

12.04.2005

Technologie-Monitoring

Weitere Bereiche - Vertiefungen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmer:

Arbeitsgemeinschaft:

Dr.EICHER+PAULI AG
Kasernenstrasse 21
4410 Liestal

e c o n c e p t AG
Lavaterstrasse 66
8002 Zürich

Autoren:

Reto Rigassi, Dr.EICHER+PAULI AG

Hanspeter Eicher, Dr.EICHER+PAULI AG

Pia Steiner, **e c o n c e p t** AG

Walter Ott, **e c o n c e p t** AG

Begleitgruppe:

Ruedi Meier, Programm energiewirtschaftliche Grundlagen

Lukas Gutzwiller, Bundesamt für Energie BFE

Andreas Gut, Bundesamt für Energie

Rudolf Jegge, Amt für Umwelt und Energie BS

Bruno Bebié, Industrielle Betriebe der Stadt Zürich

Tony Kaiser, Alstom Power Technology Centre

Eberhard Jochem, Eidgenössische Technische Hochschule ETH

Impressum Titel

Projektnummer: 2003.1039

Verfasser: Reto Rigassi

Telefon: 0619 274 271

E-Mail: reto.rigassi@eicher-pauli.ch

Mitautoren: Pia Steiner, Walter Ott, **e c o n c e p t**

Freigabe: Hanspeter Eicher

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Energiewirtschaftliche Grundlagen“ des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist allein der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

Vertrieb: BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern · www.bbl.admin.ch/bundespublikationen

Bestellnummer 805.xxx d / 00.00 / 0000

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung.....	5
	Résumé	17
1	Einleitung	29
1.1	Aufgabenstellung	29
1.2	Zielsetzungen	30
1.3	Berichtsaufbau	31
2	Methodik.....	33
3	Wahl der untersuchten Technologien	35
4	Drehzahlvariable elektrische Motoren	41
4.1	Marktsituation	41
4.2	Untersuchtes Fallbeispiel.....	44
4.3	Berechnungsmodell Nutzenergiekosten	46
4.4	Bisherige Entwicklung / aktueller Stand	52
4.5	Künftige Entwicklung	60
4.6	Fazit	62
5	Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohngebäude.....	65
5.1	Marktsituation	66
5.2	Untersuchungsmodell.....	71
5.3	Bisherige Entwicklung / aktueller Stand	76
5.4	Künftige Entwicklung	87
5.5	Fazit	94
6	Membrantechnik	97
6.1	Ausgangslage und Gegenstand der Untersuchung	97
6.2	Verfahren der Membrantechnik.....	98
6.3	Bisherige Entwicklung und aktuelle Marktsituation der Membrantechnik	100
6.4	Potenzial der Membrantechnik und zukünftige Entwicklung.....	105
6.5	Hemmnisse und Erfolgsfaktoren für die Verbreitung der Membrantechnik	109
6.6	Fazit	114
7	Kunststoffleichtbau im Automobilbau	117
7.1	Ausgangslage und Ziele der Untersuchung	117
7.2	Materialien und Verfahrenstechnik	119
7.3	Bisherige Entwicklung und aktueller Kunststoffeinsatz im Automobil-Leichtbau	127
7.4	Potenzial und zukünftige Entwicklung im Automobil-Leichtbau.....	135
7.5	Monitoringfaktoren: Hemmnisse und Erfolgsfaktoren.....	145

7.6	Fazit	153
8	Konsequenzen für die Energiepolitik	157
8.1	Übersicht Technologien/Technologiefelder.....	157
8.2	Erkenntnisse für die Energie-, Technologie- und Innovationspolitik	158
8.3	Energieforschung und -förderung.....	160
8.4	Nutzen des Technologiemonitorings.....	162
8.5	Künftige Gestaltung des Technologiemonitorings.....	163
9	Literaturverzeichnis.....	165
	Anhang.....	169
	Liste der Interviewpartner:	169

Zusammenfassung

Aufgabenstellung

Die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte zeigen, dass Veränderungen der Energieproduktions- und -verbrauchsstrukturen infolge der langen Lebensdauer der Investitionen nur langsam erfolgen, und dass die Entwicklung neuer Energietechnologien oft eine bis mehrere Dekaden benötigt. Umso grösser ist das Bedürfnis der Energiepolitik und der Energie-Forschungspolitik, frühzeitig über Informationen zur Richtung der zu erwartenden langfristigen Entwicklungstrends zu verfügen, um die strategische Politikvorbereitung und -ausrichtung sowie die Zuteilung von Energie-Forschungsmitteln möglichst nachhaltig vorzunehmen. Zu diesem Zweck ist es unerlässlich, Informationen zu den Entwicklungsperspektiven von Energietechnologien zu generieren, welche Hinweise auf den künftigen Verlauf der jeweiligen Technologiepfade geben. Die Wirtschaftlichkeit, und allfällige direkte Zusatznutzen (wie weniger CO₂, Lärm, Abgase usw.) sind für den Markterfolg von neuen Technologien von zentraler Bedeutung. Die Grundlagen für die Beurteilung der technologischen Entwicklung in wirtschaftlicher Hinsicht sowie bezüglich weiterer für den Markterfolg relevanter Zusatznutzen oder Anwendungshemmnisse sind jedoch in der Regel nicht oder nur ungenügend vorhanden. Es ist beispielsweise weitgehend unklar, welche Technologien sich zu welchen Kosten im Rahmen von Energie 2000 und EnergieSchweiz entwickelt haben. Die künftigen Entwicklungspfade von Energieeffizienztechnologien sowie von erneuerbaren Energien sind noch viel weniger bekannt.

Im Rahmen der Studie 'Technologie-Monitoring I' [Eicher+Pauli, **eco**ncept, 2002] wurde ein erster Schritt für ein umfassendes und systematisches Technologie-Monitoring gemacht. Zur Beurteilung der technologischen Entwicklung in wirtschaftlicher Hinsicht wurde eine einheitliche Methodik erarbeitet, wobei für vier Technologiebereiche¹ die technologisch-wirtschaftliche Entwicklung in den letzten 10 Jahren analysiert und eine Abschätzung der bis ca. 2010 zu erwartenden Entwicklung dieser vier Technologiebereiche vorgenommen wurde.

Mit der hier erfolgenden Weiterführung des Technologie-Monitorings wird die Analyse der wirtschaftlichen Entwicklung auf weitere für die Zukunft der Energieversorgung relevante Technologien ausgedehnt. Die entscheidenden Einflussfaktoren für die wirtschaftliche Entwicklung der Technologien werden nach Möglichkeit analysiert. Dies betrifft insbesondere marktspezifische Einflüsse wie Markt- bzw. Anbieterstruktur, Konkurrenzsituation unter den Anbietern, Markttransparenz, etc. Angesichts des erforderlichen Betrachtungshorizontes bei energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Entscheidungen wird der Zeithorizont der Technologieanalysen von 2010 auf 2020 bis 2030 ausgedehnt. Die Konsequenzen der Technologieentwicklung für die Energiepolitik werden eingehend untersucht.

Die Auswahl der im Technologie-Monitoring II untersuchten Technologien bzw. Technologiefelder basiert auf den Kriterien bisherige Entwicklung, Absatz- resp. Effizienzpotenzial und Handlungsspielraum für die Technologieförderung. Zusätzlich besteht die Vorgabe, nach Möglichkeit ein Technologiebeispiel aus dem Mobilitätsbereich und eines aus dem Bereich Industrie/ Grossverbraucher zu bearbeiten. Untersucht werden: Drehzahlvariable elektrische Motoren, Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohnbauten, Membrantechnologie und Kunststofftechnologie für den Fahrzeugleichtbau.

¹ motorische Wärmekraftkopplung, Brennstoffzellenheizgeräte; Luft-/Wasserwärmepumpen für Einfamilienhäuser und Hochleistungswärmedämmung

Drehzahlvariable elektrische Motoren

Knapp die Hälfte des schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs wird in elektrischen Motoren umgesetzt. Mehr wie ein Drittel davon wird für die Medienförderung (Lüftung, Pumpen, Kompressoren) beansprucht, für welche sich mit dem Einsatz drehzahlvariabler Motoren besonders grosse Energieeffizienzpotenziale ergeben, da die bezogene Leistung von der dritten Potenz der Fördermenge abhängig ist. Das (technische) Sparpotenzial durch Drehzahlregulierung wird auf ca. 4 % des gesamten Stromverbrauchs (rund 2'000 GWh) geschätzt.

In einzelnen Anwendungsbereichen (z.B. bei Heizungspumpen) haben sich drehzahlvariable Antriebe als Standardlösung durchgesetzt. Jedoch wird das bedeutende, wirtschaftliche Effizienzsteigerungspotenzial bis heute nur sehr unvollständig genutzt.

Die wirtschaftliche Entwicklung von drehzahlvariablen Antrieben wird anhand eines Pumpenantriebs in einem Industriebetrieb mit einer Nenn-Antriebsleistung von 2.2, 11 und 55 kW analysiert. Als Referenzvariante wird der Betrieb des Motors mit konstanter Drehzahl angenommen, wobei der Volumenstrom mit einer mechanischen Drosselung (Drosselventil resp. -klappe) geregelt wird.

Technologische Entwicklung

Drehzahlvariable Antriebe haben sich seit Beginn der 90er Jahre sehr dynamisch entwickelt. So haben sich die Preise für Frequenzumformer in etwa halbiert, was primär auf die wesentlich gesunkenen Kosten für die leistungselektronischen Bauteile (Halbleiter) zurückzuführen ist. Einen spürbaren Einfluss hatte zudem die Entwicklung von standardisierten Steuerungen auf der Basis von integrierten Schaltungen (Chips) sowie die fortschreitende Automatisierung der Produktion.

Angetrieben von der zunehmenden Verbreitung der Leistungselektronik mit immer neuen Anwendungsgebieten darf mit einer kontinuierlichen Weiterentwicklung gerechnet werden (u.a. wachsende Systemintegration und Leistungsdichte, erhöhte Temperaturbeständigkeit). Davon werden auch drehzahlvariable Antriebe profitieren. Unter der Voraussetzung, dass sich das Marktvolumen um den Faktor 1.5 bis 2.5 erhöht und Kostendegressionsfaktoren von 0.85 bis 0.9 erzielt werden, ergibt sich für die Wechselrichter bis 2030 eine Kostenreduktion von 25 bis 45 %.

Die Wirtschaftlichkeitsschwelle von drehzahlvariablen Antrieben hat sich mit den sinkenden Preisen für die Frequenzumformer zunehmend in Richtung von Antrieben mit geringerer Betriebsstundenzahl oder höherer Auslastung verschoben. Dies bedeutet, dass sich das wirtschaftliche Potenzial deutlich vergrössert hat.

Bedeutung und Entwicklung der Transaktionskosten

Drehzahlvariable Antriebe haben sich seit Anfang 90er Jahre von einer innovativen Technologie, die aufgrund einiger 'Kinderkrankheiten' noch wenig verbreitet war, zu einer etablierten, zuverlässigen Standardlösung entwickelt. Informationen über Vor- und Nachteile sind heute leicht zugänglich. Für die Planung und Beschaffung existieren EDV-Werkzeuge. Der Aufwand für Ausbildung und Instruktion hat sich wesentlich reduziert. Damit sind auch die Transaktionskosten für die Endabnehmer resp. die in ihrem Auftrag arbeitenden Planer deutlich gesunken.

Es scheint heute offensichtlich, dass die Transaktionskosten in der Industrie aufgrund ungünstiger Rahmenbedingungen massiv überbewertet werden. In kleinen Betrieben fehlt oft das notwendige Know-how, um vorhandene Sparpotenziale zu erkennen. Hinzu kommt, dass externe Beratungsleistungen, welche notwendig wären, um die Effizienzpotenziale zu identifizieren, als zu teuer erachtet werden. In vielen grossen Betrieben sind die personellen Ressourcen für Planung und Betrieb der technischen Anlagen in den letzten Jahren teilweise massiv reduziert worden. Vielerorts werden diese Aufgaben an externe Firmen vergeben. Diese kommen mit dem Stromverbrauch resp. den

Stromkosten, welche in der Regel nur über das ganze Unternehmen - d.h. ohne Zuordnung zu den einzelnen Betrieben - erfasst werden, nicht in Berührung.

Für die Zukunft darf dennoch angenommen werden, dass die Bedeutung der Transaktionskosten weiter sinkt. Möglich wird dies insbesondere dadurch, dass bei einer weiter zunehmenden Verbreitung der Leistungselektronik die Initialisierungskosten vor der ersten Beschaffung eines drehzahlvariablen Antriebes wesentlich an Bedeutung verlieren. Dies scheint insbesondere dann wahrscheinlich, wenn drehzahlvariable Antriebe in Zukunft noch verstärkt als Bestandteil einer weiter zunehmenden Automatisierung wahrgenommen werden und folglich weniger in Frage gestellt werden.

Entscheidende Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

Als entscheidende Hemmnisse stehen in der Industrie die folgenden Faktoren im Vordergrund:

- **Beurteilung der Wirtschaftlichkeit:**
Als Kriterium für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von kleineren Effizienzmassnahmen wird in der Industrie weitgehend eine Rückzahldauer (Pay-Back) von maximal 2 bis 5 Jahren verwendet. Damit wird eher das Investitionsrisiko und weniger zwangsläufig die Rentabilität bewertet.
- **Überbewertung der Transaktionskosten:**
In vielen industriellen Betrieben bestehen ungünstige Rahmenbedingungen, welche zu einer deutlichen Überbewertung der Transaktionskosten führen.

Eine Chance für drehzahlvariable Antriebe ergibt sich insbesondere dann, wenn sie in Zukunft noch verstärkt als Bestandteil einer weiter zunehmenden Automatisierung wahrgenommen werden. Dies dürfte für die Schweiz als Produktionsstandort mit hohem Automatisierungsgrad von spezieller Bedeutung sein. Neben den energetischen Effizienzgewinnen ergeben sich bei Pumpen und Ventilatoren auch betriebliche Vorteile durch die variable Drehzahl. Es darf davon ausgegangen werden, dass dieser Zusatznutzen weiter an Bedeutung gewinnt.

Jedoch müssen für eine erfolgreiche Entwicklung in der Industrie die wesentlichen organisatorischen Hemmnisse (Beurteilung der Wirtschaftlichkeit anhand von Rückzahldauer, betriebsinterne Strukturen und wenig ausgeprägtes Bewusstsein für energetische Aspekte) überwunden werden.

Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohngebäude

In Gebäuden mit überdurchschnittlicher Wärmedämmung liegen die Lüftungswärmeverluste in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Transmissionsverluste. Ein kontrollierter Luftwechsel und eine Rückgewinnung der Wärme aus der Abluft sind daher für eine weitere Reduktion des Energieverbrauches von entscheidender Bedeutung.

In Niedrigenergie-Wohngebäuden werden in der Schweiz Komfortlüftungen, welche Zu- und Abluft zentral erfassen und über eine Wärmerückgewinnung verfügen, am häufigsten eingesetzt. Gegenüber Abluftanlagen bieten sie (neben der Wärmerückgewinnung) einen höheren Komfort.

Im Bereich Neubau können heute bereits über 10 % der neu erstellten Fläche als Niedrigenergie-Wohnbauten mit Lüftungssystem bezeichnet werden. Im Sanierungsbereich sind die Anteile dagegen noch sehr gering - selbst wenn nur die Gesamtanierungen als Bezugsgrösse herangezogen werden.

Die Entwicklung von Lüftungssystemen in Niedrigenergie-Wohngebäuden wird anhand einer Komfortlüftung in einem Mehrfamilienhaus mit 8 Wohnungen untersucht (Sanierung und Neubau). Jede Wohnung verfügt über eine eigene Lüftungsanlage mit unabhängiger Zu- und Abluft sowie Wärmerückgewinnung.

Technologische Entwicklung

Obwohl Komfortlüftungen nunmehr seit mehr als zehn Jahren in der Schweiz installiert werden, sind die Preise für die Lüftungsgeräte bis vor wenigen Jahren praktisch unverändert geblieben. Eine entscheidende Rolle spielte dabei, dass der Druck auf die Preise bis vor kurzer Zeit gering geblieben ist. Referenzen und die Einschätzung der Produktequalität spielen eine wichtigere Rolle wie der Preis. Zudem wird der Bereich Komfortlüftung bei den meisten Anbietern noch weiter ausgebaut oder er befindet sich erst im Aufbau, was sowohl das Produktesortiment wie auch die Vertriebskanäle betrifft. Schliesslich wurde die Ausstattung der Geräte laufend verbessert.

Der einsetzende Kostendruck wird sich in Zukunft wohl verstärken und sich entsprechend auf die Verkaufspreise der Lüftungsgeräte auswirken. Durch eine verstärkt automatisierte Produktion, einen effizienteren Vertrieb (grösserer Umsatz pro Anbieter) und geringere Aufwendungen der Anbieter für Marketing, Akquisition/Ausbildung der Installateure besteht noch ein deutliches Kostenreduktionspotenzial. Unter der Annahme, dass sich die Ausstattung der Geräte nicht mehr wesentlich verändert, gehen wir davon aus, dass sich die Kosten für die Lüftungsgeräte bis 2020 durch Kosteneinsparungen bei Produktion und Vertrieb bis 2020 um 25 - 50 % reduzieren und sich danach kaum mehr weiter entwickeln.

Trotz montagefreundlicheren und leicht günstigeren Lüftungsverteilsystemen sind die Installationskosten bisher nur in sehr geringem Ausmasse gesunken. Als Gründe für diese Entwicklung kommen eine anfängliche Unterschätzung des Aufwandes und gestiegene Ansprüche der Bauherren in Frage.

Eine Reduktion der Installationskosten scheint vor allem durch verbilligte Komponenten bei gesteigertem Marktvolumen möglich. Der Arbeitsaufwand dürfte primär im Sanierungsbereich noch sinken, wenn die Hersteller wie für den Neubau vermehrt spezielle Luftverteilsysteme anbieten. Insgesamt gehen wir bei der künftigen Entwicklung der Installationskosten bis 2030 von einer Kostenreduktion von ca. 20 - 30 % aus.

Indem die früher üblichen Kreuzstrom-Wärmetauscher zunehmend durch Gegenstrom-Wärmetauscher verdrängt werden, hat sich der Temperatur-Änderungsgrad seit Anfang der neunziger Jahre durchschnittlich von 0.55 auf heute 0.80 verbessert. Bis 2010 dürften die Kreuzstromwärmetauscher praktisch ganz verschwunden sein und sich der Temperatur-Änderungsgrad auf durchschnittlich 0.85 erhöhen. Mit aufwändigeren Wärmetauschern ist längerfristig ein durchschnittlicher Temperatur-Änderungsgrad von 0.9 möglich.

Bedeutung und Entwicklung des Zusatznutzens

Trotz der technologischen Entwicklung wird auch auf lange Sicht eine Wirtschaftlichkeit von Komfortlüftungen alleine aufgrund der vermiedenen Energiekosten nicht erreicht werden können - die Gestehungskosten des vermiedenen Wärmebedarfs bleiben langfristig weit über den variablen Kosten bei der Wärmeerzeugung (Kosten für Heizöl). Selbst wenn dies erreicht werden könnte, wäre damit allerdings der Marktdurchbruch aufgrund der Vermieter/Mieter-Problematik noch lange nicht sichergestellt.

Aus Sicht des Vermieters ist entscheidend, dass die Kosten für Investition und Unterhalt der Lüftungsanlage durch eine erhöhte Zahlungsbereitschaft der Mieter aufgewogen werden. Gemäss der Studie 'Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohnbauten' untersucht [e c o n c e p t, Cepe, 2005] wird von den Mietern eine Lüfterneuerungsanlage aufgrund der besseren Raumluftqualität, der Rückkehr in frisch gelüftete Räume nach Abwesenheit, der Reduktion von Feuchtigkeitsproblemen, Aussenlärm und Schadstoffen sowie der Erhöhung der Sicherheit durch geschlossene Fenster positiv beurteilt. Die Zahlungsbereitschaft ist bei Neubauten grösser als bei Altbauten. Bei Altbauten mit unsanierten Fenstern ist die Zahlungsbereitschaft für neue Fenster höher als diejenige für eine Komfortlüftung. Die Zahlungsbereitschaft scheint zudem vom Einkommen der befragten Personen abhängig zu sein.

Insbesondere bei Neubauten steht den Aufwendungen für eine Wohnungslüftung eine deutlich höhere Zahlungsbereitschaft der Mieter gegenüber. Bei Sanierung wird die Zahlungsbereitschaft zwar geringer eingeschätzt als bei Neubauten, jedoch liegt sie auch hier über den Aufwendungen. Auch wenn die Unsicherheiten der Quantifizierung der Zahlungsbereitschaft berücksichtigt werden, kann doch festgestellt werden, dass die Aufwendungen für eine Komfortlüftung über erhöhte Mietzinse gedeckt werden können und die Attraktivität der Wohnungen trotzdem steigt. Dem Vermieter muss es jedoch gelingen, dem potenziellen Mieter die Vorteile der Komfortlüftung zu kommunizieren.

Im Sanierungsbereich ist zu berücksichtigen, dass die Zahlungsbereitschaft für eine Komfortlüftung geringer ist als für energietechnisch verbesserte Fenster. Für die Investierenden besteht jedoch gerade bei der Erneuerung des Gebäudebestandes das Risiko, dass nach dem Einbau verbesserter Fenster Feuchtigkeitsprobleme auftauchen können, wenn die Lüftungsfrage nicht gelöst wird. Da Komfortlüftungen mit beträchtlichen Investitionen und Eingriffen in die Wohnung verbunden sind, ist damit zu rechnen, dass sie primär bei Gesamt-sanierungen eingebaut werden. wo im Sinne einer wertvermehrenden Strategie Mietzins erhöhungen in Kauf genommen werden.

Mittelfristig kann angenommen werden, dass der Zusatznutzen durch die Etablierung von Qualitätsstandards gesteigert und durch den zunehmenden Bekanntheitsgrad besser wahrgenommen wird. In welchem Masse und in welchem Tempo durch die erwähnten Punkte die Zahlungsbereitschaft für eine Wohnung mit Komfortlüftung steigt, lässt sich allerdings kaum quantifizieren.

Entscheidende Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

Für den Markterfolg von Lüftungssystemen in Niedrigenergie-Wohnbauten wird auch auf längere Sicht der Zusatznutzen in Form der gesteigerten Luftqualität, etc. entscheidend bleiben. Die aus dem rein energetischen Blickwinkel berechneten Energiegestehungskosten der eingesparten Wärme lassen sich durch technische Fortschritte nicht auf das Mass der vermiedenen Wärmebereitstellungskosten reduzieren - auch dann nicht, wenn die Energiekosten massiv steigen oder die externen Kosten mitberücksichtigt werden.

Der Zusatznutzen resp. die daraus resultierende effektive Zahlungsbereitschaft für kontrollierte Lüftungssysteme muss deshalb bei der Marktbearbeitung im Zentrum stehen. Insbesondere ist der Bekanntheitsgrad von Komfortlüftungen bei Vermietern, Investoren und Architekten zu erhöhen. Dabei gilt es zu vermitteln, dass die Attraktivität einer Wohnung mit überdurchschnittlicher Wärmedämmung und einer Komfortlüftung steigt, da vor allem im Neubau und bei Sanierungen für gehobene Ansprüche die dazu erforderliche Zahlungsbereitschaft besteht. Bei den Mietern sind der Begriff Komfortlüftung als Synonym für eine ausgezeichnete Raumluftqualität und Beitrag zu Wohnkomfort zu etablieren und entsprechende Wohnqualitätsansprüche zu entwickeln. Der Qualitätssicherung ist bei wachsendem Marktvolumen und zunehmendem Kostendruck besondere Beachtung zu schenken. Schlecht ausgeführte Anlagen, welche z.B. störende Geräusche erzeugen oder Gerüche übertragen, machen den Zusatznutzen zunichte.

