAD arbeitet unter Microsoft-Windows und verfügt über die entsprechende graphische Benutzerschnittstelle. Die Kompatibilität zum PC-Standard eröffnet eine sehr breite Anwenderbasis und ermöglicht den Einsatz des Programms auch auf preiswerten

Rechnern. PV-CAD ermöglicht eine effiziente Planung von Solarfassaden und kann daher dem PV-Einsatz in Gebäuden weitere Impulse geben.

## 7. Ausblick

Ein wesentliches Ziel der Anlagenauslegung ist die Erzielung eines möglichst hohen Energieertrags unter gegebenen baulichen Randbedingungen. Wegen der zahlreichen elektrischen Konfigurationsmöglichkeiten einer PV-Fassade ist der manuelle Optimierungsprozeß mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Hier kann der Planer durch Algorithmen unterstützt werden, die sowohl Gebäudegeometrie als auch elektrische Randbedingungen analysieren und auf dieser Basis Analyse Vorschläge zur energieoptimalen Generatorschaltung erstellen.

Der Rechenkern von PV-CAD arbeitet modulatorientiert. Für jedes Modul wird die Bestrahlungsstärke und der Ertrag berechnet. An dieser Stelle ist eine Reduzierung der Detaillierung durch ein Verfahren sinnvoll, das die räumliche Auflösung der Simulation ohne Genauigkeitseinbußen herabsetzt, indem es z. B. benachbarte und elektrisch ähnliche Module zu Modulgruppen zusammenfaßt. Diese Gruppen werden dann wie ein großes Modul ge-

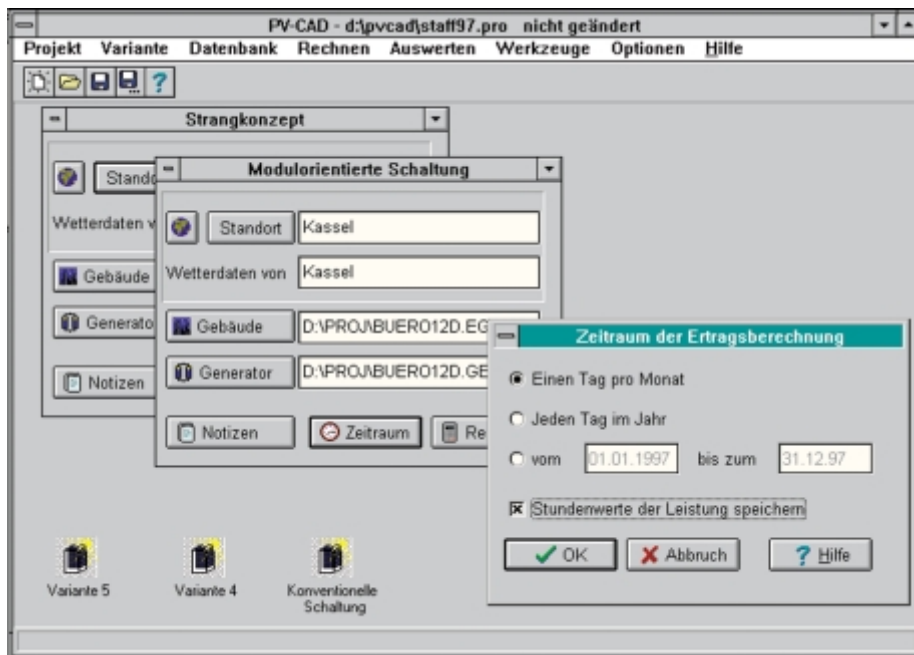
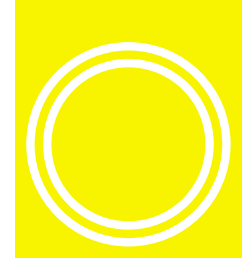


Abbildung 4: Berechnung und Vergleich von unterschiedlichen Energieaufbereitungen sind dank des realisierten Variantenkonzepts einfach möglich.

rechnet. Aufgrund der geometrischen Struktur von PV-Fassaden (viele gleich ausgerichtete Module eines Typs in einer Gebäudefläche) ist eine vielfache Beschleunigung der Berechnung zu erwarten. Ein wichtiger Unterschied zwischen einer PV-Fassade und anderen Solaranlagen ist der Einsatz kundenspezifischer Module. Die Gestaltungsfreiheit des Architekten wird durch die Bereitstellung von Modulen in nahezu beliebigen Abmessungen unterstützt. Diese Flexibilität ist eine Voraussetzung für die Akzeptanz der Photovoltaik im Gebäudebereich. Der Entwurf aufmaßbezogener Module kann durch Bereitstellung einer Datenbank mit den wesentlichen Technologie-Kennwerten des Modulherstellers (z. B. einsetzbare Zellentypen, Abbildungen der Zellen, Materialien für die Kapselung, einzuhaltende Mindestabstände, maximale Modulabmessungen) unterstützt werden. Der Anwender gibt bestimmte Kennwerte (z. B. Abmessung oder Transluzenz) vor und

erhält vom Programm einen Vorschlag zur Modulkonstruktion.

Die Wahl des Installationskonzepts sowie die Führung und Querschnitte der Kabel haben Einfluß auf die Kosten und den Gesamtwirkungsgrad einer Anlage. Die Kabelführung ist u. a. vom verwendeten Pfosten- und Riegelsystem abhängig. Auch hier können herstellerepezifische Kennwerte in eine Datenbank eingebracht werden. Algorithmen, die auf diese Daten zugreifen, unterstützen den Planer bei der Optimierung der Kabelführung durch Kabellängen- und Verlustberechnung.

## 8. Dank

PV-CAD wurde mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) in Zusammenarbeit von der Universität Oldenburg (Abteilung Energie- und Halbleiterforschung), dem

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) sowie dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET e.V.) erstellt. An der Entwicklung des Programms arbeiteten Marc Esser, Helmut Giese, Elke Hait, Andreas Hertenstein, Edgar Kunz, Detlef Pukrop, Dirk Stellbogen und Michael Viotto.

## Literatur

- [1] C. Bendel  
„PV-Experimentierfassade – Untersuchungsergebnisse und Kostenreduktionspotentiale“, 12. Natl. Symp. Photovoltaische Solarenergie (OTTI), Staffelstein (1997) 76
- [2] D. Heinemann, C. Langer, J. Schumacher  
„Synthesis of hourly ambient temperature time series correlated with solar radiation“, Proc. EUROSUN '96, Freiburg (1996)
- [3] J. Schumacher  
„Das Simulationsprogramm INSEL“, 8. Natl. Symp. Photovoltaische Solarenergie (OTTI), Staffelstein (1993) 307
- [4] K. Rohrig  
„ISEE - Informationssystem für Erneuerbare Energien im Internet“, 12. Natl. Symp. Photovoltaische Solarenergie (OTTI), Staffelstein (1997) 453
- [5] D. Stellbogen  
„Auslegung von gebäudeintegrierten PV-Generatoren mit Shade und PV-Node“, 11. Natl. Symp. Photovoltaische Solarenergie (OTTI), Staffelstein (1996)
- [6] D. Pukrop  
„Numerische Simulation größerer Photovoltaik-Generatoren – Grundlagen der Modellierung und Untersuchung von Anwendungsbeispielen“, Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (1997)