Membrantechnik

Die Membrantechnik ist kein Einzelverfahren, sondern bildet ein breites Technologiefeld mit zahlreichen Einsatzmöglichkeiten und steht im Technologie-Monitoring stellvertretend für zahlreiche neue, zukunftsweisende Verfahren mit einem bedeutenden Energiesparpotenzial. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie in unterschiedlichsten Bereichen mit grossem Wachstum (z.B. Biotechnologie) weisen auf ein grosses Markt- und Entwicklungspotenzial hin. Es werden die energie-relevanten Anwendungen der Membrantechnik betrachtet, die herkömmliche energieintensive Verfahren ersetzen. Zu den häufigsten Verfahren gehören die druckgetriebenen Verfahren (Ultra-, Mikro- und Nanofiltration sowie Umkehrosmose), die Pervaporation und die Dampfpermeation. Die Membranen dienen zur Trennung von Stoffgemischen verschiedenster Art.

Technologische Entwicklung der Verfahren

Seit über dreissig Jahren werden die druckgetriebenen Verfahren in der Wasseraufbereitung angewendet. Ab ca. Mitte der 80er-Jahre wurde die Pervaporation/Dampfpermeation in Pilotanlagen getestet. Die ersten kommerziellen Anlagen mit diesem Verfahren sind heute ca. 10 Jahre alt. Auch an den übrigen Membrantrennverfahren wird seit längerem geforscht. Die Verbreitung der kommerziellen Nutzung ist bei den einzelnen Verfahren sehr unterschiedlich. Die Übertragung der Membrantechnik von einer erprobten Anwendung auf einen neuen Zweck ist teilweise schwierig. Es können technische Probleme auftreten, wie beispielsweise kürzere Lebensdauer der Membranen bei Kontakt mit gewissen Substanzen. Standardisierte Anlagen existieren für Grossanwendungen in der Grundstoffchemie, der Petrochemie und der Meerwasserentsalzung. Dies sind alles Anwendungen, die in der Schweiz nicht vorkommen. In der Schweiz werden eher kleinere Membrananlagen in der Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie eingesetzt.

Marktsituation und Preise in der Schweiz

Die Preisentwicklung der Einzelmembranen und der Module ist vor allem eine Frage der Absatzmenge der Membranen. Um die Kosten der Membran- und Modulproduktion zu senken, ist es notwendig, grosse Stückzahlen zu produzieren, was jedoch nur bei Membrantypen möglich ist, die in grossen Mengen abgesetzt werden können. Dementsprechend sind für Standardprodukte, wie beispielsweise Anlagen zur Meerwasserentsalzung oder Grossanlagen der Grundstoffchemie, die immer gleiche Stoffe verarbeiten, die Membranpreise in den letzten Jahren deutlich gesunken. Die heutigen Produktionszahlen, der in schweizerischen Anlagen verwendeten Membrantypen sind aufgrund der speziellen Auslegung und ihrem Einsatz in kleinen Anlagen noch immer relativ tief und die Preise dementsprechend hoch.

Der Hauptanteil der in der Schweiz weiterverarbeiteten Membranen wird aus Deutschland, Frankreich und den USA importiert. Der Exportmarkt für Membranen hat heute aus volkswirtschaftlicher Sicht in der Schweiz keine Bedeutung. Membranmodule und Anlagen werden in der Schweiz von in- und ausländischen Anbietern installiert. Der Exportmarkt der Anlagen konzentriert sich in erster Linie auf den Bereich der Wasseraufbereitung.

Potenzial und zukünftige Entwicklung

Die energetische Gesamtrelevanz wird determiniert durch das spezifische Energiesparpotenzial der verschiedenen Anwendungen sowie die Einsatzmöglichkeiten der Membrantechnik in der Wirtschaft. Dieses Marktpotenzial wiederum ist abhängig von der technischen Weiterentwicklung der Verfahren und damit verbundenen neuen Anwendungsgebieten. Die unterschiedlichen Ausgangslagen der Einsatzgebiete, Referenzverfahren etc. verunmöglichen die Bestimmung eines allgemeingültigen Werts für das spezifische Energiesparpotenzial. Die im Bericht vorgestellten Beispiele zeigen jedoch auf, dass bedeutende spezifische Einsparungen möglich sind durch Ersatz thermischer Trennverfahren durch Membrantechnik.

Die Chancen der Technik liegen in den technischen und ökologischen Vorteilen. Verbesserte Ressourceneffizienz und höhere Produktqualität durch schonende Trennverfahren bewirken ein hohes Umweltschutzpotenzial, das - teilweise indirekt - auch energetische Einsparungen bewirkt. Ersetzt die Membrantechnik thermische Verfahren, so sind der geringere Energieverbrauch und CO₂-Ausstoss relevant. Die Leistungen der Membrananlagen hängen ab von der Art des Prozesses, den verarbeiteten Stoffen und der Auslegung der Gesamtanlage. Daher ist die Standardisierbarkeit der Verfahren begrenzt und eine quantifizierte Hochrechnung der spezifischen Einsparung auf ein Gesamtpotenzial der Industrie nicht möglich. In Zukunft dürfte der Einsatz der Membrantechnik in der Schweiz in all jenen Bereichen an Bedeutung gewinnen, die bereits heute teilweise diese Technologie anwenden: In der chemischen und pharmazeutischen Industrie, in der Lebensmittelindustrie sowie in der Aufbereitung und Reinigung von Abwasser. Gemessen am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz ist das Energiesparpotenzial der Membrantechnik im Inland begrenzt. Für den Einsatz von Membrantechnik geeignete Branchen sind Chemie/Pharma mit einem geschätzten jährlichen

Sparpotenzial von ca. 1-2 PJ. Die Nahrungsmittelindustrie mit einem energetischen spezifischen Sparpotenzial bei den relevanten Prozessen von über 30 % ist ebenfalls ein relevantes Einsatzgebiet der Membrantechnik. Weitere Anwendungsmöglichkeiten bieten die Textil-, Papier-, Automobil- und metallverarbeitenden Industrien.

Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

Folgende Aspekte begrenzen in der Schweiz die Bedeutung des Potenzials der Membrantechnik für Energieeinsparungen und eine Reduktion der CO₂-Emissionen:

- In der Schweiz werden relativ kleine Mengen von Stoffgemischen verarbeitet. Dadurch ist die Energieeinsparung durch Membrantechnik im Vergleich zum gesamten Energieverbrauch der Industrie bescheiden.
- Spezialisierte Prozesse mit häufig wechselnden Gemischen stellen hohe Anforderungen an die Flexibilität der Anlagen. Membranen reagieren sensibel auf Veränderungen der Zusammensetzung der Stoffgemische.

Folgende Punkte sprechen für die Relevanz der Membrantechnik:

- Eine Chance bietet die Membrantechnik für Nischenprodukte mit Spezialanforderungen und anspruchsvollen Serviceleistungen, wo nicht der energetische Nutzen, sondern die verbesserte Produkt- und Prozessqualität sowie die Reduktion der Umweltbelastung im Vordergrund steht.
- Besonders gute Chancen hat die Membrantechnik bei innovativen Industrien, die Prozesse von Grund auf neu entwickeln. Ein Beispiel dafür ist die Biotechnologie, wo viele Neuentwicklungen keine energieintensiven Verfahren ersetzen. Deshalb wurde dieser Bereich trotz hohem Entwicklungs- und Anwendungspotenzial nicht in die Untersuchung einbezogen. Ein energierelevanter, ebenfalls nicht berücksichtigter Einsatzbereich ist die Brennstoffzelle, die jedoch bereits im Technologie-Monitoring I untersucht wurde [Eicher et al. 2003].
- Weltweit gesehen leistet die Membrantechnik in grossindustriellen Prozessen der Grundstoff- und Petrochemie sowie in der Wasseraufbereitung und Meerwasserentsalzung einen bedeutenden Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen und der Umweltbelastung.

Die vorliegende Untersuchung kommt zum Schluss, dass heute und in den nächsten Jahren aus energetischer Sicht die Membrantechnik für die Schweiz weniger relevant ist. Umso bedeutender ist diese Technologie jedoch aus wirtschaftlicher Perspektive. Mit rasch aufeinander folgenden Innovationen und intensiver Forschung wird die Membrantechnik in Zukunft in verschiedensten Bereichen, insbesondere in der Biotechnologie, stark an Bedeutung gewinnen. Die Entwicklung der Biotechnologie verläuft dynamisch und es ist heute schwer abzuschätzen, welche Lebensbereiche diese Technologie in fernerer Zukunft beeinflussen und durchdringen wird. Es ist denkbar, dass gänzlich neue Verfahren und Anwendungen direkt oder indirekt zur Energieeffizienz beitragen werden.

Kunststoffleichtbau im Automobilbau

Die vorliegende Untersuchung zeigt die möglichen Gewichtseinsparungen im Automobilbau durch Einsatz faserverstärkter Kunststoffe auf. Es werden die existierenden Materialien und Verfahren vorgestellt, eine Übersicht über die bestehenden Anwendungen gegeben und Einschätzungen von Experten zur Weiterentwicklung des Technologiefelds präsentiert.

Technologische Entwicklung

Die Entwicklung im Automobilbau führt in Europa seit Jahren zu stetig zunehmenden Fahrzeuggewichten. Ursache sind generell zunehmende mittlere Fahrzeuggrößen, enorme Verbesserungen bei der technischen Ausstattung der Fahrzeuge, stark gestiegene Komfortbedürfnisse, verbesserte Sicherheit und Schalldämmung.

Verschiedene Forschungs- und Entwicklungsprojekte befassten sich in den letzten Jahren mit Kunststoffleichtbau im Automobilbau. Bei umfassendem Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen und neuen Fahrzeugkonzepten kann das Fahrzeuggewicht um 30 – 50 % reduziert werden. Die materialtechnische Machbarkeit wurde mit dem Bau mehrerer Konzept-Fahrzeuge nachgewiesen. Noch weitgehend ungelöst und Gegenstand der aktuellen Forschung ist die Frage der wettbewerbsfähigen Grossserienproduktion von strukturtragenden Bauteilen.

In den letzten Jahren hat der Kunststoffanteil im Auto stetig zugenommen und liegt bei Neuwagen heute bei rund 16 %, wovon aber nur ein kleiner Teil faserverstärkte, gewichtsreduzierende Kunststoffe sind. Die heutigen Anwendungen von faserverstärkten Kunststoffen in der Grossserienproduktion von Klein- und Mittelklassewagen beschränken sich vorwiegend auf Kleinteile und nicht-strukturtragende Teile. In "Premium-Cars" der oberen Preisklasse, die in Kleinserien produziert werden, werden faserverstärkte Kunststoffe vermehrt und teilweise auch für strukturtragende Bauteile eingesetzt. Das Einsatzpotenzial wird heute jedoch nicht ausgeschöpft, da im Autodesign-Prozess das Gewicht nur ein Entscheidungskriterium unter vielen ist. In der Automobilindustrie wird grosses Gewicht gelegt auf einen "intelligenten Materialmix", der aus einer Kombination von Stahl, Aluminium, Kunststoffen, Magnesium und weiteren Materialien besteht.

Markt- und Anbietersituation

Die Auto-Zulieferindustrie der Schweiz ist mit rund 20'000 Arbeitsplätzen und ca. fünf Milliarden Franken Umsatz wirtschaftlich bedeutend [www.ch-forschung.ch]. Die Zusammenarbeit zwischen den Autoproduzenten und den Zulieferern ist intensiv und der Austausch von Ideen und Know-how findet statt. Insgesamt sind die Marktstrukturen im Kunststoffleichtbau im Automobilbau intakt und sehr vielfältig, der Wettbewerb ist gross, wodurch der Entwicklungs- und Kostendruck zunehmend steigt.

Potenzial und zukünftige Entwicklung

Die Veränderung des Kunststoffanteils im Auto in der Zukunft wird für zwei mögliche Entwicklungen dargestellt: Die Variante "konventionelle Fahrzeugkonzepte" geht davon aus, dass auch in Zukunft Autos mit einer Schalenkonstruktionsweise oder einem Stahlrahmen mit daran angebrachten Bauteilen produziert werden. Die Variante "neue Fahrzeugkonzepte" geht von der Einführung neuer Fahrzeugkonzepte aus, die eine grundlegend andere Produktionsweise beinhalten. Ein Beispiel dafür ist die Modulbauweise, welche die Zahl der Bauteile im Vergleich zu heute drastisch reduziert. Neue Fahrzeugkonzepte beschränken sich auch nicht nur auf die Gewichtsreduktion, sondern beinhalten neue Antriebsmodelle oder neue Fahrzeugformen.

Das heute bestehende technische Potenzial der faserverstärkten Kunststoffe bei Grossserien wird, auf Basis der serienmässig produzierbaren Bauteile, auf 18 % des Gesamtgewichts geschätzt, was im Vergleich zum heutigen Treibstoffverbrauch Einsparungen von rund 6 – 10 % bewirken würde. In Zukunft könnte der Gewichtsanteil der faserverstärkten Kunststoffe im Auto mit konventioneller Bauweise auf ca. 20 – 25 % erhöht werden und damit eine Verbrauchsreduktion von 9 – 14 % erzielt werden. Werden die Resultate der Forschungsprojekte als Grundlage genommen, so können mit dem Einsatz neuer Fahrzeugkonzepte Gewichtsreduktionen von bis zu 50 % erzielt werden, was den Treibstoffverbrauch um 25 – 40 % reduziert.

Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

Die Durchsetzung des Kunststoffleichtbaus hängt neben technischen und wirtschaftlichen Faktoren auch von der Entwicklung der Marktstrukturen ab, die gekennzeichnet ist durch die Verlagerung der Produktion ganzer Bauteile und Module von den Autoproduzenten zu den Zulieferern. Der Fahrzeugmarkt ist hoch kompetitiv. Wenn sich die Autoproduzenten durch das Angebot von energieeffizienteren Fahrzeugen einen Marktvorteil erhoffen, werden sie diese Chance ergreifen. Für die Schweizer Zulieferindustrie besteht dabei die Herausforderung, dass sie ihre innovativen Technologien bei den Stammproduzenten gegen konkurrenzierende Lösungen erfolgreich einbringen können, was nur dann eine Chance hat, wenn auf der Ebene des Produktnutzens, d.h. neuer Möglichkeiten durch den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe, gleichzeitig die Integration in die Serienfertigung gelöst oder möglichst noch verbessert wird. Dabei haben in der Automobilindustrie Verfahren und Materialien nur dann eine Chance, in Grossserien eingesetzt zu werden, wenn sie dem intensiven Kostenwettbewerb standhalten. Folgende Aspekte wirken hemmend auf den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe:

- Die Umstellung von Produktionsprozessen ist teuer, da die Investitionen für Produktionsstrassen sehr hoch und die Amortisationszeiten der Anlagen lang sind. Die Akzeptanz der Autoindustrie für neue Produktionsweisen ist stark abhängig von den Möglichkeiten, diese in die bestehenden Produktionsprozesse zu integrieren.
- Es existieren technische Probleme, die gelöst werden müssen, um eine Serienproduktion für den Massenmarkt zu generieren. Die Verfahren für strukturtragende Elemente sind zuwenig automatisiert und weisen zu lange Taktzeiten oder lange Vor- und Nachbereitungszeiten auf.
- Die Beherrschung der Produktionsprozesse ist heute teilweise ungenügend und die Systemintegration muss verbessert werden. Dadurch können Ausschüsse und Produktionsabfälle minimiert werden.
- Soll der Kunststoffanteil deutlich erhöht werden, so müssen wirtschaftliche und effiziente Recyclingprozesse entwickelt werden. Andernfalls kann die geforderte Recyclingquote der EU von 85 % resp. 95 % ab 2015 nicht eingehalten werden.

Zahlreiche Aspekte sprechen jedoch für den Einsatz faserverstärkte Kunststoffe im Automobilleichtbau. Neben der deutlichen Gewichtsreduktion gehören dazu folgende Punkte:

- Die Kunststoffe verfügen über grosse Designfreiheit, was die Herstellung komplexer Teile mit engen Radien ermöglicht.
- Es können funktionsintegrierte Module produziert und mehrere Arbeitsschritte im gleichen Arbeitsgang erledigt werden. Dadurch verkürzt sich die Produktionszeit.
- Die Modulbauweise ermöglicht eine kostengünstige Flexibilisierung des Produktionsprozesses. Dies kommt dem heutigen Trend zur Individualisierung der Automodelle entgegen.
- Der Lackierprozess ist ein zentraler und kostenintensiver Vorgang im Produktionsprozess. Die Kunststoffindustrie kann durch neue Lackiersysteme zu Kosteneinsparungen beitragen.
- Crashtests haben gezeigt, dass faserverstärkte Kunststoffe den heutigen Sicherheitsanforderungen entsprechen.

Die vorliegende Untersuchung zeigt deutlich, dass das Potenzial des Kunststoffleichtbaus im Automobilbau sehr gross ist und bedeutende Treibstoffeinsparungen erzielt werden können. Die Entwicklung des faserverstärkten Kunststoffeinsatzes in den letzten Jahren verlief positiv. Es sind noch einige technische Schwierigkeiten zu bewältigen, um die Serienproduktion für den Massenmarkt im grossen Stil zu ermöglichen. Die Forschung zur Verbesserung der Verfahren und Entwicklung neuer Anwendungen läuft jedoch intensiv und sowohl die Kunststoffindustrie als auch die Autoproduzenten wenden grosse Summen dafür auf. Im Zentrum der Aktivitäten steht die Perfektionierung der Verfahren für die wettbewerbsfähige Serienproduktion im Massenmarkt. Wenn dies gelingt, kann sich der Leichtbau auf breiter Ebene durchsetzen.

Konsequenzen für die Energiepolitik

Allgemeine Erkenntnisse und Konsequenzen für die Energiepolitik

Die Erweiterung der untersuchten Aspekte im Technologie-Monitoring II trägt der Tatsache Rechnung, dass für den breiten Technologieeinsatz neben den technisch-wirtschaftlichen Charakteristika einer Technologie die Vermarktung bis zum Endabnehmer eine zentrale Rolle spielt. Deshalb sind Kenntnisse zu innovationstreibenden bzw. -hemmenden Faktoren sehr wichtig. Bei einer erweiterten Perspektive des Monitorings verwischen sich die Grenzen zwischen Wirtschaftspolitik, Innovations-/Technologiepolitik und Energiepolitik, und es stellen sich Zuordnungs- bzw. Abgrenzungsfragen. Aufgabe des Technologie-Monitorings ist es, in den erwähnten Fällen, die innovationstreibenden oder -hemmenden Faktoren zu identifizieren und zu verfolgen sowie den Bezug zu den energiepolitischen Zielen und Wirkungen herzustellen. Diese Informationen dienen der Industrie-, der Forschungs- wie auch der Energiepolitik.

Technologiemonitoring ist ein notwendiges Instrument einer effektivitätsorientierten Energieforschung und Energiepolitik. Effektivitätsorientierte Energieforschung definiert in den verschiedenen Forschungsbereichen (möglichst quantitative) Ziele, deren Erreichungsgrad mit Technologiemonitoring überprüft wird, wobei gleichzeitig wertvolle Informationen zur Einschätzung der Effektivität sowie der Hemmnisse und Probleme der Forschungsförderung erfasst werden. Das Monitoring bildet damit eine Grundlage für das Controlling der eingesetzten Mittel für Energieforschung und Marktförderung.

Technologie-Monitoring liefert Ansatzpunkte für energiepolitische Massnahmen, hilft bei der Klärung konkurrierender Entwicklungspfade und reduziert das Risiko einer Fehlallokation von Forschungsmitteln. Besonders geeignet ist das Technologie-Monitoring für einzelne Anwendungen einer Technologie, (zum Beispiel Wärmepumpen in Einfamilienhäusern oder drehzahlvariable Antriebe für Motoren) welche die Periode der Basisinnovation durchlaufen haben und im Markt von der Einführungs- zur Wachstumsphase gelangen. Bei diesen Technologien kann mit Hilfe von Lernkurven, die auf der vergangenen Entwicklung beruhen, eine Prognose für die wirtschaftliche Weiterentwicklung sowie eine Abschätzung der sich ergebenden Markteintrittskosten gemacht werden (Differenz zwischen der jährlichen Entwicklung der effektiven Kosten der Technologie und den Kosten welche der Markt zu zahlen bereit ist (Kostenniveau der konventionellen Alternativen), multipliziert mit der jährlichen Absatzmenge gemäss Lernkurve).

Da die Lernkurven auch Aussagen über die notwendigen Stückzahlen bis zur Erreichung der Marktkosten umfassen, lässt sich auch abschätzen, ob eine Technologie in einer bestimmten Anwendung allein mit Hilfe des Schweizer Marktes marktwirtschaftlich gemacht werden kann oder ob nur in einem grösseren Umfeld solche Stückzahlen überhaupt erreichbar sind. Daraus ergeben sich wichtige Hinweise für die zukünftige Förderpolitik. Gefördert werden sollten nur Technologien, für die eine klare, tragfähige Strategie zur Überwindung der Markteintrittskosten vorhanden und die wesentlichen Marktpartner zu deren Umsetzung ihren Teil zu leisten bereit sind.

Wir schlagen vor, das Technologie-Monitoring als periodisch wahrgenommene Aufgabe zu etablieren. Dabei sollte sich das Monitoring auf Technologien mit klar definierten Anwendungen beschränken, welche gleichzeitig für die Energiepolitik von hoher Bedeutung sind, weil sie grosse finanzielle Mittel binden oder binden sollen.

Das so verstandene Technologie-Monitoring sollte folgende Teile umfassen:

- Erheben und Mitpublizieren der wesentlichen wirtschaftlichen Parameter der bereits untersuchten Technologien, mit bescheidenem Zusatzaufwand, jährlich im Rahmen der Energiestatistik (erneuerbare Energien, WKK) .
- Noch nicht untersuchte für die schweizerische Energiepolitik aber bedeutungsvolle Technologien einem Monitoring unterziehen.

- Alle etwa 5 Jahre die Entwicklung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der bisher untersuchten Technologien aufdatieren und die Veränderungen im Bereich der Hemmnisse und Erfolgsfaktoren festhalten.
- Das Hauptaugenmerk sollte auf Technologien gerichtet werden, die von der Innovations- und Entwicklungsperiode in die Wachstumsphase gelangen, mit zunehmender Marktdynamik und bedeutsamen Lern-, Skalen-, Verbund- und Netzwerkeffekten. Technologien in der Sättigungsphase sind solange relativ uninteressant als sie sich nicht infolge neuer Innovationen wieder Dynamik gewinnen (die Registrierung solche Innovationen wären jedoch eine Aufgabe des Technologiemonitorings).

Mit Ausnahme der Membrantechnik und der Leichtbautechnik empfehlen wir, alle untersuchten Technologien vom Technologie-Monitoring I und II² weiterzuverfolgen.

Technologieübergreifende Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

Eine wichtige Aufgabe des Technologie-Monitorings besteht darin, Hemmnisse zu identifizieren, ihre Entwicklung zu verfolgen und damit Ansatzpunkte für die Energie- und Forschungspolitik aufzuzeigen. Die Untersuchung zeigte, dass folgende Faktoren für mehrere Technologien die Durchsetzung am Markt erschweren:

- **Sunk cost-Problematik:** Grosse Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsinfrastrukturen mit hohen Investitionskosten, die amortisiert werden müssen, erschweren die Anpassung von Produkten, Produktionsprozessen und Betriebsstrukturen.
- **Transaktionskosten:** Informationsbeschaffung, Evaluation, Planung sowie Installations- und Einführungskosten können gerade bei neuen, innovativen Technologien einen bedeutenden Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Transaktionskosten mindern die Vorteile innovativer Lösungen und wirken sich negativ auf ihre Wirtschaftlichkeit aus.
- **Know-how-Defizite und geringe Markttransparenz:** Verstärken die Neigung zu herkömmlichen Technologien, Produktionsverfahren und Produkten. Forschungs- und Interessennetzwerke können wesentlich zur Know-how-Diffusion beitragen.
- **Ungünstige Marktstrukturen:** Zu viele Klein- oder Nischenanbieter oder zu wenig Wettbewerb können die Realisierung von Skalen- und Verbundeffekten verhindern und dadurch die Technologieentwicklung verzögern.

Erkenntnisse der Untersuchung für die einzelnen Technologien

Zu den einzelnen Technologien des Technologie-Monitoring II ergeben sich folgende Konsequenzen für die Energiepolitik:

- **Drehzahlvariable Elektromotoren:** Drehzahlvariable Antriebe sind zwar in vielen Anwendungsbereichen in der Industrie wirtschaftlich, die Umsetzung scheitert jedoch oft an organisatorischen Hemmnissen. U.a. führen die knappen Personalressourcen zu einer Überbewertung der Transaktionskosten. Diese organisatorischen Hemmnisse müssen auf entsprechender Ebene angegangen werden. Die Zielvereinbarungen im Rahmen des CO₂-Gesetzes zeigen hier einen gangbaren Weg. Leider muss in Bezug auf drehzahlvariable Antriebe festgestellt werden, dass die Elektrizität in den CO₂-Vereinbarungen nicht integriert ist. Ohne entsprechende gesetzliche Grundlagen erscheinen signifikante Verbesserungen der Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben nur schwer realisierbar. Folgende Aktivitäten können die Verbreitung der Technologie unterstützen:
 - Die bestehenden Aktivitäten im Forschungsprogramm Elektrizität, welche auf eine Reduktion der Transaktionskosten abzielen, können die Umsetzung von Vereinbarungen mit Industrieunternehmen wesentlich verbessern.

² motorische Wärmekraftkopplung; Brennstoffzellenheizgeräte, Luft-Wasserwärmepumpen für Einfamilienhäuser, Hochleistungswärmedämmung, drehzahlvariable elektrische Motoren, Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohngebäude

- Zu prüfen ist, ob für den Bau von Maschinen und Anlagen Richtlinien und eventuell ein Gütesiegel betreffend Energieeffizienz geschaffen und etabliert werden können. Diese sollten nicht nur drehzahlvariable Antriebe, sondern auch weitere Massnahmen wie z.B. den Einsatz von hocheffiziente Elektromotoren umfassen.
- Werden drehzahlvariable Antriebe im Rahmen von Informations-, Ausbildungs- oder Beratungsangeboten gefördert, sind diese als Bestandteil einer weiter zunehmenden Automatisierung darzustellen. Der Zusatznutzen (höhere betriebliche Flexibilität, evtl. längere Wartungsintervalle) ist adäquat zu kommunizieren.
- **Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Gebäude:** Aufgrund des Verlaufs der quantitativen Entwicklung und der Aussagen von Branchenvertretern erscheint es offensichtlich, dass die Verbreitung der Komfortlüftung in der Schweiz zu wesentlichen Teilen auf das Label Minergie zurückzuführen ist. Das Beispiel Komfortlüftung zeigt eindrücklich, wie die Markteinführung einer neuen Technologie im Rahmen eines Standards, der primär über die gesteigerte (Wohn-) Qualität definiert wird, gelingen kann. Die Energieeffizienz kommt im Fahrwasser des Zusatznutzens (gesteigerter Komfort) deutlich schneller voran, als dies alleine möglich gewesen wäre. Werden die Zukunftschancen von neuen Technologien beurteilt, kann eine einseitige energietechnische Beurteilung die Resultate nicht korrekt wiedergeben. Im Komfortlüftungsbereich fehlen bisher koordinierte Branchenaktivitäten weitgehend. Für die öffentliche Hand bietet sich die Möglichkeit, durch die Unterstützung des Vereins MINERGIE und/oder das Initialisieren einer gemeinsamen Plattform die Aktivitäten der MarktteilnehmerInnen wesentlich zu verstärken. Im Rahmen des Energie-Clusters ist dies - zumindest was technische Fragestellungen betrifft - bereits gelungen. In Zukunft können die Chancen der Komfortlüftungen durch gemeinsames Marketing und Qualitätssicherung - eventuell innerhalb des Labels Minergie - wesentlich verbessert werden.
- **Membrantechnik:** Aufgrund der beschränkten energetischen Relevanz für die Schweiz und dem bis heute kleinen Inland- und Exportmarkt macht ein zukünftiges Monitoring sowie eine Förderung und Unterstützung der Weiterentwicklung dieses Technologiefelds durch die öffentliche Hand aus energiepolitischer Sicht wenig Sinn.
- **Leichtbau im Automobilbau:** Das Potenzial dieses Technologiefelds zur Gewichtsreduktion von Fahrzeugen und damit zur Reduktion der CO₂-Emissionen ist sehr gross. Die umfassende Durchsetzung der Technologie in der Grossserienproduktion, eine zentrale Forderung zur Realisierung des bedeutenden Energiesparpotenzials, scheint aber heute noch nicht gesichert. Die Schweiz kann einen industriepolitisch bedeutenden Beitrag über die hier angesiedelten Zulieferfirmen erbringen. Die energiepolitische Motivation spielt hier nur eine Nebenrolle. Es handelt sich in diesem Sinne wohl eher um eine Technologieförderung und ein Monitoring aus energiepolitischen Überlegungen ist kaum sinnvoll. Die öffentliche Hand könnte die Durchsetzung der Technologie vor allem mit den folgenden Aktivitäten fördern:
 - Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten unter massgeblicher Beteiligung der schweizerischen Zulieferindustrie, mit Fokus auf den wettbewerbsfähigen, automatisierten Einsatz faserverstärkter Kunststoffe in Grossserien und in Grossserienmodulen.
 - Die Energieetikette für Personenwagen bezieht das Fahrzeuggewicht in die Formel zur Berechnung der Effizienz eines Fahrzeugs ein. Daher wird ein gewichtsreduziertes Automodell, mit reduziertem Treibstoffverbrauch nicht als effizienter beurteilt. Es sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, wie die Etiketle Gewichtsreduktionen honorieren kann.
 - Der Bund kann seine Vorbildfunktion wahrnehmen, indem er bei der Beschaffung bundeseigener Fahrzeuge darauf achtet, dass möglichst leichte und energieeffiziente Fahrzeuge ausgewählt werden.
 - Mit Informations- und Kommunikationsaktivitäten kann der Vorteil eines geringeren Gewichts den Konsumentinnen und Konsumenten bekannt gemacht werden.

Résumé

Exposé de la situation

Les expériences recueillies ces dernières décennies montrent qu'en raison de la longévité des investissements, les structures de production et de consommation d'énergie évoluent très lentement et que le développement de nouvelles technologies énergétiques prend souvent une à plusieurs dizaines d'années. Il est donc d'autant plus nécessaire que la politique et la recherche énergétiques soient informées à temps du développement à long terme, afin d'organiser la préparation et l'orientation stratégiques de la politique et l'affectation des fonds de recherche de manière durable. Pour ce faire, il est indispensable de livrer des informations sur les perspectives de développement des technologies énergétiques dans les différents secteurs. La rentabilité et les éventuels avantages complémentaires directs (réduction des émissions de CO₂, des nuisances sonores, des gaz d'échappement, etc.) jouent un rôle essentiel dans le succès commercial des nouvelles technologies. Reste que l'évaluation du développement technologique d'un point de vue économique et sous l'angle d'autres atouts complémentaires ou obstacles déterminants pour le succès commercial repose en général sur des bases insuffisantes, voire inexistantes. On ne sait par exemple pas encore quelles technologies se sont développées, ni à quel prix, dans le cadre des programmes Energie 2000 et SuisseEnergie. On dispose encore de moins d'informations sur le développement futur des technologies à haut rendement énergétique et des énergies renouvelables.

L'étude sur la veille technologique I («Technologie-Monitoring I», Eicher+Pauli, **eco** n c e p t, 2 002) constitue un premier pas vers une veille technologique généralisée et systématique. Une méthode uniforme a été mise au point pour évaluer le développement des technologies du point de vue économique; celle-ci a permis d'analyser le développement technologique et économique de quatre domaines³ au cours des dix dernières années et d'estimer les développements à prévoir d'ici 2010 environ dans ces quatre domaines.

La poursuite de la veille technologique dans le cadre de cette étude étend l'analyse du développement économique à d'autres technologies déterminantes pour le futur approvisionnement en énergie. Les facteurs d'influence décisifs pour leur évolution économique sont analysés selon les possibilités. Il s'agit notamment d'influences spécifiques au marché telles que la structure du marché et des producteurs, la situation de concurrence entre les fournisseurs, la transparence du marché, etc.. Comme les décisions de politique et d'économie énergétiques sont fondées sur un horizon d'analyse très vaste, l'horizon temporel des analyses technologiques a été prolongé de 2010 à 2030 (au lieu de 2020 comme auparavant). Les conséquences des développements technologiques sur la politique énergétique sont examinées en détail.

Le choix des technologies ou secteurs examinés dans le cadre de la veille technologique II repose sur différents critères: développement antérieur, potentiel de débouchés ou d'efficacité, marge de manœuvre pour la promotion des technologies. De plus, le projet exige si possible la présentation d'un exemple de technologie dans le domaine de la mobilité et dans celui de l'industrie/des grands consommateurs. Font l'objet d'une étude: les moteurs électriques à vitesse de rotation variable, les systèmes d'aération pour maisons à faible consommation d'énergie, la technologie des membranes et la technologie des matières plastiques pour la construction légère dans le secteur automobile.

³ couplage chaleur-force avec moteur, appareils de chauffage à pile combustible; pompes à chaleur air-eau pour maisons individuelles et isolation thermique de haute performance

Moteurs électriques à vitesse de rotation variable

En Suisse, les moteurs électriques représentent environ la moitié de la consommation d'électricité. Plus d'un tiers permettent d'actionner des appareils (aération, pompes, compresseurs). Dans ce contexte, une vitesse de rotation variable permettrait une sensible amélioration du rendement énergétique (performance: débit à la puissance trois). Le potentiel (technique) d'économie d'une régulation de la vitesse de rotation est estimé à quelque 4 % de la consommation d'électricité globale (environ 2 000 GWh).

Dans certains domaines (comme celui des pompes à chaleur), les propulsions à vitesse de rotation variable se sont imposées comme solution standard. Jusqu'ici cependant, leur important potentiel d'optimisation du rendement énergétique n'a été exploité que de manière très incomplète.

L'évolution économique des propulsions à vitesse de rotation variable est analysée à l'image d'une pompe dans une exploitation industrielle produisant une puissance nominale de 2,2, 11 et 55 kW. La variante de référence est celle d'un moteur à vitesse de rotation constante dont le débit-volume est régulé au moyen d'un corps d'étranglement mécanique (soupape ou robinet d'étranglement).

Evolution technologique

Les propulsions à vitesse de rotation variable ont connu une évolution très dynamique depuis le début des années nonante: le prix des convertisseurs de fréquence a presque diminué de moitié, notamment grâce à la forte baisse des coûts des composants électroniques (semi-conducteurs). Par ailleurs, le développement de commandes standard sur la base de circuits intégrés (puces) et les progrès réalisés dans l'automatisation de la production ont également joué un rôle indéniable.

Mue par son accès à des domaines d'application toujours plus nombreux, l'électronique de puissance devrait bénéficier d'un développement continu (notamment intégration de systèmes et densité de puissance croissants, résistance accrue à la température). Les propulsions à vitesse de rotation variable en profiteront elles aussi. À supposer que le volume du marché bénéficie d'un facteur de croissance entre 1,5 et 2,5 et que les facteurs de régression des coûts se situent entre 0,85 et 0,9, le coût des convertisseurs devrait diminuer de 25 à 45 % d'ici 2030.

En raison du recul des prix des convertisseurs de fréquence, le seuil de rentabilité des propulsions à vitesse de rotation variable s'est progressivement déplacé en direction des propulsions aux heures de service moins nombreuses ou à la charge accrue. Ce qui signifie que le potentiel économique s'est nettement renforcé.

Importance et évolution des coûts de transaction

Depuis le début des années nonante, les propulsions à vitesse de rotation variable sont passées du statut de technologie novatrice encore peu répandue en raison de quelques «défauts initiaux», à celui de solution éprouvée et bien implantée. Aujourd'hui, il est facile de s'informer sur ses avantages et ses inconvénients, et il existe des outils informatiques pour la planification et l'approvisionnement. Les coûts de formation et d'instruction ont sensiblement diminué, ce qui a fait chuter également les coûts de transaction du client final ou du planificateur qui travaille pour lui.

Il semble aujourd'hui évident que les coûts de transaction de l'industrie soient fortement surévalués en raison de conditions cadre défavorables. Les petites entreprises ne disposent souvent pas du savoir-faire nécessaire pour repérer les potentiels d'économie. Sans compter que les services de conseillers externes qui permettraient d'identifier les potentiels d'efficacité sont jugés trop onéreux. Ces dernières années, de nombreuses grandes entreprises ont fortement diminué les effectifs travaillant dans la planification et l'exploitation des installations techniques, des fonctions qui souvent sont confiées à des sociétés externes. Celles-ci n'ont pas accès à la consommation d'électricité, autrement dit aux

coûts enregistrés en général pour l'ensemble de l'entreprise, c'est-à-dire sans ventilation entre les différents secteurs d'activités.

Cela dit, on peut s'attendre à ce que l'importance des coûts de transaction continue de régresser à l'avenir. Car si l'électronique de puissance en particulier continue à gagner du terrain, les coûts d'initialisation précédant le premier achat d'une propulsion à vitesse de rotation variable diminueront sensiblement. Une hypothèse réaliste notamment si ce type de propulsion est encore davantage intégré dans une automatisation toujours croissante, et donc moins remis en question.

Obstacles et facteurs de réussite décisifs

Plusieurs facteurs représentent des obstacles déterminants pour l'industrie.

- **Evaluation de la rentabilité:**
Dans l'industrie, la rentabilité des mesures d'efficacité de moindre envergure est souvent mesurée avec une durée de remboursement (pay-back) maximale de 2 à 5 ans. En conséquence, ce critère permet d'apprécier le risque d'investissement plutôt que la rentabilité.
- **Surévaluation des coûts de transaction:**
Les conditions cadres sont défavorables dans de nombreuses entreprises industrielles, ce qui encourage la surévaluation des coûts de transaction.

Si elles sont encore plus intégrées dans une automatisation en constante progression, les propulsions à vitesse de rotation variable bénéficieront d'une chance non négligeable. En Suisse, lieu de production au degré d'automatisation élevé, cette chance aurait une importance toute particulière. Outre une amélioration du rendement énergétique, la vitesse de rotation variable apporte aux pompes et ventilateurs encore d'autres avantages. Il est à prévoir que cet avantage complémentaire prenne une importance croissante.

Reste qu'une évolution réussie dans le monde industriel suppose l'élimination des principaux obstacles organisationnels (évaluation de la rentabilité au moyen de la durée de remboursement, structures internes à l'exploitation et faible prise de conscience des aspects énergétiques).

Systemes d'aération pour maisons à faible consommation d'énergie

Dans les bâtiments équipés d'une isolation thermique supérieure à la moyenne, les pertes de chaleur dues à l'aération se situent dans le même ordre de grandeur que les pertes par transmission. En conséquence, le changement d'air contrôlé et la récupération de la chaleur extraite de l'air évacué sont déterminants pour diminuer encore la consommation d'énergie.

En Suisse, les immeubles locatifs à faible consommation d'énergie sont le plus souvent équipés de systèmes d'aération douce qui récupèrent l'air soufflé et évacué de manière centralisée et qui permettent de récupérer la chaleur. Comparés aux installations d'évacuation d'air, ils offrent un confort accru (en plus de la récupération de chaleur).

À l'heure actuelle, plus de 10 % des nouvelles surfaces construites déjà sont des logements à faible consommation d'énergie dotés d'un système d'aération. Dans le domaine des rénovations par contre, le pourcentage reste très faible, même en ne prenant que les assainissements globaux pour valeur de référence.

L'évolution des systèmes d'aération dans les immeubles à faible consommation d'énergie est analysée à l'image d'une aération douce installée dans un immeuble locatif abritant huit appartements (rénovation et nouvelle construction). Chaque appartement dispose de sa propre installation d'aération avec arrivée et évacuation d'air autonomes et récupération de chaleur.

Développement technologique

Bien que l'aération douce soit utilisée en Suisse depuis plus de dix ans, le prix des installations ne varie que depuis quelques années. Le fait que la pression sur les prix soit longtemps restée modeste a joué un rôle essentiel dans cette inertie. En effet, les références et l'évaluation de la qualité du produit comptent bien plus que le prix. De plus, la plupart des producteurs étoffent encore leur offre ou sont en train de la mettre au point, tant pour l'assortiment de produits que pour les canaux de distribution. Enfin, l'équipement des appareils n'a cessé de s'améliorer.

Cette pression sur les prix va sans doute s'intensifier à l'avenir et influencer le prix de vente des appareils d'aération. Et le renforcement croissant de l'automatisation de la production, une distribution plus efficace (chiffre d'affaires accru par producteur) et la diminution des dépenses consacrées au marketing, à l'acquisition/la formation des installateurs offrent eux aussi un important potentiel de réduction. À supposer que l'équipement des appareils n'évolue plus beaucoup, nous pensons que le coût des installations d'aération baissera de 25 à 50% d'ici 2020 grâce aux économies réalisées dans la production et la distribution, et qu'il n'évoluera plus guère par la suite.

Malgré des systèmes d'aération plus simples à monter et légèrement plus avantageux, les frais d'installation n'ont que très peu diminué jusqu'ici. Raisons probables de cette évolution: sous-estimation initiale des charges nécessaires et exigences accrues des maîtres d'ouvrage.

Une baisse du prix des composants et l'augmentation du volume du marché notamment pourraient faire reculer les frais d'installation. Si les producteurs multiplient les offres de systèmes spéciaux de répartition d'air, comme ils le font pour les nouvelles constructions, les coûts devraient encore diminuer dans le domaine des assainissements. Dans l'ensemble, nous prévoyons une baisse des frais d'installation de 20 à 30 % d'ici 2030.

Comme les échangeurs de chaleur à contre-courant remplacent progressivement les échangeurs de chaleur à courants croisés, le coefficient de température s'est amélioré de 0,55 à 0,80 en moyenne depuis le début des années nonante. D'ici 2010, les échangeurs de chaleur à courants croisés devraient avoir pratiquement disparu et le coefficient s'être établi à 0,85 en moyenne. À plus long terme, des échangeurs plus sophistiqués devraient permettre d'atteindre un coefficient de température de 0,9.

Importance et évolution de l'avantage complémentaire

Malgré les progrès technologiques, les coûts énergétiques économisés ne suffiront pas à garantir la rentabilité des systèmes d'aération douce à long terme; en effet, le coût de production de la chaleur évitée reste de loin supérieur aux coûts variables de la création de chaleur (coût du mazout de chauffage). Et même si cet équilibre était atteint, la percée sur le marché resterait encore longtemps entravée par le problème opposant le locataire et le propriétaire.

Pour le propriétaire, il est important que les coûts d'investissement et de maintenance de l'installation d'aération soient compensés par la disposition des locataires à payer davantage. Selon une étude consacrée aux avantages complémentaires directs et indirects des immeubles locatifs à consommation énergétique optimisée ('Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohnbauten', **concept**, Cepe, 2005), les locataires jugent les systèmes de renouvellement d'air favorables, pour diverses raisons: meilleure qualité de l'air, retour dans des locaux fraîchement aérés après une absence, diminution des problèmes d'humidité, de bruit extérieur et d'agents nocifs, renforcement de la sécurité grâce aux fenêtres fermées. Les locataires sont plus enclins à accepter une hausse du loyer pour les constructions nouvelles que pour les bâtiments anciens. Dans les maisons plus anciennes équipées de fenêtres qui n'ont pas été rénovées, ils privilégient l'installation de fenêtres neuves plutôt que celle d'un système d'aération douce. Par ailleurs, la disposition à verser un loyer plus élevé semble dépendre du revenu des personnes interrogées.

Les locataires sont nettement plus disposés à assumer les coûts d'une aération, en particulier dans les maisons neuves. Si la disposition à payer semble inférieure en cas de rénovations qu'en cas de cons-

tructions nouvelles, elle n'en reste pas moins supérieure aux dépenses. Même en ayant conscience que cette disposition à payer est difficilement quantifiable, force est de constater que le coût d'une aération douce peut être compensé par une hausse du loyer et que le logement y gagne en attrait. À condition cependant que le propriétaire parvienne à convaincre le locataire potentiel des avantages d'une aération douce.

Dans le domaine des rénovations, il faut relever que l'on privilégie l'installation de fenêtres au rendement énergétique amélioré plutôt qu'une aération douce. Cependant, si la question de l'aération n'est pas résolue dans le cadre de la rénovation précisément, les investisseurs courent le risque de voir surgir des problèmes d'humidité après le montage de fenêtres plus performantes. Comme l'installation d'une aération douce suppose un investissement considérable et d'importants travaux dans l'appartement, il est probable qu'elle soit d'abord intégrée dans des projets de rénovation totale, où une hausse de loyer est acceptée en faveur d'une stratégie génératrice de plus-values.

À moyen terme, il est probable que l'avantage complémentaire soit renforcé par la définition de normes de qualité et mieux perçue grâce à un degré de notoriété accru. Il reste cependant très difficile d'établir dans quelle mesure et à quel rythme les points susmentionnés augmenteront la disposition des locataires à payer un loyer plus élevé pour l'installation d'une aération douce dans leur appartement.

Obstacles et facteurs de réussite décisifs

Le succès commercial des systèmes d'aération dans les bâtiments à faible consommation d'énergie dépendra également à plus long terme de l'avantage complémentaire (meilleure qualité de l'air, etc.). Les progrès techniques réalisés ne suffiront pas à ramener les coûts de production de la chaleur économisée (calculés d'un point de vue purement énergétique) au niveau des coûts de préparation de chaleur qui n'ont pas dû être générés, pas même si les coûts énergétiques prennent l'ascenseur ou que les coûts externes sont pris en compte.

En conséquence, les activités de prospection du marché doivent accorder un rôle essentiel à l'avantage complémentaire, et donc à la disposition effective des locataires à assumer les dépenses d'un système d'aération contrôlée qui en résultent. La notoriété des systèmes d'aération douce auprès des propriétaires, investisseurs et architectes notamment doit être améliorée. Il s'agit de communiquer qu'une isolation thermique supérieure à la moyenne et une aération douce renforcent l'attrait du logement, puisque les locataires sont prêts à assumer les dépenses de telles installations surtout pour les projets de construction et de rénovation répondant à des exigences élevées. Du côté des locataires, l'aération douce doit s'imposer comme une garantie d'excellente qualité de l'air à l'intérieur de l'appartement et une amélioration du confort d'habitation afin de faire naître les exigences qualitatives voulues. Dans un contexte de ventes en progression et de pression croissante sur les prix, l'assurance de la qualité doit faire l'objet d'une attention toute particulière. Car une installation mal conçue générant par exemple des bruits gênants ou de mauvaises odeurs détruit tout le bénéfice d'un avantage complémentaire.

Technologie des membranes

La technologie des membranes n'est pas un procédé unique, mais recouvre un vaste secteur technologique offrant de multiples possibilités d'application; dans le cadre de la veille technologique, elle est synonyme de nombreux procédés nouveaux offrant un riche potentiel d'économie d'énergie. Les nombreuses possibilités d'application de cette technologie dans les domaines les plus divers bénéficiant d'une forte croissance (p.ex. biotechnologie) prouvent que le potentiel commercial et de développement est grand. Cette étude porte sur les applications déterminantes du point de vue énergétique, qui remplacent les procédés traditionnels plutôt gourmands. Parmi les plus courants, citons les applications de haute pression (ultrafiltration, microfiltration et nanofiltration, ainsi qu'osmose in-

verse), la pervaporation et la perméation de vapeur. Les membranes permettent de séparer les mélanges de tous genres.

Développement technologique des procédés

Les procédés mus par pression sont utilisés dans le traitement de l'eau depuis plus de trente ans. La pervaporation / perméation de vapeur a fait l'objet de tests sur des installations pilotes depuis le milieu des années quatre-vingts environ. Aujourd'hui, les premières installations commerciales appliquant ce procédé sont âgées de dix ans. Les autres procédés de séparation membranaire font eux aussi l'objet de recherches depuis longtemps. La fréquence de leur utilisation commerciale varie pour chacun d'eux. Dans certains cas, il s'avère difficile de reprendre une technique des membranes qui a fait ses preuves dans un type d'application pour une nouvelle utilisation. Des difficultés d'ordre technique peuvent surgir, comme par exemple la durée de vie plus courte des membranes qui entrent en contact avec certaines substances. Il existe des installations standard pour les applications d'envergure dans les domaines de la chimie des matières simples, de la pétrochimie et du dessalement de l'eau de mer. Ces applications n'existent pas en Suisse, qui a plutôt recours à des installations plus modestes dans l'industrie chimique, pharmaceutique et alimentaire.

Situation du marché et prix appliqués en Suisse

Le prix des différentes membranes et des modules dépend surtout des quantités vendues. Pour faire baisser les coûts de production des membranes et des modules, il faut pouvoir les produire en grand nombre, chose envisageable uniquement pour les types de membranes vendues en grandes quantités. Pour les produits standard en revanche, comme les installations de dessalement de l'eau ou les grandes installations de la chimie des matières simples, qui travaillent toujours les mêmes substances, le prix des membranes a nettement reculé ces dernières années. En Suisse par contre, le volume de production reste limité et le niveau des prix relativement élevé en raison de la spécificité des membranes utilisées et de leur intégration dans des installations de taille modeste.

La majorité des membranes retravaillées en Suisse est importée d'Allemagne, de France et des Etats-Unis. À l'heure actuelle, les exportations de membranes sont insignifiantes pour l'économie helvétique; les modules membranaires et les équipements sont installés par des fournisseurs nationaux et étrangers. Le marché des exportations d'installations se concentre en premier lieu sur le traitement de l'eau.

Potentiel et évolution future

L'importance globale en matière d'énergie dépend du potentiel d'économie spécifique des différentes formes d'utilisation comme des possibilités d'application de la technologie dans l'économie. Ce potentiel commercial dépend à son tour de l'évolution technique des procédés et des nouveaux domaines d'application qui y sont liés. En raison de la diversité des domaines d'application et des procédés de référence etc., le potentiel d'économie d'énergie spécifique ne peut être quantifié de manière généralisée. Cependant, les exemples du rapport prouvent que le recours à des procédés de séparation thermique par membrane permet d'importantes économies spécifiques.

Les chances de cette technologie résident dans ses avantages techniques et écologiques. L'amélioration de l'efficacité des ressources et de la qualité des produits grâce à des procédés de séparation moins agressifs engendrent un potentiel élevé de protection de l'environnement, lequel permet, en partie de manière indirecte, de faire des économies d'énergie. Si la technologie des membranes est utilisée en lieu et place de procédés thermiques, la diminution de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ est décisive. La performance des installations à membrane dépend du type de processus utilisé, des substances traitées et de l'équipement en général. Il est donc difficile de standardiser les procédés et de faire une projection des économies spécifiques sur l'ensemble de l'industrie. À l'avenir, le recours à la technologie des membranes en Suisse devrait s'intensifier dans les domaines qui l'appliquent déjà en partie, à savoir l'industrie chimique et pharmaceutique, l'industrie alimentaire, le traitement et l'épuration des eaux usées. En comparaison de la consommation d'énergie globale, la technologie des membranes présente un potentiel d'économie plutôt limité à

l'échelle nationale. Parmi les secteurs se prêtant à l'utilisation de cette technologie, l'industrie chimique/pharmaceutique permettrait une économie annuelle estimée à 1-2 personnes-années. L'industrie alimentaire, avec un potentiel d'économie spécifique de plus de 30% pour les processus déterminants, représente elle aussi un domaine d'application important. Autres domaines d'application possibles: les industries textile, du papier, automobile et métallurgique.

Obstacles et facteurs de réussite

Pour ce qui concerne les économies d'énergie et la réduction des émissions de CO₂, le potentiel des technologies des membranes en Suisse est limité par différents aspects.

- Les quantités de mélanges traités en Suisse sont relativement faibles. Les économies d'énergie sont donc plutôt modestes par rapport à la consommation énergétique globale.
- Les processus spécialisés travaillant avec des mélanges variant fréquemment exigent des installations très flexibles. Les membranes sont sensibles à toute modification de la composition des mélanges.

Plusieurs arguments parlent en faveur de la technologie des membranes.

- Cette technologie offre une chance aux produits de niche aux besoins spécifiques et nécessitant des prestations de service délicates; ce type de produits ne met pas l'accent sur l'avantage énergétique, mais sur l'amélioration de la qualité et du processus ainsi que sur la diminution de la pollution.
- Les industries novatrices qui mettent au point des processus inédits réservent un terrain particulièrement favorable à la technologie des membranes. C'est le cas de la biotechnologie, où nombre de nouveaux développements ne remplacent pas de procédés gourmands en énergie. Voilà pourquoi ce domaine n'a pas été analysé, malgré son potentiel de développement et d'application important. Autre domaine dont l'étude n'a pas tenu compte: les piles combustibles, qui pourtant avaient déjà fait l'objet d'une analyse dans le cadre de la veille technologique I (Eicher et al. 2003).
- A l'échelle internationale, la technologie des membranes contribue beaucoup à diminuer les émissions de CO₂ et la pollution des grands processus industriels (chimie des matières simples, pétrochimie, traitement de l'eau et dessalement de l'eau de mer).

La présente étude en conclut que d'un point de vue énergétique, aujourd'hui et dans les années à venir, la technologie des membranes n'est pas de première importance pour la Suisse. D'un point de vue économique par contre, elle n'en devient que plus importante. La rapide succession des innovations et l'intensité des recherches permettront à la technologie des membranes de s'imposer davantage dans les domaines les plus divers, notamment en biotechnologie. Cette branche connaît un développement dynamique; il est aujourd'hui difficile d'évaluer quels secteurs de la vie elle influencera dans un avenir lointain. Il est possible que des procédés et applications totalement nouveaux contribueront directement ou indirectement à optimiser le rendement énergétique.

Industrie automobile: matières plastiques pour construction légère

La présente étude aborde les différentes possibilités de diminuer le poids des véhicules en utilisant des matières plastiques renforcées de fibres. Elle présente les matériaux et procédés existants, donne un aperçu des applications disponibles et les estimations d'experts quant à l'évolution future de ce secteur technologique.

Evolution technologique

En Europe, l'industrie automobile a depuis des années tendance à construire des véhicules toujours plus lourds. Les véhicules de classe moyenne deviennent toujours plus grands, l'équipement technique s'est sensiblement amélioré, les exigences en matière de confort sont toujours plus élevées, la sécurité et l'isolation acoustique renforcées.

Ces dernières années, différents projets de recherche et de développement ont été consacrés à l'utilisation de matières plastiques pour la construction de véhicules légers. Le recours à des matières renforcées de fibres pour des véhicules de nouvelle conception peut diminuer le poids d'une voiture de 30 à 50 %. La construction de plusieurs de ces véhicules a permis de démontrer la faisabilité sur le plan technique et matériel. Mais la question de la compétitivité des éléments de structure porteurs produits en grandes séries reste encore sans réponse et fait partie intégrante de la présente étude.

La part de matières plastiques entrant dans la composition des véhicules n'a cessé de s'accroître au cours des dernières années: dans une voiture neuve, elle s'élève aujourd'hui à quelque 16 %, dont seule une petite partie sont des matières plastiques renforcées de fibres permettant de diminuer le poids total. Aujourd'hui, elles sont utilisées pour la production en série de véhicules de classe modeste et moyenne, mais se limitent surtout à de petits éléments non porteurs. Dans la catégorie des véhicules de prix supérieur et produits en petite série en revanche, les matières plastiques renforcées sont utilisées plus souvent et servent en partie à construire des éléments porteurs de structure. Mais leur potentiel est aujourd'hui loin d'être épuisé, le poids n'étant qu'un critère de décision parmi d'autres dans la conception du design d'un nouveau modèle. L'industrie automobile accorde une grande importance à un «mélange de matériaux intelligent» alliant acier, aluminium, matières plastiques, magnésium et autres matériaux.

Situation du marché et des producteurs

Avec ses quelque 20 000 places de travail et un chiffre d'affaires de quelque cinq milliards de francs, l'industrie de sous-traitance automobile est un secteur important de l'économie suisse [www.ch-forschung.ch]. Producteurs et sous-traitants collaborent étroitement, échangent leurs idées et leur savoir-faire. Dans l'ensemble, les structures du marché de la construction automobile légère ayant recours aux matières plastiques sont intactes et très variées, la concurrence est intense, ce qui accentue la pression sur le développement et sur les prix.

Potentiel et future évolution

La part des matières plastiques dans la composition des automobiles à l'avenir est présentée pour deux évolutions possibles. La variante des «concepts conventionnels» part du principe que les modèles du futur seront toujours construits sous forme de coque ou de cadre en acier auquel viennent se greffer les différents éléments de construction. La variante des «nouveaux concepts» en revanche mise sur le lancement de nouveaux modèles réalisés selon un mode de production foncièrement différent, comme par exemple une construction modulaire qui permettrait de diminuer fortement le nombre des éléments nécessaires. Les nouveaux concepts ne se contentent pas de limiter le poids du véhicule, mais comportent de nouveaux modèles de propulsion ou formes de carrosserie.

Le potentiel technique actuel des matières plastiques renforcées de fibres dans les grandes séries est estimé à 18% du poids total (sur la base des éléments de construction pouvant être produits en série), ce qui devrait permettre des économies d'essence de quelque 6 à 10 % par rapport à la consommation actuelle. Les matières plastiques renforcées pourraient représenter à l'avenir 20 ou 25 % du poids des modèles de voitures conventionnels et donc réduire la consommation de 9 à 14 %. Si l'on se base sur les résultats des projets de recherche, le lancement de nouveaux modèles permettrait de diminuer le poids des voitures de 50 % au maximum, ce qui ferait reculer la consommation d'essence de 25 à 40 %.

Obstacles et facteurs de réussite

L'établissement de la construction légère ayant recours aux matières plastiques dépendra de facteurs techniques et économiques, mais aussi de l'évolution des structures du marché, qui se caractérise par le transfert, des producteurs d'automobiles aux sous-traitants, de la production d'éléments et de modules. Le marché de l'automobile est hautement compétitif. Si les producteurs estiment qu'une offre de véhicules à rendement énergétique plus efficace peut leur procurer un avantage sur le marché, ils ne manqueront pas de saisir leur chance. Pour l'industrie de sous-traitance suisse, le défi consiste à défendre ses technologies novatrices face aux solutions concurrentes; cette stratégie n'a de chances d'aboutir que si les avantages du produit, à savoir l'ouverture de nouvelles possibilités grâce à l'utilisation de matières plastiques renforcées, résolvent ou améliorent même simultanément l'intégration dans le processus de fabrication en série. Or, seuls les procédés et matériaux capables de résister à la forte concurrence sur les prix ont une chance d'être intégrés dans les grandes séries de production automobile. **Certains aspects freinent le recours aux matières plastiques renforcées de fibres.**

- Modifier les processus de production coûte cher, puisque les chaînes de production nécessitent des investissements très élevés, et les installations des périodes d'amortissement très longues. L'approbation de nouvelles méthodes de production dépend fortement des possibilités de les intégrer dans les processus existants.
- Il reste des problèmes d'ordre technique à résoudre avant de lancer une production de série pour le marché de masse. Les procédés pour les éléments porteurs de structure sont trop faiblement automatisés, leur temps de cycle est trop long, les travaux de préparation ou de post-traitement prennent beaucoup de temps.
- La maîtrise des processus de production est aujourd'hui en partie insuffisante et l'intégration des systèmes reste à améliorer. Les rebuts et déchets de production diminueraient en conséquence.
- Pour accroître sensiblement la part de matières plastiques, il faut mettre au point des processus de recyclage rentables et efficaces. Sans quoi le taux de recyclage de 85%, respectivement 95 % exigé par l'UE dès 2015 ne pourra être respecté.

Néanmoins, de multiples aspects parlent en faveur de l'utilisation de matières plastiques renforcées de fibres pour la construction de véhicules légers. Hormis une nette réduction du poids, d'autres critères entrent en ligne de compte.

- Les matières plastiques laissent une grande liberté dans la conception du design, d'où la possibilité de concevoir des éléments complexes.
- Un seul procédé permet la production de modules intégrés dans la fonction, et la réalisation simultanée de plusieurs étapes de travail, ce qui abrège le temps de production.
- La construction modulaire permet d'assouplir le processus de production à moindre coût, un avantage qui sert la tendance actuelle de l'individualisation des modèles.
- Le laquage est un procédé crucial et coûteux dans le processus de production. En lançant de nouveaux systèmes, l'industrie des matières plastiques peut contribuer à économiser des coûts.
- Les essais de choc (crash-tests) ont prouvé que les matières plastiques renforcées de fibres satisfont aux exigences actuelles en matière de sécurité.

La présente étude démontre clairement l'important potentiel des matières plastiques dans la construction de véhicules légers ainsi que les économies d'essence réalisables. Les matières plastiques ont évolué favorablement ces dernières années. Il reste certaines difficultés techniques à résoudre avant de pouvoir les intégrer dans les grandes productions de série. Mais les recherches sur l'amélioration des procédés et le développement de nouvelles applications sont intenses; tant l'industrie des matières plastiques que les producteurs automobiles y consacrent des sommes considérables. Leurs activités sont focalisées sur le perfectionnement des procédés en vue de lancer des productions en série compétitives sur le marché. S'ils y parviennent, les véhicules de construction légère pourront s'imposer à grande échelle.

Conséquences pour la politique énergétique

Conclusions et conséquences générales pour la politique énergétique

Les aspects complémentaires analysés dans le cadre de la veille technologique tiennent compte du fait que non seulement les caractéristiques techniques et économiques, mais aussi la commercialisation jusqu'au client final jouent un rôle clé dans l'application d'une technologie à grande échelle. Voilà pourquoi il est important de connaître les facteurs qui stimulent ou freinent l'innovation. Lorsque la veille technologique est placée dans un cadre plus large, les limites entre politique économique, d'innovation/technologique et énergétique s'effacent pour faire place à des questions d'attribution ou de délimitation. La veille doit donc permettre d'identifier et de suivre les facteurs stimulant ou freinant l'innovation dans les cas mentionnés tout en établissant la relation avec les objectifs et les répercussions de la politique énergétique. Ces informations sont utiles à la politique industrielle, la politique de recherche et la politique énergétique.

La veille technologique est un instrument nécessaire pour une recherche et une politique axées sur l'efficacité. La première définit des objectifs (si possibles quantitatifs) dans les différents domaines de recherche; la veille technologique permet de vérifier leur degré de réalisation, tout en réunissant de précieuses informations sur l'évaluation de l'efficacité et des obstacles et difficultés de la promotion de la recherche. La veille technologique fournit ainsi une base pour le contrôle des moyens affectés à la recherche énergétique et à la promotion des marchés.

La veille technologique fournit des points d'approche pour les mesures de politique énergétique, aide à identifier des voies de développement concurrentes et diminue le risque d'une mauvaise affectation des fonds de recherche. Elle convient particulièrement bien à certaines applications d'une technologie définie (par exemple les pompes à chaleur dans les maisons individuelles ou les propulsions à vitesse de rotation variable dans les moteurs), qui ont dépassé la phase de l'innovation de base et entrent en phase de lancement et de croissance. Des courbes d'apprentissage fondées sur l'évolution passée permettent de prévoir le futur développement économique de ces technologies et d'estimer le prix de l'entrée sur le marché qui en découle (différence entre l'évolution annuelle des coûts effectifs de la technologie et les coûts que le marché est prêt à verser – niveau des coûts des alternatives conventionnelles –, multipliée par la quantité écoulee annuelle indiquée par la courbe d'apprentissage).

Comme les courbes d'apprentissage indiquent également quelle quantité doit être écoulee pour couvrir les coûts du marché, elles permettent d'évaluer si une application définie a des chances d'être rentable sur le marché suisse uniquement, ou si la quantité nécessaire ne peut être écoulee qu'à plus grande échelle. Autant d'informations capitales pour la définition de la future politique d'encouragement. Car seules les technologies disposant d'une stratégie claire et réaliste pour couvrir les coûts de leur entrée sur le marché et bénéficiant de partenaires suffisamment importants pour apporter leur contribution en ce sens devraient être encouragées.

Nous proposons d'instaurer la veille technologique sous forme de tâche périodique. Elle devrait pour cela se limiter aux technologies dont les formes d'application sont clairement définies, mais qui revêtent une grande importance pour la politique énergétique parce qu'elles nécessitent ou devraient nécessiter d'importants moyens financiers.

Interprétée de cette manière, la veille technologique devrait comporter différents volets.

- Analyse et publication, dans le cadre des statistiques énergétiques annuelles (énergies renouvelables, CCF) et à moindre coût, des principaux paramètres économiques des technologies déjà examinées.
- Intégration dans la veille technologique des technologies qui n'ont pas encore fait l'objet d'une analyse mais qui sont importantes pour la politique énergétique suisse.
- Tous les cinq ans environ, réactualiser l'évolution de la compétitivité économique des technologies analysées et repérer les changements des obstacles et facteurs de réussite.

- Privilégier l'analyse des technologies passant de la phase d'innovation et de développement à la phase de croissance, bénéficiant d'une dynamique de marché croissante et d'importants effets d'apprentissage, d'échelle et de réseau. Les technologies se trouvant en phase de saturation perdent leur intérêt tant qu'elles ne sont pas relancées par de nouvelles innovations (l'enregistrement de telles innovations est pourtant l'une des tâches de la veille technologique).

Nous recommandons de poursuivre la surveillance de toutes les technologies analysées dans le cadre des veilles technologiques I et II⁴, à l'exception de la technologie des membranes et de la construction légère.

Obstacles et facteurs de réussite communs

L'une des principales fonctions de la veille technologique consiste à identifier les obstacles, à suivre leur évolution et à proposer ainsi une approche pour les politiques énergétiques et de recherche. L'étude a démontré que différents facteurs entravaient la percée de plusieurs technologies sur le marché.

- **La problématique des fonds perdus (sunk cost):** d'importantes infrastructures de recherche, de développement et de production nécessitant des investissements élevés qu'il faut amortir rendent l'adaptation de produits, de processus de production et de structures d'exploitation difficile.
- **Les coûts de transaction:** la collecte d'informations, l'évaluation, la planification et les coûts d'installation et de lancement peuvent représenter une part importante des coûts globaux, notamment pour les nouvelles technologies novatrices. Les coûts de transaction restreignent les avantages des solutions novatrices et ont une influence négative sur leur rentabilité.
- **Le manque de savoir-faire et une transparence du marché insuffisante** renforcent la tendance à recourir à des technologies, procédés de production et produits conventionnels. Les réseaux de recherche et d'intérêts peuvent contribuer à la diffusion du savoir-faire de manière décisive.
- **Les structures du marché défavorables:** trop de petits producteurs ou de producteurs de niche, ou une concurrence trop faible risquent d'empêcher la réalisation d'effets d'échelle et de réseau et, partant, le développement des technologies.

Conclusions de l'étude sur les différentes technologies

La veille technologique II tire diverses conclusions pour la politique énergétique appliquée aux différentes technologies:

- **Moteurs électriques à vitesse de rotation variable:** si les propulsions à vitesse de rotation variable s'avèrent rentables dans nombre de domaines d'application industriels, leur mise en œuvre échoue souvent à cause d'obstacles organisationnels. Le manque de ressources en personnel, entre autres, entraîne une surévaluation des coûts de transaction. Ces obstacles organisationnels doivent être attaqués au niveau voulu. Les objectifs convenus dans le cadre de la loi sur le CO₂ montrent une voie possible. Pourtant, en ce qui concerne les propulsions à vitesse de rotation variable, force est de constater que les objectifs en matière de CO₂ ne tiennent pas compte du problème de l'électricité. Or, sans bases légales de circonstance, il paraît bien difficile d'améliorer le rendement énergétique des propulsions électriques de manière significative. Différentes activités peuvent encourager la diffusion de ces technologies.
 - Les activités du programme de recherche Electricité qui visent à diminuer les coûts de transaction, peuvent sensiblement faciliter la mise en œuvre de conventions passées avec les entreprises industrielles.

⁴ Couplage chaleur-force avec moteur, appareils de chauffage à pile combustible; pompes à chaleur air-eau pour maisons individuelles et isolation thermique de haute performance, moteurs à vitesse de rotation variable, systèmes d'aération pour immeubles à faible consommation d'énergie

- Il convient de vérifier s'il est possible de créer et d'établir des directives, voire un label de qualité en matière de rendement énergétique optimal pour la construction de machines et d'installations. Ces directives devraient englober non seulement les propulsions à vitesse de rotation variable, mais encore d'autres mesures, comme par exemple l'utilisation de moteurs électriques ultra-performants.
- Lorsque les propulsions à vitesse de rotation variable sont encouragées dans le cadre d'offres d'information, de formation ou de conseil, elles doivent être présentées comme faisant partie intégrante d'une automatisation toujours croissante. L'avantage complémentaire (flexibilité d'exploitation accrue, év. intervalles de maintenance plus espacés) doit être communiqué de manière adéquate.
- **Systèmes d'aération pour immeubles à faible consommation d'énergie:** L'évolution quantitative et les affirmations des représentants des branches laissent clairement entendre que la diffusion de l'aération douce en Suisse est en grande partie due au label Minergie. L'exemple de l'aération douce montre bien comment l'introduction d'une nouvelle technologie dans le cadre d'un standard défini en premier lieu d'après l'amélioration de la qualité (de logement) peut réussir. L'optimisation du rendement énergétique progresse nettement plus vite dans le sillage de l'avantage complémentaire (confort accru), qu'en faisant cavalier seul. Si l'on évalue les chances des nouvelles technologies à l'avenir, une analyse technique et énergétique unilatérale ne peut livrer de résultats corrects. Jusqu'ici, la coordination des activités de la branche fait cruellement défaut dans le domaine de l'aération douce. En soutenant l'association MINERGIE et/ou en créant une plate-forme commune, les pouvoirs publics ont la possibilité de soutenir les activités des acteurs du marché. Un premier pas a été franchi avec «energie-cluster.ch», du moins pour ce qui est des questions techniques. Par ailleurs, des activités de marketing communes et l'assurance de la qualité, éventuellement dans le cadre du label Minergie, pourront à l'avenir améliorer les perspectives de l'aération douce.
- **Technologie des membranes:** Ce secteur technologique revêtant une importance limitée pour la Suisse (les importations et exportations sont restées modestes jusqu'ici), il n'est pas judicieux, du point de vue de la politique énergétique, de l'intégrer dans une veille technologique; les pouvoirs publics devraient renoncer à encourager et à soutenir son développement à l'avenir.
- **Constructions légères dans le secteur automobile:** Ce secteur technologique présente un énorme potentiel dans le domaine de la réduction du poids des véhicules et, partant, des émissions de CO₂. Cependant, la percée généralisée de cette technologie dans les grandes productions de série, condition essentielle pour réaliser cet important potentiel, ne semble aujourd'hui encore pas assurée. La Suisse peut apporter une importante contribution sur le plan de la politique industrielle par le biais des sociétés de sous-traitance impliquées. La motivation de la politique énergétique ne joue ici qu'un rôle de second plan. Il s'agit plutôt de promouvoir cette technologie, si bien qu'une veille technologique fondée sur des réflexions de politique énergétique n'est pas vraiment indiquée. Les pouvoirs publics disposent de différentes activités pour promouvoir cette technologie.
 - Soutien de projets de recherche et de développement grâce à une participation déterminante de l'industrie de sous-traitance suisse, avec pour objectif l'utilisation compétitive, automatisée de matières plastiques renforcées de fibres dans les grandes séries et leurs modules.
 - L'étiquetteEnergie intègre le poids du véhicule dans la formule permettant de calculer la catégorie du rendement énergétique. Par conséquent, le rendement énergétique d'une voiture plus légère et consommant moins d'essence ne sera pas jugé meilleur. Il serait indiqué de trouver un moyen pour le système de l'étiquetteEnergie tienne compte des réductions de poids.
 - La Confédération peut montrer l'exemple en ne sélectionnant que des voitures légères au rendement énergétique optimisé pour son parc de véhicules.
 - Des activités d'information et de communication permettent de faire connaître les avantages d'un poids réduit aux consommatrices et consommateurs.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte zeigen, dass Veränderungen der Energieproduktions- und –verbrauchsstrukturen infolge der langen Lebensdauer der Investitionen nur langsam erfolgen und dass die Entwicklung neuer Energietechnologien oft eine bis mehrere Dekaden benötigt. Umso grösser ist das Bedürfnis der Energiepolitik und der Energie-Forschungspolitik, frühzeitig über Informationen zur Richtung der zu erwartenden langfristigen Entwicklungstrends zu verfügen, um die strategische Politikvorbereitung und –ausrichtung sowie die Zuteilung von Energie-Forschungsmitteln möglichst nachhaltig vorzunehmen. Zu diesem Zweck ist es unerlässlich, Informationen zu den Entwicklungsperspektiven von Energietechnologien zu generieren, welche Hinweise auf den künftigen Verlauf der jeweiligen Technologiepfade geben. Die Wirtschaftlichkeit, und allfällige direkte Zusatznutzen (wie weniger CO₂, Lärm, Abgase usw.) sind für den Markterfolg von neuen Technologien von zentraler Bedeutung. Die Grundlagen für die Beurteilung der technologischen Entwicklung in wirtschaftlicher Hinsicht sowie bezüglich weiterer für den Markterfolg relevanter Zusatznutzen oder Anwendungshemmnisse sind jedoch in der Regel nicht oder nur ungenügend vorhanden. Es ist beispielsweise weitgehend unklar, welche Technologien sich zu welchen Kosten im Rahmen von Energie 2000 und EnergieSchweiz entwickelt haben. Die künftigen Entwicklungspfade von Energieeffizienztechnologien sowie von erneuerbaren Energien sind noch viel weniger bekannt. Hier will das Projekt Abhilfe schaffen, indem für ausgewählte Technologien diese Grundlagen erarbeitet und Datenreihen über die bisherige und die in Zukunft erwartete Entwicklung der für den Markterfolg relevanten Faktoren (der sogenannten Monitoringfaktoren) wie Energiegestehungskosten, Zuverlässigkeit, etc. bereitstellt. Aus der vergangenen Entwicklung verschiedener Technologien oder Technologiefelder soll gelernt werden, welche Faktoren für die Technologie- und Marktentwicklung massgeblich sind bzw. waren, damit die Aussagen über die zukünftigen Entwicklungsperspektiven verbessert werden können und eine grössere Reichweite erhalten. Gleichzeitig soll das Monitoring auch Informationen zum "Controlling" der Energie- und Forschungspolitik bereitstellen, indem es über die vergangene Entwicklung von Technologien Auskunft gibt.

Im Rahmen der Studie 'Technologie-Monitoring I' [Eicher+Pauli, **eco**ncept, 2002] wurde ein erster Schritt für ein umfassendes und systematisches Technologie-Monitoring gemacht. Zur Beurteilung der technologischen Entwicklung in wirtschaftlicher Hinsicht wurde eine einheitliche Methodik erarbeitet, wobei für vier Technologiebereiche die technologisch-wirtschaftliche Entwicklung in den letzten 10 Jahren analysiert und eine Abschätzung der bis ca. 2010 zu erwartenden Entwicklung dieser vier Technologiebereiche vorgenommen wurde. Mit dem Technologie-Monitoring für:

- motorische Wärmekraftkopplung
- Brennstoffzellenheizgeräte
- Luft-/Wasserwärmepumpen für Einfamilienhäuser und
- Hochleistungswärmedämmung

konnten aufschlussreiche und für die praktische Energiepolitik relevante Resultate generiert werden.

Die Vorstudie "Vision 2050: Nachhaltige Energienutzung und -versorgung in der Schweiz" [Factor/**eco**ncept et al. 2003] ergab, dass ein vorausschauendes Technologie-Monitoring der relevantesten Technologiebereiche eine zentrale Grundlage für eine kohärente, auf langfristige Ziele ausgerichtete Energiepolitik bildet. Die langfristig ausgerichtete Energiepolitik hat einen Bedarf an technologisch-wirtschaftlichen Informationen für einen Zeithorizont von 2030 bis 2050 (Reichweite der Wirkung heutiger Entscheidungen bei Investitionen im Infrastruktur- und Gebäudebereich).

Mit der hier erfolgenden Weiterführung des Technologie-Monitorings wird die Analyse der wirtschaftlichen Entwicklung auf weitere für die Zukunft der Energieversorgung relevante Technologien ausgedehnt. Die entscheidenden Einflussfaktoren für die wirtschaftliche Entwicklung der Technologien werden nach Möglichkeit analysiert. Dies betrifft insbesondere marktspezifische Einflüsse wie Markt- bzw. Anbieterstruktur, Konkurrenzsituation unter den Anbietern, Markttransparenz, etc. Angesichts des erforderlichen Betrachtungshorizontes bei energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Entscheidungen wird der Zeithorizont der Technologieanalysen von 2010 auf 2020 bis 2030 ausgedehnt. Die Konsequenzen der Technologieentwicklung für die Energiepolitik werden eingehend untersucht. Ein intensiver Quervergleich der Entwicklungsperspektiven der einzelnen Technologien und der systematische Einsatz des Monitorings sind anzustreben.

1.2 Zielsetzungen

1.2.1 Zielsetzungen des Technologiemonitorings

Mit dem Technologiemonitoring Grundlagen für die folgenden Zielsetzungen bereitgestellt werden:

- Beurteilung der bisherigen und der künftigen **Entwicklung einzelner Technologien**, welche für die Energieversorgung von besonderer Bedeutung sind.
- Technologiemonitoring als **Controllinginstrument** zur Beurteilung der Entwicklung von Technologien, welche gefördert werden (wieweit hat sich die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der geförderten Technologien verbessert? Beitrag der Förderung?).
- **Informations- und Planungsinstrument** für die Festlegung von Prioritäten bei Forschungs- oder Förderprogrammen (bei welchen Technologien besteht eine realistische Erfolgschance, um mit Förderung einen Durchbruch zu erzielen? Welche Zielgrößen müssen für entscheidende Faktoren (z.B. Anschaffungskosten, Wirkungsgrad) erreicht werden, damit sich eine bestimmte Technologie durchsetzen kann? Welche Massnahmen erscheinen dafür geeignet?).
- Identifikation von energiepolitischen Massnahmen zur Beeinflussung der Marktentwicklung neuer Technologien. **Konsequenzen für die Energie- und die Forschungspolitik** (welche energiepolitische Massnahmen erweisen sich als besonders wirksam? Voraussetzungen/Hemmnisse)
- Verbesserung des **Beurteilungs-Know-hows** bezüglich der Entwicklungschancen neuer Technologien. Herleitung von Kostendegressionsfaktoren zum Vergleich und zur Einschätzung der Entwicklungsgeschwindigkeiten unterschiedlicher Technologien als Grundlage für Modelle und Energieperspektiven.

Die vorliegende Arbeit legt einen Schwerpunkt auf die Analyse der folgenden Aspekte:

- Die Konsequenzen der Entwicklung einzelner Technologien für die Energiepolitik sollen vertieft untersucht werden. Dabei sind auch neue Technologien einzubeziehen, welche für die Bereiche Industrie und Verkehr von Bedeutung sind.
- Technologien, welche die Marktdiffusionsphase noch nicht erreicht haben resp. bei denen noch Forschungsbedarf besteht, sollen verstärkt untersucht werden.

1.2.2 Zielsetzungen für die vorliegende Arbeit

Untersuchung weiterer Technologiebereiche

Mit der Analyse zusätzlicher Technologiebereiche wird das Monitoring auf weitere für die Zukunft relevante Technologien ausgedehnt.

Vertiefte Analyse und Konkretisierung der Einflussfaktoren

Im Rahmen des Technologiemonitorings I hat sich gezeigt, dass die wirtschaftliche Entwicklung der Technologien nicht nur durch technologischen Fortschritt beeinflusst wird, sondern nicht minder durch marktspezifische Faktoren wie Markt- bzw. Anbieterstruktur, Konkurrenzsituation unter den Anbietern, Markttransparenz, etc.. Diese Faktoren sind oft typisch für eine bestimmte Phase des Innovationszyklus und werden bei den hier untersuchten Technologien mitberücksichtigt. Faktoren, die von der Energiepolitik beeinflusst werden können, sind dabei von speziellem Interesse.

Der Zeithorizont der Analyse wird auf 2020 bis 2030 (Reichweite der Energieperspektiven) ausgedehnt.

Konsequenzen für die Energiepolitik

Die Konsequenzen für die Energiepolitik werden vertieft untersucht. Ein intensiver Quervergleich der Entwicklungsperspektiven der einzelnen Technologien und der systematische Einsatz des Monitorings wird angestrebt.

1.3 Berichtsaufbau

In Kapitel 2 werden die **methodischen Ergänzungen** zum Vorgehen in Technologie-Monitoring I aufgeführt.

Kapitel 3 enthält die Grundlagen, die bei der **Auswahl der bearbeiteten Technologien** mit berücksichtigt wurden. Sie basieren weitgehend auf den Angaben aus Technologie-Monitoring I [Eicher und Pauli, **eco**ncept 2002] und wurden selektiv ergänzt. Die Auswahl der Technologien trug jedoch noch zusätzlichen Kriterien Rechnung: Vorgabe, dass eine der bearbeiteten Technologien aus dem Mobilitätsbereich und eine aus dem Bereich von industriellen Prozesse stammen sollte.

Kapitel 4 und 5 umfassen das Technologiemonitoring von **drehzahlvariablen elektrischen Motoren** und von **Lüftungssystemen für Niedrigenergie-Wohngebäude**, welches sich weitgehend an die Methodik von Technologiemonitoring I anlehnt.

In Kapitel 6 wird mit der **Membrantechnik** ein Technologiefeld aus dem Bereich industrieller Prozesse und in Kapitel 7 mit dem **Kunststoffleichtbau im Automobilbau** ein Technologiefeld im Mobilitätsbereich. Die Methodik bei der Analyse der Technologiefelder weicht von der sonst angewandten Methodik ab, in diesen Technologiefeldern können nicht Kostenentwicklungen und Lernkurven für definierte Anwendungen wie bei den übrigen Technologien abgeleitet werden. Hier geht es vielmehr um eine Einschätzung der Technologieentwicklung und der Perspektiven für ein ganzes Feld von zum Teil sehr unterschiedlichen Anwendungen.

In Kapitel 8 werden die Schlussfolgerungen für die Energiepolitik und für den Einsatz des Technologie-Monitorings gezogen.

2 Methodik

Die Vorgehensmethodik von Technologie-Monitoring II basiert grundsätzlich auf derjenigen von Technologie-Monitoring I. Aufgrund der Erfahrungen mit Technologie-Monitoring I werden die folgenden methodischen Differenzierungen und Vertiefungen vorgenommen:

Zeithorizont:

Im Gegensatz zu Technologie-Monitoring I wird der Zeithorizont bis ins Jahr 2020 erweitert, der Zeithorizont 2010 ist für ein vorausschauendes Technologie-Monitoring zu kurz. Um Kohärenz mit den Energieperspektiven zu erhalten, werden nach Möglichkeit zusätzlich Aussagen zur Entwicklung bis 2030 gemacht, wobei davon auszugehen ist, dass diese ab 2020 mit deutlich grösseren Unsicherheiten behaftet ist und in der Regel nicht mehr auf Abschätzungen von Produzenten und Experten beruhen wird. Wir planen für den Zeitraum nach 2020 Lernkurven zu nutzen, die auf der vorangehenden Entwicklung beruhen. Beim Blick auf die vergangene Entwicklung wird angestrebt, Daten ab 1990 zu beschaffen. Es zeigte sich jedoch bei Technologie-Monitoring I, dass diese Aufgabe zum Teil nicht weniger schwierig sein kann, als die Abschätzung künftiger Entwicklungen, weil die Produzenten, die Daten nicht mehr haben, die damals relevanten Firmen nicht mehr existieren, fusionierten etc. und deswegen Probleme mit der Beschaffung der benötigten Daten entstehen.

Entwicklung der Rahmenbedingungen:

Beim vorausschauenden Technologie-Monitoring werden die künftigen Entwicklungspotenziale der untersuchten Technologien abgeschätzt. Die wirtschaftlich-gesellschaftlichen Rahmenbedingungen wie Wirtschaftswachstum (BIP/cap., verfügbares Einkommen/cap.), Entwicklung der schweizerischen Produktionsstruktur (Tertiarisierung, weiterer Verlust industriell-gewerblicher Arbeitsplätze), Entwicklung der Bevölkerung (Geburtenüberschuss, Migration) und Bevölkerungsstruktur (zunehmender Anteil älterer EinwohnerInnen) sind für die Höhe der künftigen Anwendungspotenziale (Nachfrage) bedeutsam. Dazu kommt die Entwicklung der relativen Preise, insbesondere der künftigen Energiepreisteuerung und der Zinssätze. Grundsätzlich gehen wir von den Annahmen bei den Energieperspektiven aus (Kohärenz), allenfalls bezüglich des längerfristigen Wirtschaftswachstums ergänzt mit Annahmen aus (novatlantis 2002⁵). Allerdings werden im Rahmen des Technologiemonitorings II keine detaillierten Potenzialschätzungen mit direktem Bezug auf die erwähnten Rahmenbedingungen vorgenommen.

Differenzierung der ausgewählten Technologien:

Abhängig von den beobachteten sowie von den erwarteten Anwendungspotenzialen werden pro Technologie die relevantesten Anwendungsfälle identifiziert (Ausnahme: Modultechnologie). Das Monitoring wird danach soweit möglich für jeden dieser Anwendungsfälle vorgenommen (beispielsweise bei thermischen Solaranlagen getrennt für Mehrfamilienhäuser und für Einfamilienhäuser).

Zusätzliche Einflussfaktoren:

Förderung, Regulierungen: Allfällige Fördermassnahmen wie Subventionen/Beiträge, garantierte Einspeisevergütungen, etc. sowie Regulierungen (Bauvorschriften und Bewilligungsverfahren, Vereinbarungen zu Verbrauchszielwerten, etc.) können die Marktentwicklung in frühen Phasen des Entwicklungszyklus massgeblich beeinflussen und werden soweit zugänglich beim Monitoring berücksichtigt: Insbesondere bei der Entwicklung in der Vergangenheit sowie bei der Abschätzung der künftigen Lerneffekte.

⁵ novatlantis, "Steps towards a 2000 Watt-Society", Pre-study, Zürich, Villigen. Lausanne, Dübendorf, Dec. 2002

Zusatznutzen: Besonderes Augenmerk wird auf die Identifikation von allfälligen Zusatznutzen gelegt. Zusatznutzen sind oft der investitionsentscheidende Faktor und sind daher nicht selten bedeutend wichtiger für die Technologie- oder für die Marktentwicklung als die energetischen Vorteile der untersuchten Technologien.

Markt- und Anbieterstruktur: Die Markt- und Anbieterstruktur sind typischerweise mit einer bestimmten Entwicklungsphase einer Technologie verbunden. In frühen Phasen des Innovationszyklus bestehen oft diverse sich konkurrenzierende Konzepte, Produkte und Produktionsverfahren bei einer vergleichsweise grossen Zahl von kleinen Anbietern (gewerblich-kleinindustrielle Produktion). Die Entwicklung der Anbieterstruktur widerspiegelt dann den Reifegrad einer Technologie und erlaubt Rückschlüsse auf noch unausgeschöpfte Entwicklungspotenziale wie auch auf die künftigen Entwicklungschancen und -dynamik. Für die schweizerische F+E-Politik interessieren zudem die schweizerischen Wertschöpfungsanteile sowie die Entwicklungspotenziale beim schweizerischen und bei den ausländischen Wertschöpfungsanteilen.

Wettbewerbssituation/Markttransparenz: (Jakob et al. 2003⁶) zeigen auf, dass geringe Preisdifferenzen zwischen den Anbietern auf einen hohen Reifegrad einer Technologie bzw. einer Anwendung sowie auf hohe Wettbewerbsintensität schliessen lassen, was einen Hinweis auf die Position im Innovationszyklus abgibt (fortgeschrittene Wachstumsphase bzw. Sättigungsphase). Mit steigendem Wettbewerb steigt in der Regel gleichzeitig auch die Markttransparenz. Aufgrund zunehmender Technologiediffusion und den dabei gemachten Erfahrungen setzen sich die Lösungen mit dem besten Kosten-/Nutzenverhältnisse auf dem Markt durch, die anderen Anbieter werden verdrängt und die Absatzvolumina konzentrieren sich bei wettbewerbsfähigen Anbietern, was volumenabhängige Skaleneffekte ergibt.

Standardisierung, Labelling: Standardisierungen von Anbietern/Produzenten, Fachverbänden, des Gesetzgebers sowie die Schaffung von Labels in den jeweils untersuchten Technologiebereichen werden beim Technologie-Monitoring berücksichtigt. Diese Bestrebungen führen einerseits zu höherer Markttransparenz und zeigen andererseits an, dass die Entwicklung von Technologien und ihren Anwendungen einen marktfähigen Stand erreicht hat. Sie sind ein mitverursachender Faktor von Kosten- und Preissenkungen und von Effizienzsteigerungen beim Absatzmarketing.

Die Monitoringfaktoren werden wie im Technologie-Monitoring I verfolgt (wie die Entwicklung der Investitionskosten, der Unterhalts- und Betriebskosten, die Innovationsdynamik auf der Ebene der technologischen Entwicklungen sowie der Produkte- und Absatzinnovationen).

⁶ Jakob M., Jochem E., "Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden", im Auftrag des BFE, Zürich/Bern Sept. 2002

3 Wahl der untersuchten Technologien

Für die Auswahl der in Technologiemonitoring II untersuchten Technologien bzw. Technologiefelder werden einerseits die im Technologiemonitoring I erarbeiteten Grundlagen verwendet (s. unten). Daneben wird aber auch berücksichtigt, dass im Rahmen des EWG-Forschungsprogrammes Untersuchungen zu "Kosten und Nutzen von Solarenergieanlagen in energieeffizienten Bauten" vorgenommen werden [Infras et al. 2004]. Zusätzlich besteht die Vorgabe, nach Möglichkeit ein Technologiebeispiel aus dem Mobilitätsbereich und eines aus dem Bereich Industrie/Grossverbraucher zu bearbeiten.

In Technologiemonitoring I wurden für die Technologieauswahl die folgenden Grundlagen aufbereitet:

Technologie	Wirtschaftlichkeit 2001	Wirtschaftlichkeit 2010	Innovationspotenzial	Absatzpotenzial bzw. jährl. Sparpotenzial 2001	Absatzpotenzial bzw. jährl. Sparpotenzial 2010
Hochleistungs-Wärmedämmung	15-25 Rp./kWh	5-15 Rp./kWh	+++++	Baubereich 25'000 m ² /a Total: 120'000m ² /a 2,8 GWh/a	Baubereich >400'000 m ² /a Total >700'000 m ² /a >16 GWh/a
Passivhausfenster ($U_{\text{Glas}} < 0.5$, $U_{\text{Rahmen}} < 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$)	30-80 Rp./kWh	20-50 Rp./kWh	+++++	Einzelne	einige Zehntausend m ²
Sanierungen (Isolation Keller 8 cm, Dach/ Fassade 20 cm)	10-15 Rp./kWh	8-12 Rp./kWh	+++	0.4-0,5 TWh/a	0,6-1 TWh/a
Brennstoffzelle	>50 Rp./kWh _{el}	15-25 Rp./kWh _{el}	++++	-	<500 GWh/a ⁵⁾
Grossverbraucherprozesse	++(+) (heterogen)	++++ (heterogen)	+++	gross	0,85 TWh/a _w ⁴⁾ 5,5 TWh/a _{el} ⁴⁾
Elektrische Geräte	15-20 Rp./kWh	10-15 Rp./kWh	+++	1,3 TWh/a	1,5 TWh/a
Lüftung/Klima zentr. Komfortlüftung	11'000.-/Anl.	9'000.-/Anl.	+++	350 GWh/a	350 GWh/a
Beleuchtung	15-20 Rp./kWh	12-16 Rp./kWh	+++	220 GWh/a	250 GWh/a ⁴⁾
WP in Gebäuden	16-25 Rp./kWh	13-20 Rp./kWh	++	9 MW 3 TWh _{th}	12-15 MW 3-5 TWh _{th} ³⁺⁴⁾
Geothermie (hot dry rock) Wärme Strom	?	18 Rp./kWh _w 30 Rp./kWh _{el}	+(+)	-	0,2 TWh/a _w ³⁾ bis 5 TWh/a _w ⁴⁾ 60 GWh/a _{el}
Konventionelle WKK	10-15 Rp./kWh _{el}	8-12 Rp./kWh _{el}	+	1,6 GWh/a ²⁾	16 TWh/a
Wind Schweiz	20-40 Rp./kWh ⁶⁾	15-35 Rp./kWh	+++	0,3-1,6 TWh/a	0,3-1,6 TWh/a
Thermische Solarkollektoren	25-30 Rp./kWh	20-25 Rp./kWh	++	290 GWh/a ²⁾	>1 TWh/a ³⁾
Holzfeuerungen	15-25 Rp./kWh	10-20 Rp./kWh	+(+)	6 TWh/a	10 TWh/a ¹⁾
Abwärme (extern)	10-16 Rp./kWh	9-15 Rp./kWh	+	8 TWh/a ohne KVA	8 TWh/a ⁴⁾ ohne KVA
Photovoltaik	90-110Rp./kWh	60-75 Rp./kWh	++	12 GWh/a ²⁾	100 GWh/a ³⁾

1) Nur nachhaltig nutzbares **einheimisches** Potenzial (**e c o n c e p t**/Infras 1999)

2) Effektive Produktion 2001 gem. Energiestatistik (nicht Potenzial 2001)

3) Gantner et al. 2001

4) **e c o n c e p t**/Infras 1999

5) Aufnahme Serienproduktion ca. 2007, Potenzial 2020 1 TWh/a (Gantner et al. 1999)

Tabelle 1 Technologiespezifische Charakteristika, welche die Grundlage für das Technologieportfolio bilden: Erwartete mittlere Energie-(vermeidungs-)kosten, qualitatives Innovationspotenzial und Absatz- bzw. Spar-/Effizienzpotenzial 2001/2010.

- **Wirtschaftlichkeit aktuell** (ohne externe Kosten, ohne CO₂-Abgabe): Die angegebenen Kostenbereiche beziehen sich bei der Wärme auf kleine Wärmebezüger (Ein- bis Vier-Familienhäuser) bzw. auf grosse Bezüger und bei Elektrizität auf Nieder- bis Mittelspannungs-Grossbezüger sowie auf Niederspannungs-Kleinbezüger. Als Grundlage zur Wirtschaftlichkeitsbeurteilung weist die folgende Technologietabelle die mittleren Energiegestehungskosten bzw. die Kosten der Energieeinsparung für 2001 und 2010 aus. Die Angaben zu den Kosten im Jahr 2010 stammen aus der Literatur, primär aus [Jakob et al. 2002, Gantner et al. 2001 und **eco n c e p t**/Infras 1999].
- **Innovationspotenzial:** Energetische Verbesserungen (Einsparungen, Effizienzsteigerungen, Substitution nichterneuerbarer Energien), preissenkungen/Ausdehnung des Absatzpotenzials/steigender Absatz durch Produkt-, Bedürfnis- und Absatzinnovationen (Erweiterung Absatzpotenzial) sowie durch Prozessinnovationen und steigende Skalenerträge (Verbesserung der Wirtschaftlichkeit). Abschätzung in der Technologietabelle: Qualitativ zusammenfassend.
- **Absatz-/Produktionspotenzial bzw. Sparpotenzial 2001 und 2010** (Fläche des Technologiefeldes, mengenmässige Relevanz). In der Technologietabelle handelt es sich beim Produktionspotenzial um das kumulierte Potenzial in den Jahren 2001 und 2010. Beim Spar-/Effizienzpotenzial dagegen um die Einsparungen, die in den Jahren 2001 und 2010 durch die in diesen Jahren ergriffenen Spar- und Effizienzmassnahmen realisiert werden.

Die folgende Bewertungstabelle bildet eine weitere Grundlage für die Auswahl der zu untersuchenden Technologien. Sie verwendet zusätzlich die folgenden Kriterien beurteilt

- **Relevanz bzw. künftiges Absatz- und Effizienz-/Sparpotenzial:** Die mengenmässige Relevanz bis 2010 (- 2015) hängt einerseits vom bestehenden Anwendungspotenzial für die jeweilige Technologie ab. Dabei spielen Ersatz- bzw. Erneuerungszyklen eine massgebliche Rolle. Insbesondere bei bestehenden Gebäuden muss in der Regel davon ausgegangen werden, dass neue Technologien erst bei Erneuerungen oder beim ohnehin erforderlichen Anlagenersatz eingesetzt werden. Der künftige Marktanteil einer neuen Technologie im oben erwähnten Anwendungsbereich der Technologie wird durch Produkte-, Prozess- und Vermarktungsinnovationen beeinflusst, welche zu tieferen Technologiekosten mit tieferen spezifischen Energiekosten führen. Die erwartete Relevanz einer Technologie hängt vielfach von nichtenergetischen Nutzen ab, die die Technologien vermitteln (Beispiel Komfortlüftung, die nicht primär aus energetischen Gründen installiert werden, sondern um die Behaglichkeit und die Raumluftqualität zu verbessern).
- **Entwicklung der Technologie in der Vergangenheit (den letzten 10 Jahren):** Die vergangene Entwicklung der Technologien (technologische Charakteristika, Kosten, Absatz, Anbieterstruktur, etc.) weist auf den zu erwartenden Verlauf der Produktelebenszyklus-Kurve und die aktuelle Position der jeweiligen Technologie auf dieser Kurve hin. Für das Technologie-Monitoring sind vor allem Technologien mit starken energetischen Verbesserungen (Ausbeute, Wirkungsgrad) und Kostensenkungen sowie Technologien, die sich in neuen Absatzbereichen etablieren konnten bzw. können interessant.
- **Handlungsspielraum für die Technologieförderung:** Aus energiepolitischer Sicht geht es beim Monitoring vor allem um Technologien, deren Entwicklung von der Schweiz mitbeeinflusst werden kann, wo also ein gewisser technologie- und energiepolitischer Handlungsspielraum besteht. Es können zwei Dimensionen unterschieden werden:
 - Technologiepolitischer Handlungsspielraum: Beeinflussungsmöglichkeiten der technologischen Entwicklung in der Schweiz
 - Energiepolitischer Handlungsspielraum: Direkte Fördermassnahmen (angebots- und/oder nachfrageseitig) und flankierende Massnahmen (Ausbildung, Information, Kommunikation, Qualitätssicherung) der Energiepolitik.

Technologie	Entwicklung in der Vergangenheit	Innovationspotenzial	Relevanz: Absatz-/Effizienzpotenzial 2020	Handlungsspielraum	Relevanz (Anzahl '+')
Hochleistungs-Wärmedämmung	++++	++++	+++	+++	14
Passivhausfenster ($U_{\text{Glas}} < 0,5$, $U_{\text{Rahmen}} < 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$)	+++	++++	+++	+++	13
Elektrische Antriebe	+++	++	+++	+(+)	9,5
Kunststoff-Leichtbau/ Modultechnologie	++++	++++	++++	++	14
Brennstoffzelle	++++	++++	++	+++	13
Membrantechnologie	+++	+++	++(+)	+(+)	10
Elektrische Geräte	++	++	++++	++(+)	10,5
Lufterneuerung	+++	++	+++	+++	11
Beleuchtung	+++	++	+++	++	10
WP	++	++(+)	+++	++(+)	10
Geothermie HDR	+	++++	++(+)	++	9,5
Konventionelle WKK	++	++	++++	++	10
Wind	+++	++	+	+++	9
Thermische Solar-Kollektoren	++	++(+)	+++	++(+)	10
Holz-Pellet-Feurg.	++	++	+++	+++	10
Abwärme	+	(+)	++++	++(+)	8
Photovoltaik	++	+++	+(+)	++(+)	9

Tabelle 2 Indikative Bewertungstabelle für die Auswahl der zu untersuchenden Technologiefelder; die ausgewählten Felder für Technologiemonitoring II sind dunkel und diejenigen von Technologiemonitoring I sind hellgrau markiert.

Drehzahlvariable elektrische Motoren

Beispiel einer innovativen Technologie mit bedeutendem Energiesparpotenzial im industriellen Umfeld: Die Technologie wird dadurch charakterisiert, dass zwar bedeutende wirtschaftliche Effizienzpotenziale vorhanden sind, diese jedoch nicht oder nur zögerlich umgesetzt werden. Sie

bietet sich an, um zu untersuchen, wie sich Hemmnisse auswirken, welche im Rahmen herkömmlicher Investitionsentscheidungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen häufig vernachlässigt werden (z.B. Transaktionskosten) und wie diese mit energiepolitischen Massnahmen allenfalls überwunden werden könnten.

Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohnbauten

Bedeutendes Effizienzpotenzial im Gebäudebereich: Eine Kosten-Nutzwert-Analyse sogenannter 'Komfortlüftungen' welche sich beim Nutzen auf die eingesparte Energie beschränkt, führt zu einem sehr schlechten Kosten-Nutzen-Verhältnis. Mitentscheidend für den beachtlichen aktuellen Erfolg der Lüftungssysteme sind eindeutig die Zusatznutzen (Lärmschutz, Luftqualität) sowie die Lüftungs-Qualitätsvorgaben des Labels 'Minergie'.

Membrantechnologie

Beispiel einer innovativen Technologie mit (im Einzelfall) bedeutendem Energiesparpotenzial gegenüber thermischer Stofftrennung (z.B. Destillation) in der Industrie. Hier interessiert, wie sich eine neue, energieeffiziente Technologie im industriellen Umfeld ohne staatliche Förderung verbreitet und wie die Technologie zu völlig neuen Verfahren und Prozessen sowie zu neuen Produkten führt. Bei der Bearbeitung zeigte sich, dass die Technologie sehr energierelevant sein kann, dass aber das Potenzial in der Schweiz begrenzt ist, dass auch relativ wenige Schweizer Produzenten im grösseren Ausmass exportieren. Die künftigen Anwendungen und Auswirkungen von Membrantechnologien sind noch schwer einschätzbar. Mit der Entwicklung neuer immer leistungsfähigerer Membrane (Partikelgrösse) sind in Zukunft ganz neue Anwendungsbereiche (neue Prozesse und neue Produkte) zu erwarten. Energieeinsparungen können bei der Membrantechnologie bestenfalls bei ausgewählten Membrananwendungen ermittelt werden, die ein bestehendes Verfahren substituieren. Generelle Einschätzungen machen wenig Sinn, unter anderem darum, weil bei neuen Prozessen oder Produkten keine identifizierbare Referenzvariante besteht. Ähnlich wie bei der Modultechnologie geht es auch hier nicht darum, die Technologieentwicklung von definierbaren Anwendungen zu verfolgen, sondern eher um den Innovations-, Entwicklungs- und Diffusionsprozess eines ganzen Technologiefeldes.

Kunststofftechnologie für den Fahrzeug-Leichtbau

Beispiel für innovative technologische Neuerungen im Automobilbau bzw. im Mobilitätsbereich: Die Möglichkeiten des Kunststoff-Leichtbaus im Automobilbau interessieren hier aus den folgenden Gründen stärker als die zuerst in Betracht gezogene Analyse von Innovationen im Antriebsbereich (Dieselmotor, Elektromotor/Brennstoffzelle):

Die schweizerische Maschinen- und die Kunststoffindustrie sind innovative und relevante Zulieferanten für grosse Automobilproduzenten. Die Kunststoff-Leichtbautechnologie wird zudem seit Jahren vom BFE gefördert. Es bestehen mittlerweile interessante Konzepte unterschiedlicher Reichweite und einzelne Elemente haben den Eingang in die Fahrzeugproduktion gefunden. Es stellen sich dabei Fragen bezüglich der energiepolitisch motivierten Förderung von Technologien, die praktisch vollständig für den Export entwickelt werden, deren Produkte energetisch jedoch für die Schweiz durchaus wieder hohe Relevanz aufweisen. Im Gegensatz zu den in Technologiemonitoring I sowie den hier untersuchten Lüftungssystemen und elektrischen Motoren ist die Umschreibung des Untersuchungsobjektes ('Leichtbautechnologie') nicht klar abgrenzbar: Es ist offen, wieweit es sich heute und in Zukunft um einzelne Fahrzeugteile oder ganze Fahrzeugmodule (z.B. eine fertig zusammengestellte Front- oder Heckpartie) handeln wird. Noch ist zudem der künftige 'Material-' und Technologiepfad für Gewichtsreduktionen im Fahrzeugbau ungewiss: Der Stahlbau wird in Konkurrenz zu Aluminium-, Magnesium- und Kunststoffanwendungen ebenfalls weiterentwickelt. Das Monitoring muss zu diesem Zweck modifiziert werden, ein Kostenmonitoring ist nicht möglich. Dafür soll das Monitoring ermöglichen, die künftigen Entwicklungen in diesem Bereich mit ihren Auswirkungen auf Treibstoffverbrauch und -ökologie zu verfolgen.

4 Drehzahlvariable elektrische Motoren

4.1 Marktsituation

Knapp die Hälfte des schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs wird in elektrischen Motoren umgesetzt (siehe Grafik). Eine detaillierte Analyse, wie sich dieser Verbrauch auf die verschiedenen Anwendungsgebiete und Branchen aufteilt, existiert nicht. Immerhin werden im Forschungsprogramm Elektrizität des BFE einige Richtwerte genannt. Grosse Anteile des Elektrizitätsverbrauchs werden für die Mediumsförderung (Lüftung, Pumpen, Kompressoren) beansprucht. Dieser Bereich ist für den Einsatz drehzahlvariabler Motoren besonders interessant, da die bezogene Leistung sehr stark von der Drehzahl abhängig ist (bei Gebläsen und Pumpen ändert sich der Leistungsbedarf in der dritten Potenz der Drehzahl).

Im Forschungsprogramm Elektrizität wird das (technische) Sparpotenzial durch Drehzahlregulierung auf ca. 4 % des gesamten Stromverbrauchs geschätzt.

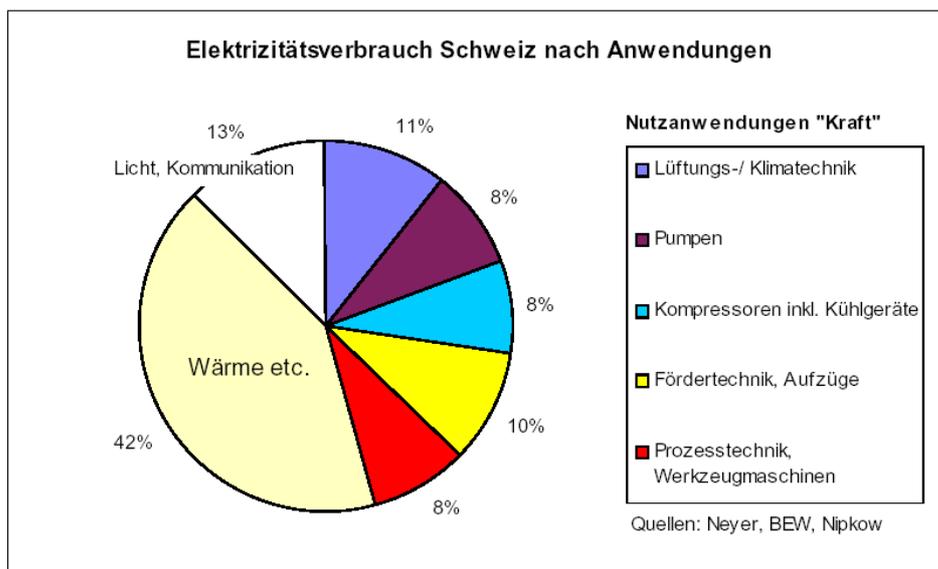


Bild 1. Elektrizitätsverbrauch in der Schweiz nach motorischen Anwendungen (gem. Neyer, Nipkow)

Über die Leistungsgrössen der elektrischen Antriebe sowie den Anteil von drehzahlvariablen Antrieben liegen für die Schweiz keine genaueren Zahlen vor. Um dennoch einen Eindruck über diese Punkte zu erhalten, kann aber auf umfassende Erhebungen zurückgegriffen werden, welche die Europäische Union 1996 im Rahmen des Motor Challenge Programmes für den Bereich Industrie und den tertiären Sektor durchgeführt hat [De Almeida, et. al. 2000].

Die folgenden Darstellungen zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der Leistungsgrößen elektrischer Antriebe für den Bereich Industrie und den tertiären Sektor:

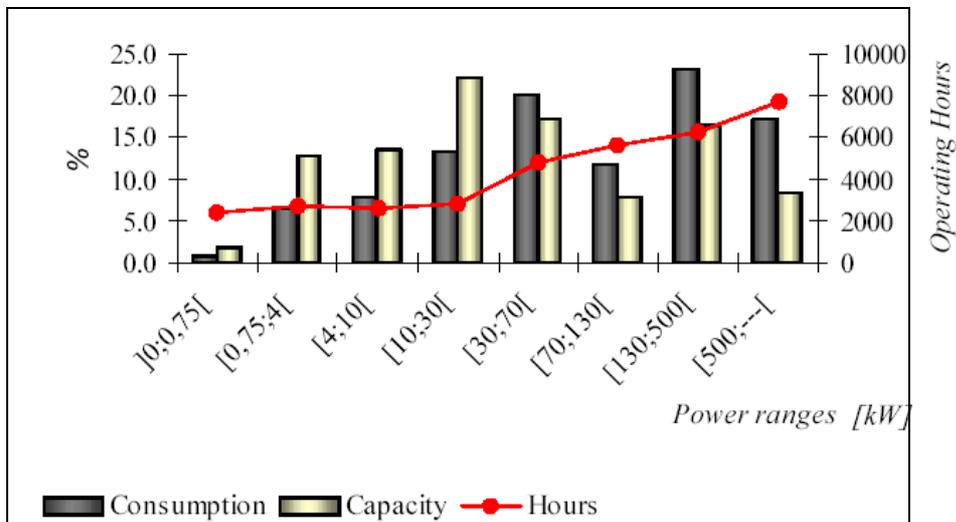


Bild 2. Installierte Leistung, Stromverbrauch und mittlere Betriebsstunden nach Leistungsgrößen für elektrische Antriebe im Industriesektor (gem. EU Motor Challenge Programme [De Almeida, et.al. 2000])

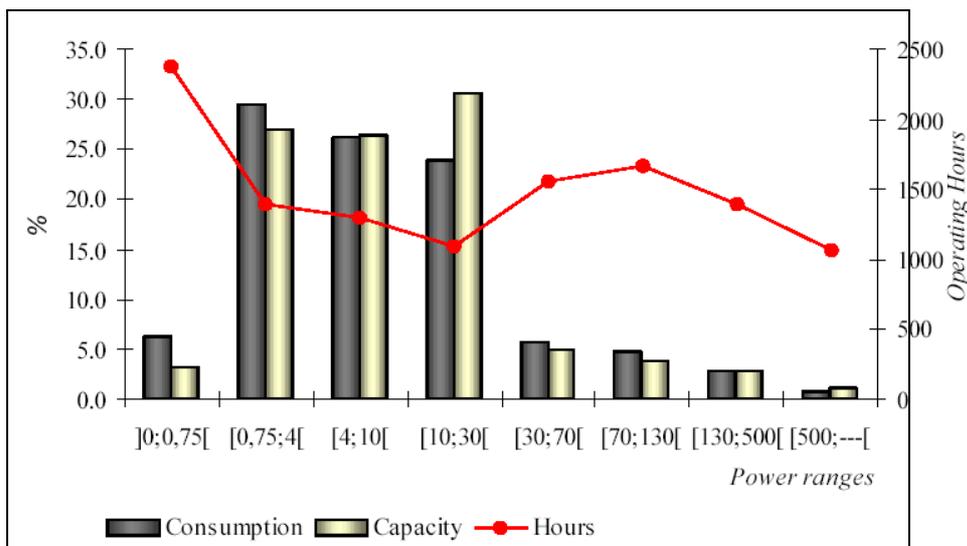


Bild 3. Installierte Leistung, Stromverbrauch und mittlere Betriebsstunden nach Leistungsgrößen für elektrische Antriebe im tertiären Sektor (gem. EU Motor Challenge Programme [De Almeida, et.al. 2000])

Die Bedeutung der einzelnen Leistungskategorien in der Schweiz kann grob abgeschätzt werden, indem die (in der EU ermittelten) Zahlen für den Anteil der einzelnen Leistungskategorien mit dem Schweizerischen Stromverbrauch 2002 für die Sektoren Industrie und Dienstleistungen kombiniert werden. Der Anteil der elektrischen Antriebe am Stromverbrauch wird für den Sektor Dienstleistungen entsprechend den Erhebungen in der EU [De Almeida, et. al., 2000] mit 38 % angenommen. Für die verschiedenen Bereiche im Sektor Industrie (Papier, Chemie, etc.) liegen die Anteile zwischen 50 und 90 %, was für den gesamten Sektor in der EU einen Anteil von 69 % ergibt. Für die Schweiz nehmen wir aufgrund des unterschiedlichen Gewichts der einzelnen Bereiche einen Anteil der elektrischen Antriebe von 60 % an.

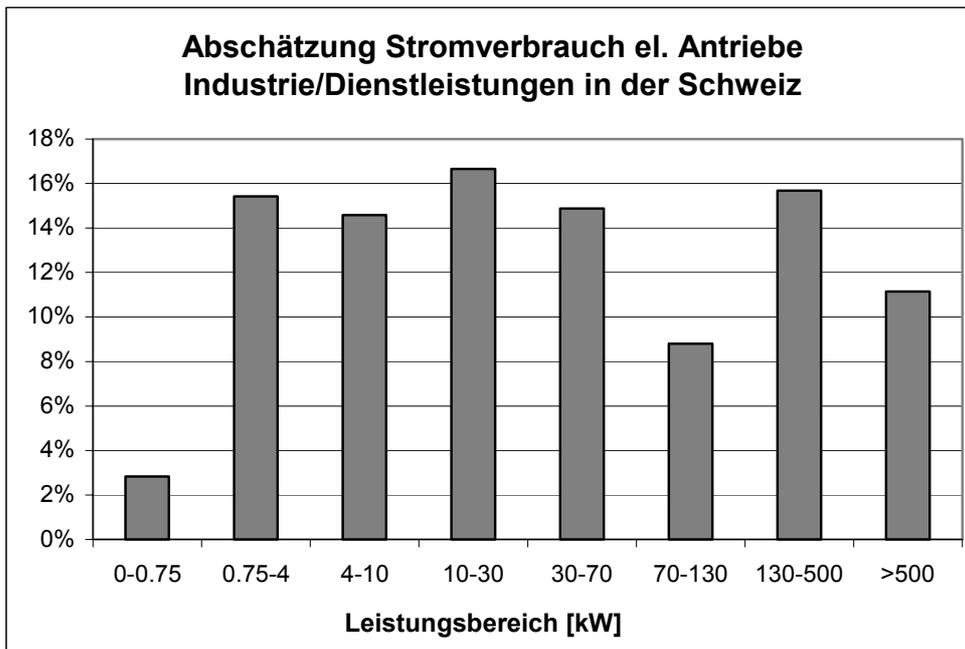


Bild 4. Abschätzung des Anteils einzelner Leistungskategorien am Stromverbrauch in den Sektoren Industrie und Dienstleistungen

Gemäss der Aussage von Herstellern und Schweizer Vertreter des Motor Challenge Programms sind in der EU grosse Antriebe (ab ca. 100 kW) viel häufiger vorhanden, als in der Schweiz. Die oben dargestellte Abschätzung dürfte deshalb die Bedeutung der grossen Antriebe in der Schweiz wohl überschätzen. Das Schwergewicht sollte im Bereich zwischen 0.75 und 70 kW liegen.

Die folgenden Darstellungen zeigen den Marktanteil drehzahlvariabler Antriebe am gesamten Elektromotorenmarkt bezogen auf die Verkäufe wie auch auf den Gesamtbestand in der EU:

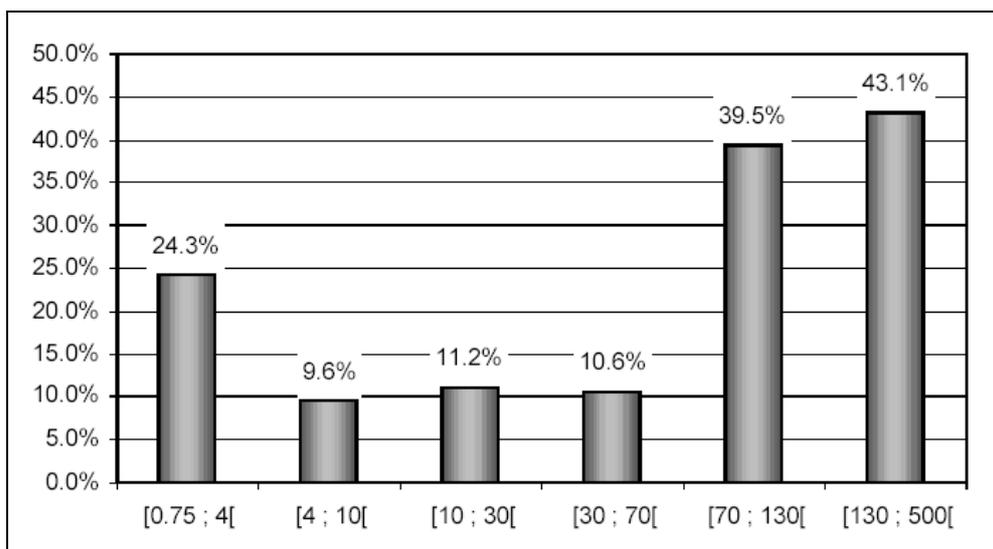


Bild 5. Anteil drehzahlvariabel betriebener Elektromotoren an den Verkäufen von Asynchronmotoren 1998 (gem. EU Motor Challenge Programme [De Almeida, et.al., 2000])

Neuere Zahlen oder Zahlen für den Schweizer Markt sind leider nicht zugänglich. Es darf allerdings angenommen werden, dass die Marktanteile für drehzahlvariable Antriebe bis heute deutlich gestiegen sind, aber vor allem im Leistungsbereich von 4 bis 70 kW noch weit unter dem wirtschaftlich vertretbaren Potenzial liegen.

Anteil drehzahlvariabler Antriebe im Sektor Industrie / Dienstleistung			
Pumpen	9 % / 7 %	Kältekompressoren	4 % / 3 %
Ventilatoren	7 % / 5 %	Fördertechnik	8 % / 7 %
Luftverdichter	5 % / 3 %	Andere Bereiche	5 % / 3 %

Tabelle 3 Anteil der drehzahlvariabel betriebenen Elektromotoren am Gesamtbestand 1996 (gem. EU Motor Challenge Programme [De Almeida, et.al.2000])

Die Verhältnisse in der Schweiz dürften in etwa ähnlich sein, wobei das Niveau sowohl der Verkäufe wie auch des Bestandes heute spürbar höher liegen dürfte. Einerseits durch den laufenden Ersatz älterer Antriebe und die sinkenden Kosten für drehzahlvariable Antriebe, andererseits durch die höheren Elektrizitätstarife in der Schweiz.

Gesetzliche Vorschriften für den Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben sind weder in der Schweiz noch in den meisten übrigen Ländern vorhanden. Sie haben deshalb bei der bisherigen Entwicklung keine wesentliche Rolle gespielt.

4.2 Untersuchtes Fallbeispiel

Die wirtschaftliche Entwicklung von drehzahlvariablen Antrieben wird anhand eines Pumpenantriebs in einem Industriebetrieb mit einer Nenn-Antriebsleistung von 2.2, 11 und 55 kW analysiert. Zum Einsatz gelangt jeweils ein 3-phasiger Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer, der mit einer Spannung von 400 V betrieben wird. Die Betriebsstunden und die Last (resp. die Fördermenge) der Pumpe soll so gewählt werden, dass sie möglichst typisch für das industrielle Umfeld ist.

Untersucht wird der drehzahlvariable Betrieb des Motors über einen Frequenzumrichter, welcher separat installiert werden kann oder fest in den Motor eingebaut ist. Als Referenzvariante wird der Betrieb des Motors mit konstanter Drehzahl angenommen, wobei der Volumenstrom mit einer mechanischen Drosselung (Drosselventil resp. -klappe) geregelt wird. Dies ist heute die am weitesten verbreitete Methode der Volumenstromregelung, sofern die Anlage überhaupt reguliert wird und nicht mit konstantem Volumenstrom läuft.

Der Energieverbrauch bestehender elektrischer Antriebe kann in der Praxis nicht nur durch den drehzahlvariablen Betrieb des Motors reduziert werden, sondern auch durch folgende Massnahmen:

- Reduktion der Betriebszeiten
- Korrekte Dimensionierung der Motorleistung
- Einsatz energieeffizienter Motoren

Die beiden ersten Punkte werden im Rahmen des Technologie-Monitorings nicht berücksichtigt, da die Entwicklung neuer Technologien unabhängig vom Einfluss der Anlageplanung untersucht werden soll. Es wird deshalb stets davon ausgegangen, dass die elektrischen Antriebe korrekt dimensioniert sind und so gesteuert werden, dass sie bei Nichtgebrauch abgestellt werden.

Wir gehen davon aus, dass ein energieeffizienter Motor eingesetzt wird (Wirkungsgradklasse EFF1), was vor allem bei hohen Betriebszeiten finanziell äusserst interessant ist. Den zusätzlichen Investitionen von 20 bis 30 % steht ein um 2 bis 6 % besserer Wirkungsgrad gegenüber. Auf die Ergebnisse des Monitorings hat diese Annahme nur einen untergeordneten Einfluss.

Das Effizienzsteigerungspotenzial von drehzahlvariablen Antrieben hängt ganz entscheidend von der Variabilität der benötigten Antriebsleistung und der Anzahl der jährlichen Betriebsstunden von Volllast- resp. Teillastbetrieb ab.

Bei der Mediumsförderung ist die notwendige Leistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl, solange keine Höhendifferenz zu überwinden ist. Muss eine Höhendifferenz überwunden werden, kommt zur Umwälzleistung ein Leistungsbedarf für die Hubarbeit hinzu, welcher 'nur' linear von der Drehzahl abhängt. Das prozentuale Stromsparpotenzial ist demnach bei Förderanlagen, welche eine Höhendifferenz überwinden müssen, geringer. Bei Umwälzanlagen muss keine Höhendifferenz überwunden werden, bei einer Transportanlage hängt dies von den örtlichen Bedingungen ab. Wir gehen beim Fallbeispiel davon aus, dass keine Höhendifferenz zu überwinden ist.

Die jährliche Betriebszeit variiert je nach den Anforderungen des umgebenden Prozesses sehr stark. Im Rahmen des Motor Challenge Programmes der EU [De Almeida et.al., 2000] wurden für Pumpenantriebe ab 0.75 kW in verschiedenen Industriebereichen durchschnittliche Jahresbetriebsstunden von 2'400 bis 8'600 ermittelt.

Ebenso stark wie die Jahresbetriebsstunden hängt auch die Häufigkeit von Volllast- resp. Teillastbetrieb vom umgebenden Prozess ab. Eine detaillierte Erhebung von Last-Histogrammen wurde im Rahmen des Motor Challenge Programmes nicht durchgeführt. Bekannt ist aber, dass die Anlagen in der Regel sehr flexibel geplant werden. Einzelne Fördereinrichtungen (z.B. Pumpen) fördern jeweils an mehrere Orte mit sehr unterschiedlichen Bezugsmengen. Der Bezug der einzelnen Orte ist nicht koordiniert, so dass die gesamte Fördermenge um ein Vielfaches variiert. Die Fördereinrichtungen werden jedoch auf den maximalen Bezug ausgelegt und mehrheitlich bei Teillast betrieben. Die nachfolgende Grafik zeigt ein Last-Histogramm, welches im Rahmen des OPAL-Projektes für eine Druckerhöhungspumpe aufgenommen wurde:

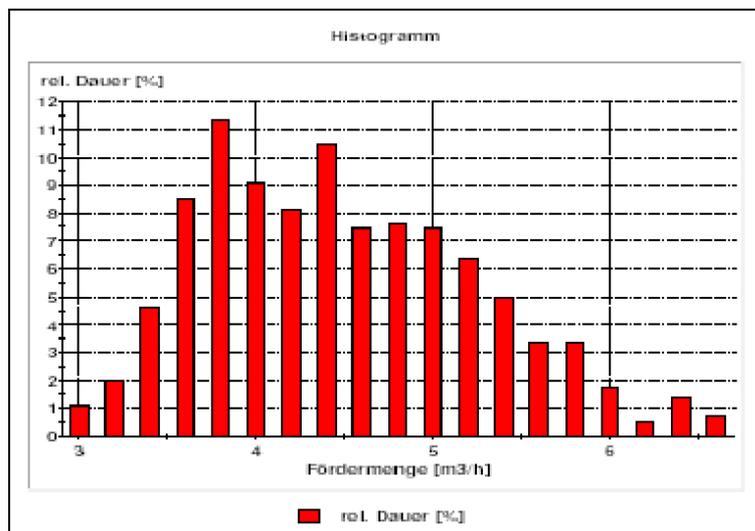


Bild 6. Beispiel eines Bedarfsprofils für einen Pumpenantrieb (Druckerhöhungspumpe in der chem. Industrie)

Um die Energieeinsparung in unseren Fallbeispielen zu berechnen, wählen wir ein vereinfachtes Last-Histogramm mit total 5'000 Betriebsstunden pro Jahr und vier Betriebszuständen. Unterschiedliche Anforderungen können durch Variierung der Betriebsstunden resp. des Lastprofils (Anteile der Volllast/Teillast an Betriebsstunden - siehe folgende Tabelle) simuliert werden.

Last	Standardfall		hohe Auslastung		niedrige Auslastung	
	Anteil Betriebsstunden	durchschn. Last	Anteil Betriebsstunden	durchschn. Last	Anteil Betriebsstunden	durchschn. Last
25%	20%	70%	0%	85%	20.0%	63%
50%	20%		20%		30.0%	
75%	20%		20%		30.0%	
100%	40%		60%		20.0%	
Sparpotenzial durch DVA	ca. 30 %		ca. 15 %		ca. 45 %	

E:\1039\3-Bearb\EM[Grundlagen.xls]Bedarfsprofil

Tabelle 4 Annahmen für unterschiedliche Lastprofile

4.3 Berechnungsmodell Nutzenergiekosten

4.3.1 Vorbemerkung

Im Folgenden wird ein klassisches Berechnungsmodell für die Ermittlung der Nutzenergiekosten - d.h. im vorliegenden Fall die Gestehungskosten des eingesparten Strombedarfs - entworfen. Dieses Modell umfasst alle technisch-ökonomischen Faktoren, wie sie im Rahmen von konkreten Planungsprozessen berücksichtigt werden. Die Methodik entspricht wie im Basisprojekt Technologiemonitoring einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung gemäss SIA-Norm 480.

In der Praxis ist häufig auch eine grobe Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmassnahmen anhand der Pay-Back-Dauer anzutreffen. Abgesehen davon, dass bei der Pay-Back-Dauer häufig die Zins- und Wartungskosten sowie allfällige Zusatznutzen vernachlässigt werden, verfügt diese Methode über die grundsätzlichen Mängel, dass sämtliche Effizienzgewinne nach dem Pay-Back Zeitpunkt ignoriert werden. Massnahmen mit unterschiedlicher Lebensdauer werden dadurch verzerrt wiedergegeben.

Wie am Ende dieses Kapitels ersichtlich sein wird, kann mit einem klassischen Berechnungsmodell, welches die üblichen Parameter berücksichtigt, die derzeitige Marktsituation nicht genügend erklärt werden. Auf die zusätzlich zu berücksichtigenden Faktoren wird dann das folgende Kapitel eingehen.

4.3.2 Berechnungsgang Fallbeispiel

Die Stromeinsparung wird berechnet aus der Differenz des Strombedarfes eines Pumpensystems mit drehzahlvariablem Antrieb und dem Strombedarf eines Pumpensystems mit Drosselregelung. In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass die Wellenleistung der Pumpe im Auslegungspunkt (Drosselventil voll geöffnet resp. volle Drehzahl) 2.2, 11 resp. 55 kW beträgt. Die Kosten für das Drosselorgan (Ventil oder Klappe) werden nicht berücksichtigt, da diese oft auch installiert werden, wenn die Pumpe drehzahlvariabel betrieben wird. So kann ein Strangreguliertventil zum Abgleich der Fördermenge bei voller Drehzahl und gleichzeitig für eine Durchflussmessung genutzt werden.

Berücksichtigt werden nur die Veränderungen der bezogenen Wirkleistung. In der Praxis führt ein drehzahlvariabler Antrieb auch zu einer Reduktion der bezogenen Blindleistung. Allerdings fällt diese ökonomisch weit weniger ins Gewicht und wird deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Drehzahlvariabler Antrieb:

Der Strombedarf kann ausgehend von dem Lastprofil über die Abhängigkeit der Wellenleistung der Pumpe von der Last und über den Wirkungsgrad von Elektromotor und Wechselrichter ermittelt werden:

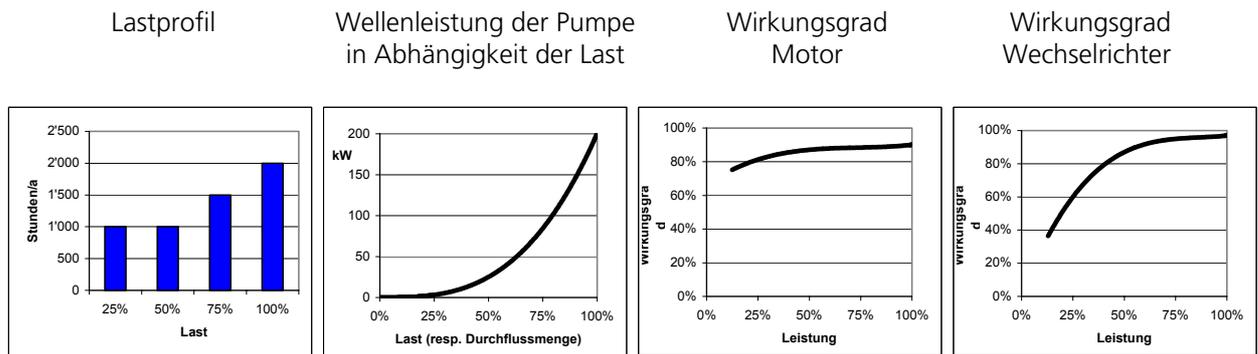


Bild 7. Berechnung der Leistungsaufnahme einer Pumpe mit drehzahlvariablem Antrieb

Bei drehzahlvariablen Antrieben kann die Wellenleistung der Pumpe für verschiedene Fördermengen über die Abhängigkeit der hydraulischen Leistung von der Fördermenge und vom Wirkungsgrad der Pumpe bestimmt werden. Wie bereits erwähnt, hängt die Wellenleistung der Pumpe entsprechend der folgenden Formel von der dritten Potenz des Förderstromes ab:

$$P_w = K \cdot V^3 / 3 \cdot 600 / \eta \quad (\text{in kW})$$

wobei: K: Rohrnetzkonstante
V: Fördermenge [m³/h]
η: Wirkungsgrad der Pumpe

Bei der drehzahlvariabel betriebenen Pumpe kann angenommen werden, dass der Wirkungsgrad der Pumpe unabhängig von der Drehzahl konstant bleibt. Der in Realität festzustellende geringfügige Abfall des Wirkungsgrades bei Drehzahlen unter 30 % der maximalen Drehzahl wird vernachlässigt.

Für den Wirkungsgrad des Wechselrichters im Teillastbetrieb gehen wir davon aus, dass die Verlustleistung bei halbiertes Leistung lediglich um 20 % zurückgeht. Der Wirkungsgrad nimmt damit unterhalb von 50 %-Last stark ab.

Antrieb mit Drosselregelung:

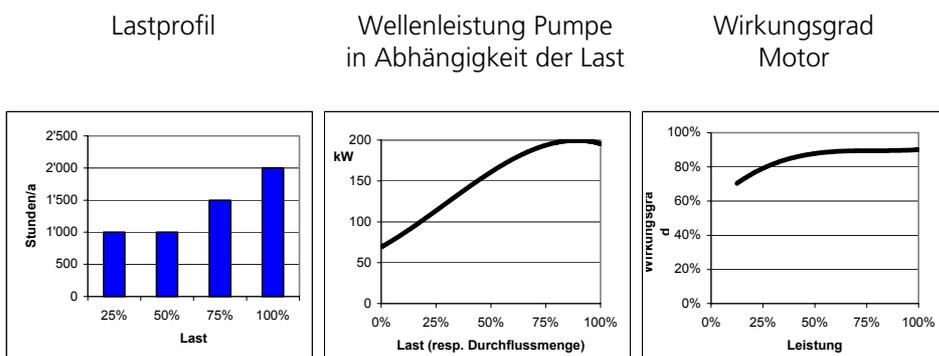


Bild 8. Berechnung der Leistungsaufnahme einer Pumpe mit Drosselregelung

Bei einer Drosselregelung kann die Wellenleistung der Pumpe für verschiedene Fördermengen über das Datenblatt einer typischen Kreiselpumpe ermittelt werden.

Der Wirkungsgrad von Elektromotoren wird von den Herstellern üblicherweise für die Nenndrehzahl und 50 %, 75 % sowie 100 % Last angegeben. Der Verlauf des Wirkungsgrades unterhalb von 50 % Last muss näherungsweise angenommen werden.

4.3.3 Bestimmung der Monitoring-Faktoren

Beurteilung der Dynamik der bisherigen Entwicklung

Die Investitionskosten für Wechselrichter sind in den letzten 10 Jahren sehr stark gesunken. Neben den gesteigerten Produktionszahlen hat sich vor allem bei kleinen Leistungen die Entwicklung von Antrieben mit integriertem Wechselrichter positiv ausgewirkt.

Die vom Wechselrichter erzeugten Oberwellen konnten in der Vergangenheit deutlich reduziert werden. So ist es seit einiger Zeit nicht mehr nötig, teurere Motoren mit einer verbesserten Isolation einzusetzen.

Die Installationskosten haben sich ebenfalls durch die Einführung von Motoren mit integriertem Wechselrichter deutlich reduziert. Bei integrierten Antrieben beschränkt sich der Installationsaufwand auf die Inbetriebnahme von Wechselrichter und Drehzahlregulierung.

Nach wie vor wird beim Einsatz drehzahlvariabler Antriebe mit einer kürzeren Nutzungsdauer gerechnet wie beim Einsatz eines Antriebes mit fester Drehzahl (üblicherweise 12 Jahre anstelle von 15 Jahren). Die kürzere Nutzungsdauer lässt sich einerseits mit der im Wechselrichter eingesetzten Leistungselektronik wie auch mit der stärkeren Beanspruchung des Motors durch die vom Wechselrichter erzeugten Oberwellen begründen. Im industriellen Umfeld erscheint eine Nutzungsdauer von 12 Jahren allerdings unkritisch.

Die Verluste des Wechselrichters konnten durch eine verbesserte Leistungselektronik minimiert werden.

Die Leistungselektronik von Wechselrichtern verlangt keine regelmässigen Unterhaltsarbeiten. Wartungskosten entstehen deshalb vor allem in der Form von Kosten zur Behebung von Störungen. Nach Aussage von Spezialisten hat sich die Störungsanfälligkeit in den letzten zehn Jahren spürbar verbessert. Durch eine Fernüberwachung können die Störungen zudem oft günstiger und rascher behoben werden.

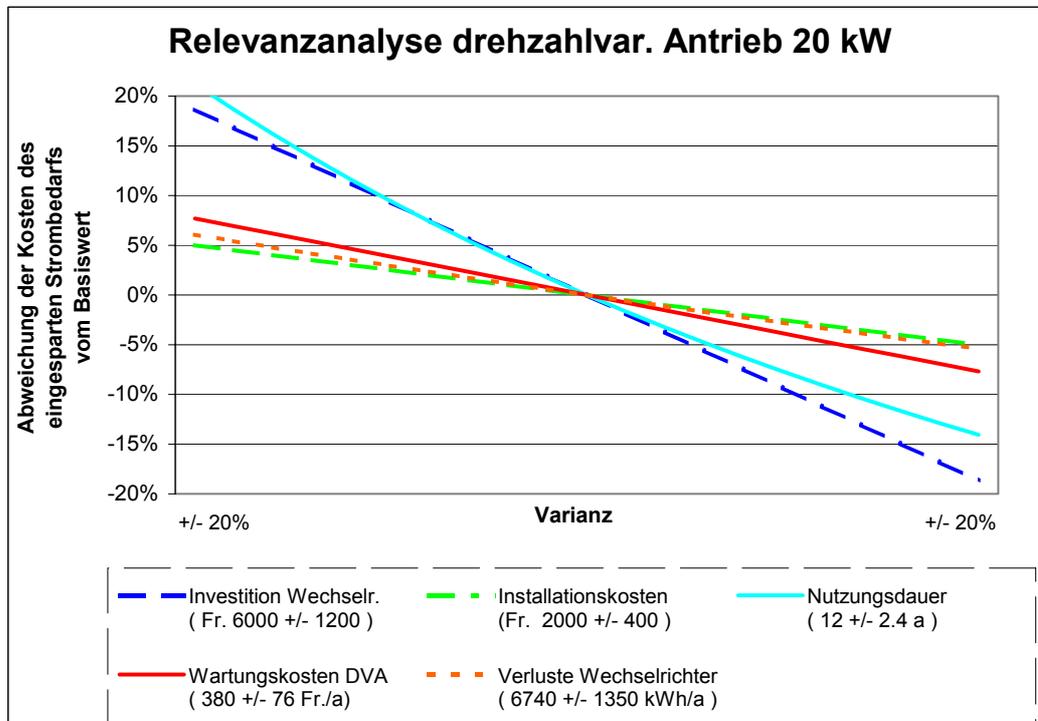
Beurteilung der Dynamik der künftigen Entwicklung

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Kosten für drehzahlvariable Antriebe weiter deutlich fallen. Aufgrund der fortschreitenden Markteinführung dürfte sich der Prozess allerdings verlangsamen.

Bei den Installationskosten, den Verlusten des Wechselrichters und den Wartungskosten dagegen erscheint eine weitere deutliche Reduktion kaum mehr möglich.

(Stromgestehungskosten-) Relevanz

Die folgende Darstellung zeigt den Einfluss einer Veränderung der wichtigsten Faktoren um $\pm 20\%$ auf die Gestehungskosten des eingesparten Stromverbrauchs.



G:\2003\1039\3-Bearb\EM\Monitoring-EM-a.xls]Relevanzanalyse 20kW

Bild 9. Sensitivitätsanalyse der Gestehungskosten des eingesparten Stromverbrauchs für drehzahlvariablen Antrieb mit 20 kW (Lastprofil gem. Standardfall)

Lesebeispiel: Eine Änderung der Investitionskosten für den Wechselrichter um $\pm 20\%$ (Fr. 6'000.-- \pm Fr. 1'200.--) bewirkt eine Veränderung der Gestehungskosten des eingesparten Stroms um ca. 20%. Um den Einfluss der Faktoren besser vergleichen zu können, sind Kurven einzelner Faktoren an der 0 %-Linie gespiegelt, so dass sie alle links im positiven Bereich liegen.

Die Relevanz der Verluste des Wechselrichters hängt sehr stark vom gewählten Lastprofil ab. Sie sind vor allem dann von Bedeutung, wenn der Antrieb häufig mit kleiner Drehzahl betrieben wird.

Die Verluste des Elektromotors unterscheiden sich bei drehzahlvariablem Antrieb kaum vom Referenzfall mit Drosselregulierung.

Bestimmung der Monitoring-Faktoren

Die Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring detailliert verfolgt werden, erfolgt anhand einer zusammenfassenden Bewertung der Dynamik der bisherigen und der künftigen Entwicklung und der Relevanz:

	Beurteilung der Faktoren*				Monitoring
	Dynamik		Relevanz	Wert	
	bisherige a	künftige b			
Investitionskosten Wechselrichter	5	3	5	40	ja
Installationskosten	3	1	2	8	nein
Verluste Wechselrichter	2	1	2	6	nein
Nutzungsdauer Antrieb	0	0	5	0	nein
Wartungskosten	1	0	2	2	nein

* Massstab für Beurteilung der Faktoren:

5: sehr dynamische Entwicklung (Änderungen > +/-50% innerhalb von 10 Jahren) resp. sehr grosse Relevanz (Sensitivität > 20%)

0: keine spürbare Dynamik/Relevanz

Tabelle 5 Bestimmung der Monitoring-Faktoren für drehzahlvariable Antriebe

4.3.4 Zusätzlich zu berücksichtigende Faktoren

Es scheint hinlänglich bekannt, dass die wirtschaftlichen Effizienzpotenziale durch drehzahlvariable Antriebe nur zu einem Teil genutzt werden. Die noch bescheidenen Marktanteile für drehzahlvariable Antriebe können somit alleine aufgrund der Gestehungskosten des eingesparten Stromverbrauches nicht erklärt werden. Es liegt somit auf der Hand, dass zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden müssen, um die bisherige wie auch die künftige Marktentwicklung zu untersuchen. Diese Einschätzung wird auch von Fachspezialisten geteilt und entspricht den Ergebnissen anderer Studien zum Thema elektrischer Antriebe wie [De Almeida, et.al., 2000] und [Ostertag, 2002].

Nach Aussage von Vertretern des Schweizerischen Motor Challenge Programms sind es häufig die folgenden Faktoren, welche sich in der Industrie als entscheidendes Hemmnis für den Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben herausstellen, auch wenn diese gemäss dem vorangehenden Kapitel wirtschaftlich rentabel wären:

Transaktionskosten

Die Transaktionskosten umfassen alle Aufwendungen, die bei der Beschaffung eines drehzahlvariablen Antriebes anstelle eines Antriebes mit konstanter Drehzahl bei Endabnehmer, Besteller, Planer und/oder Lieferanten zusätzlich anfallen: Informationskosten, zusätzliche Planungskosten, zusätzliche Ausbildungs- und Einführungskosten, zusätzliche Kosten für die Dokumentation, zusätzliche Installations-, Service- und Betriebsausfallrisiken soweit sie nicht in den höheren Anschaffungskosten bereits enthalten sind. Insofern sind bei unseren Betrachtungen nur die Transaktionskosten relevant, die beim Endabnehmer oder beim Planer anfallen. Von Bedeutung ist hier insbesondere der Mehraufwand, der zu betreiben ist, wenn drehzahlvariable Antriebe als Option zu Antrieben mit fester Drehzahl geprüft werden. Unwesentlich ist, ob die Transaktionskosten beim Endabnehmer selbst geleistet oder beim beauftragten Planer anfallen. Die Transaktionskosten, die beim Lieferanten anfallen, sind in den Gerätekosten eingerechnet und werden damit bereits berücksichtigt.

Die Transaktionskosten werden in verschiedenen Studien als sehr einschneidendes Hemmnis für Effizienzsteigerungsmassnahmen an elektrischen Antrieben bewertet (siehe [De Almeida, et.al., 2000] und [Ostertag, 2002]). So kommt z.B. [Ostertag, 2002] zum Schluss, dass im industriellen Umfeld die Transaktionskosten für die untersuchten hocheffizienten Motoren praktisch gänzlich eliminiert werden müssen, damit das bedeutende wirtschaftliche Potenzial genutzt wird.

Erhöhte Störanfälligkeit

Durch die Leistungselektronik des Wechselrichters besitzen drehzahlvariable Antriebe gegenüber Antrieben mit fester Drehzahl konstruktionsbedingt eine erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit. Betriebsausfälle können in der Industrie je nach Betrieb empfindliche Produktionsausfälle und enorme

Folgekosten nach sich ziehen. Es liegt auf der Hand, dass unter diesen Umständen der Störanfälligkeit besondere Beachtung geschenkt wird.

In [De Almeida, et.al., 2000] wird die Störanfälligkeit als eines von vier entscheidenden Hemmnissen für die Verbreitung von drehzahlvariablen Antrieben aufgeführt, wobei zugleich erwähnt wird, dass die Störanfälligkeit aufgrund von früher installierten Antrieben überbewertet wird.

Netzurückwirkungen

Wechselrichter erzeugen bei ihrer Arbeit Netzurückwirkungen, welche durch Oberwellen (Spannungswellen mit einem Mehrfachen der Netzfrequenz) beschrieben werden können und oft auch kurz als Oberwellen bezeichnet werden. Die gegenüber der Netzfrequenz schnelleren Spannungsänderungen der Oberwellen breiten sich über das Netz aus und können bei anderen Geräte zu Problemen führen. Insbesondere die Isolation des angeschlossenen Motors wird bei grossem Oberwellenanteil stärker belastet, was die Lebensdauer des Motors deutlich reduzieren kann.

4.3.5 Verwendete Erfahrungswerte

Für die Faktoren, welche nicht mit einem Monitoring analysiert werden, werden folgende Erfahrungswerte verwendet:

Faktor	verwendete Werte
Mehrkosten Installation/Inbetriebsetzung drehzahlvariablen Antrieb: - 1994 für 2.2 / 11 / 55 kW - 2004 für 2.2 / 11 / 55 kW	Fr. 750 / 1'000 / 1'250.-- Fr. 500 / 750 / 1'000.--
Wartungskosten Frequenzumformer	5 % der Investitionskosten pro Jahr
Nutzungsdauer Frequenzumformer	12 Jahre

Tabelle 6 Verwendete Erfahrungswerte

Vermiedene Beschaffungskosten für Elektrizität

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von drehzahlvariablen Antrieben erfolgt anhand eines Vergleichs der Gestehungskosten des eingesparten Stromverbrauchs mit den vermiedenen Beschaffungskosten für Elektrizität. Die letzteren variieren sehr stark in Abhängigkeit von der Grösse des betroffenen Betriebes. Während die Elektrizitätspreise für kleinere Gewerbebetriebe bei über 20 Rp./kWh liegen, bezahlen grosse Industrieunternehmen weniger als 10 Rp./kWh.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit verwenden wir folgende Preiskategorien⁷:

	Elektrizitätspreis (2003)	Bezeichnung BfS
mittlerer Gewerbebetrieb (150'000 kWh/a, max. 75 kW)	19.2 Rp./kWh	Industrie Typ III
sehr grosser Industriebetrieb (>20 GWh/a)	8.3 Rp./kWh	Industrie, EK 20

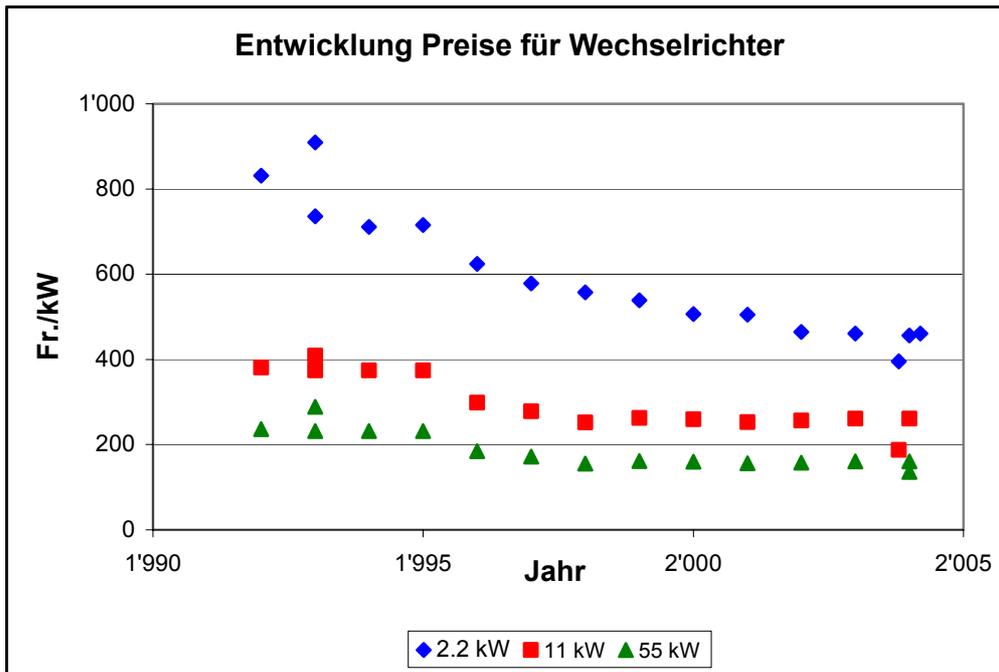
Tabelle 7 Elektrizitätspreise gem. Bundesamt für Statistik zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit

⁷ gem. Bundesamt für Statistik Produzenten und Importpreisindex

4.4 Bisherige Entwicklung / aktueller Stand

4.4.1 Entwicklung der Investitionskosten für den Wechselrichter

Die Preise für Frequenzumformer haben sich in den vergangenen 10 Jahren in etwa halbiert (siehe folgende Darstellung). Bei kleineren Umformern ist die Preisrückgang grösser als bei grösseren Einheiten (rund 62 % / 54 % / 45 % bei 2.2 / 11 / 55 kW).



G:\2003\1039\3-Bearb\EM\Monitoring-EM-b.xls\Ergebnisse-Allg Ber 1

Bild 10. Entwicklung der spezifischen Kosten von Wechselrichtern

Die Preisreduktion ist primär durch wesentlich gesunkene Kosten für die leistungselektronischen Bauteile (Halbleiter) möglich geworden. Einen deutlichen Einfluss hatte zudem die Entwicklung von standardisierten Steuerungen auf der Basis von integrierten Schaltungen (Chips) sowie die fortschreitende Automatisierung der Produktion. Heute erfolgt nicht nur die Produktion und die Prüfung der Frequenzumformer automatisiert, sondern auch das Handling (z.B. Verpackung).

Mit der Entwicklung von EDV-Werkzeugen (z.B. zum Projektieren und Bestellen) konnte der Aufwand der Anbieter für Beratung und Support in den letzten 10 Jahren deutlich reduziert werden. Eine wichtige Rolle spielt sicher auch die Tatsache, dass zunehmend mehr Planer, Installateure und Endabnehmer mit dem Einsatz von Frequenzumformern vertraut sind.

Die Wettbewerbsintensität ist bei den drehzahlvariablen Antrieben relativ hoch, was sich u.a. darin ausdrückt, dass die Preise der verschiedenen Anbieter für vergleichbare Produkte sehr eng beieinander liegen. Auch die Tatsache, dass die Ausstattungsmerkmale der verschiedenen Produkte weitgehend entsprechen, deutet auf einen hohen Reifegrad der Technologie hin.

Die grossen Hersteller vertreiben ihre Produkte weltweit und erreichen damit sehr grosse Stückzahlen (kumulierte Produktion mehrere Millionen Stück). Der Schweizer Markt wird von relativ vielen Anbietern bearbeitet (50 oder mehr). Zu berücksichtigen sind jedoch das breite Anwendungsfeld von Frequenzumformern, das mittlerweile erreichte Marktvolumen (> 70 Mio Fr./a) und die Tatsache, dass die Anbieter in der Regel einen ganzen Marktbereich abdecken (z.B. Automatisierung und Antriebe).

4.4.2 Transaktionskosten

Abschätzung der Transaktionskosten für drehzahlvariable Antriebe

Die Transaktionskosten für die Beschaffung eines drehzahlvariablen Antriebes unterscheiden sich sehr stark, je nachdem, ob ein solcher Antrieb zum ersten Mal in Erwägung gezogen wird oder ob er zum wiederholten Male erworben wird. Der Beschaffung des ersten drehzahlvariablen Antriebes geht häufig eine kritische Prüfung voraus, wobei die grundsätzlichen Vor- und Nachteile in Erfahrung gebracht werden und ein geeigneter Anbieter gewählt wird. Bei der wiederholten Beschaffung sind die Vor- und Nachteile weitgehend bekannt. Es geht i.d.R. lediglich darum zu prüfen, ob sich der Mehraufwand für eine Drehzahlsteuerung lohnt und gegebenenfalls ein weiteres Exemplar vom bereits evaluierten Lieferanten zu beziehen.

Vor dem erstmaligen Erwerben eines drehzahlvariablen Antriebes fällt vor allem der Aufwand für die Informationsbeschaffung ins Gewicht. In der Regel informiert sich der Endabnehmer über grundsätzliche Vor- und Nachteile, Kosten, Erfahrungen aus der Praxis. Zudem werden die Einsatzmöglichkeiten im Betrieb grob beurteilt, ein Produkt evaluiert und evtl. bereits grobe Grundsätze festgelegt, wo der Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben geprüft werden soll. Ein Arbeitsaufwand von ein bis zwei Arbeitstagen scheint dafür realistisch. In grösseren Betrieben mit zentraler Beschaffung kann der Aufwand auch wesentlich höher liegen.

Zusätzlich sind für die erstmalige wie auch für jede weitere Beschaffung folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Prüfen, ob sich der Einsatz eines drehzahlvariablen Antriebes lohnt
Der Aufwand unterscheidet sich sehr stark, je nachdem, ob ein Antrieb neu installiert wird oder ein bestehender Antrieb mit einer Drehzahlsteuerung nachgerüstet werden soll. Bei einem neuen Antrieb sind die Betriebspunkte der Anlage bekannt, da diese zur Dimensionierung der Anlagekomponenten ohnehin benötigt werden. Soll hingegen geprüft werden, ob sich eine Nachrüstung lohnt (Retrofit), müssen die Betriebspunkte zuerst bestimmt werden. Oft sind dazu Messungen notwendig. Bei grösseren Antrieben wird in der Regel genauer abgeklärt, ob sich der Einsatz eines drehzahlvariablen Antriebes lohnt. Bei kleineren Antrieben wird soweit möglich versucht, nach einfachen Grundsätzen zu entscheiden, da sonst die Kosten für die Abklärung höher liegen, als die Mehrkosten für eine Drehzahlregulierung.
- Festlegen einer Steuer- und Regelstrategie; Funktionsprüfung durch Planer oder Endabnehmer (inkl. Steuerung/Regelung)⁸
Hier kann für die wesentlichen Anwendungsbereiche auf Standardlösungen der Hersteller zurückgegriffen werden, was den Aufwand stark reduziert.
- Mehraufwand für Bestellung und Abrechnung
Der Frequenzumformer ist (ausser bei integrierten Lösungen) eine zusätzliche Komponente.
- Instruktion der Betreiber
Die Betreiber müssen in der Lage sein, die Geräte zu bedienen und evtl. einfache Störungen zu beheben.
- Evtl. Lagerhaltung von zusätzlichen Ersatzteilen
Grosse Betriebe haben teilweise von allen wichtigen Komponenten Ersatzteile an Lager.

Bisherige Entwicklung

Wesentlich für das Technologiemonitoring ist die Tatsache, dass die Transaktionskosten abhängig sind vom Produkt, insbesondere von der Art und Weise, wie dieses angeboten wird sowie von der Position dieses Produktes im Produktlebenszyklus.

⁸ Aufwand für Einbau, Anschluss und Inbetriebsetzung des Frequenzumformers sind in den Installationskosten bereits eingerechnet.

Im Vergleich zu Nischenprodukten, welche nur wenige Hersteller auf Anfrage liefern, ist der Aufwand für die Informationsbeschaffung von breit angebotenen Produkten wesentlich geringer. Frequenzumformer werden erst seit Mitte der 80er Jahre in bedeutendem Ausmass eingesetzt und gelten mittlerweile in der Regel als ausgereifte Technologie. Hinzu kommt, dass junge Endabnehmer und Planer drehzahlvariable Antriebe bereits von der Ausbildung her kennen. Es kann daher angenommen werden, dass Informationen heute rascher verfügbar sind und wohl auch weniger umfangreich gesammelt und weniger kritisch geprüft werden, wie noch zu Beginn der 90er Jahre. Wir schätzen, dass die Transaktionskosten für die erstmalige Beschaffung eines drehzahlvariablen Antriebes zu Beginn der 90er Jahre noch rund doppelt so hoch gelegen sind, wie heute (2 - 4 Arbeitstage gegenüber heute 1 - 2 Arbeitstage)

Für die Planung von Antriebslösungen wurden (und werden noch) EDV-Werkzeuge entwickelt, welche auch die Energieeffizienz berücksichtigen. Sie unterstützen die Anlageplaner u.a. bei der Klärung, wo sich der Einsatz eines drehzahlvariablen Antriebes lohnt und auch bei der Suche nach einem geeigneten Produkt. Bei der Frage, ob es sich lohnt, einen bestehenden Antrieb nachzurüsten, bleibt allerdings der Aufwand weitgehend unverändert, da der Aufwand zur Bestimmung der Betriebspunkte kaum reduziert werden kann.

Durch die grösseren Oberwellen von älteren Frequenzumformern (siehe auch folgendes Kapitel) musste früher geprüft werden, ob der anzuschliessende Motor für den Betrieb mit dem Frequenzumformer geeignet ist, resp. es musste ein entsprechender Motor bestellt werden.

Die Bedienung der Geräte (z.B. Veränderung von Sollwerten) ist wesentlich vereinfacht worden. Damit ist der Aufwand für die Betreiber, um sich mit den Frequenzumformern vertraut zu machen, wesentlich gesunken.

Insgesamt dürften sich die Transaktionskosten dank der aufgeführten Punkte seit Beginn der 90er Jahre vor allem bei neuen Antrieben deutlich reduziert haben. Quantitativ lässt sich dies im Nachhinein nur grob schätzen. Wir gehen bei neuen Antrieben von einer Reduktion um 50 – 100 % aus. Der zusätzliche Aufwand für das Bestimmen der Betriebspunkte bei Retrofit-Projekten hat sich hingegen kaum verändert.

Wie erwähnt, lassen sich die Transaktionskosten nur grob schätzen. Zur Veranschaulichung der Auswirkungen der Transaktionskosten verwenden wir die folgenden Werte:

Transaktionskosten [Fr.]	2 kW		10 kW		50 kW	
	1990	2004	1990	2004	1990	2004
Einmalige:	1'000 - 2'500					
Wiederkehrende:						
- neuer Antrieb	350	200	600	350	600	350
- Retrofit zusätzlich	200		600		1'500	

Tabelle 8 Grobe Schätzung der heutigen Transaktionskosten für drehzahlvariable Antriebe

4.4.3 Weitere Entwicklungen

Störanfälligkeit

In den 80er Jahren war die Zuverlässigkeit der Leistungselektronik noch deutlich geringer wie diejenige von anderen elektrotechnischen Komponenten (Stell- und Schalterglieder, Motoren, Sensoren, etc.). Frequenzumformer haben zu Beginn insbesondere Spannungsspitzen oder Spannungseinbrüche schlecht vertragen. Durch verbesserte Halbleiter (mit höherer Sperrspannung) und Kondensatoren konnte die Zuverlässigkeit jedoch wesentlich verbessert werden. Die Ausfallraten von Wechselrichtern liegen seit einigen Jahren deutlich unter einem Prozent (über die Lebensdauer gemessen). Die Zuverlässigkeit wird von erfahrenen Endkunden und Planern kaum mehr kritisch beurteilt.

Die Probleme mit der Zuverlässigkeit von frühen Frequenzumformern haben aber das Image für lange Zeit negativ beeinflusst. Obwohl sich dies mit zunehmender Verbreitung wieder korrigiert hat, wird die Zuverlässigkeit nach Aussage von Anbietern von potenziellen Abnehmern ohne eigene Erfahrung teilweise heute noch massiv unterschätzt.

Einige Hersteller können für erhöhte Anforderungen umfassend getestete Wechselrichter anbieten, womit eine nochmals höhere Zuverlässigkeit erreicht wird. Ansonsten werden bei kritischen Anwendungen drehzahlvariable Antriebe - wie herkömmliche Motoren auch - redundant ausgeführt.

Netzurückwirkungen

Durch die grösseren Oberwellen von älteren Frequenzumformern haben bei den angeschlossenen Motoren zu Problemen geführt, indem die Isolation der Motoren übermässig beansprucht worden ist. Dies hat zu Defekten bei den Motoren resp. zu einer verkürzten Lebensdauer geführt.

Noch vor 10 Jahren musste deshalb beim Nachrüsten eines bestehenden Motors zuerst geprüft werden, ob dieser für den Betrieb mit dem Frequenzumformer geeignet ist. Bei neuen Antrieben musste ein entsprechender Motor bestellt werden (siehe auch vorhergehendes Kapitel). Es ist offensichtlich, dass solche Umstände das Vertrauen in die neue Technologie geschwächt haben.

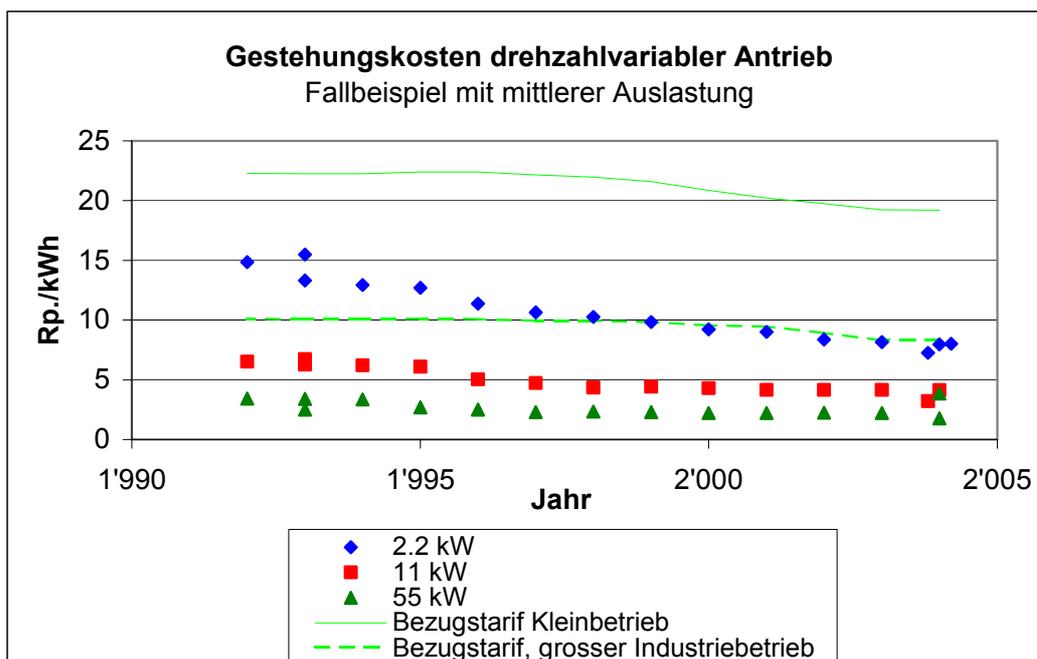
Durch technologische Weiterentwicklungen bei den Leistungstransistoren sowie durch den Einsatz von Drosselspulen oder Netzfilter konnten die Netzurückwirkungen deutlich reduziert werden. Heute sind beim Einsatz eines entsprechend ausgestatteten Frequenzumformers kaum mehr nennenswerte Probleme zu erwarten.

Installationskosten

Die Kosten für die elektrischen Anschlüsse dürften sich in den letzten Jahren kaum verändert haben. Jedoch hat sich der Aufwand für die Inbetriebnahme wesentlich reduziert. Die Inbetriebsetzung erfolgt heute in der Regel weitgehend automatisiert mit einem angeschlossenen Laptop. Der Aufwand beträgt heute noch eine bis zwei Stunden (u.a. sind die Anschlüsse zu überprüfen) – vor 10 Jahren musste noch mit einem gut doppelt so hohen Aufwand gerechnet werden.

4.4.4 Entwicklung der Gestehungskosten des eingesparten Strombedarfs

Die Halbierung der Preise der Wechselrichter in den vergangenen 10 Jahren hat sich in entsprechender Weise auf die Gestehungskosten des eingesparten Stromverbrauches ausgewirkt. Zusammen mit der erhöhten Zuverlässigkeit und den geringeren Netzurückwirkungen hat dies die Attraktivität von drehzahlvariablen Antrieben massiv erhöht. Die folgende Darstellung zeigt die Entwicklung der Stromgestehungskosten für das untersuchte Fallbeispiel bei einem Antrieb mit mittlerer Auslastung (Verbrauchsreduktion durch Drehzahlregulierung um 30 %; 5'000 h/a).



G:\2003\1039\3-Bearb\EM\Monitoring-EM-b.xls\Ergebnisse-Allg Ber 2

Bild 11. Entwicklung der Gestehungskosten des eingesparten Strombedarfes gem. Fallbeispiel für einen Antrieb mit mittlerer Auslastung

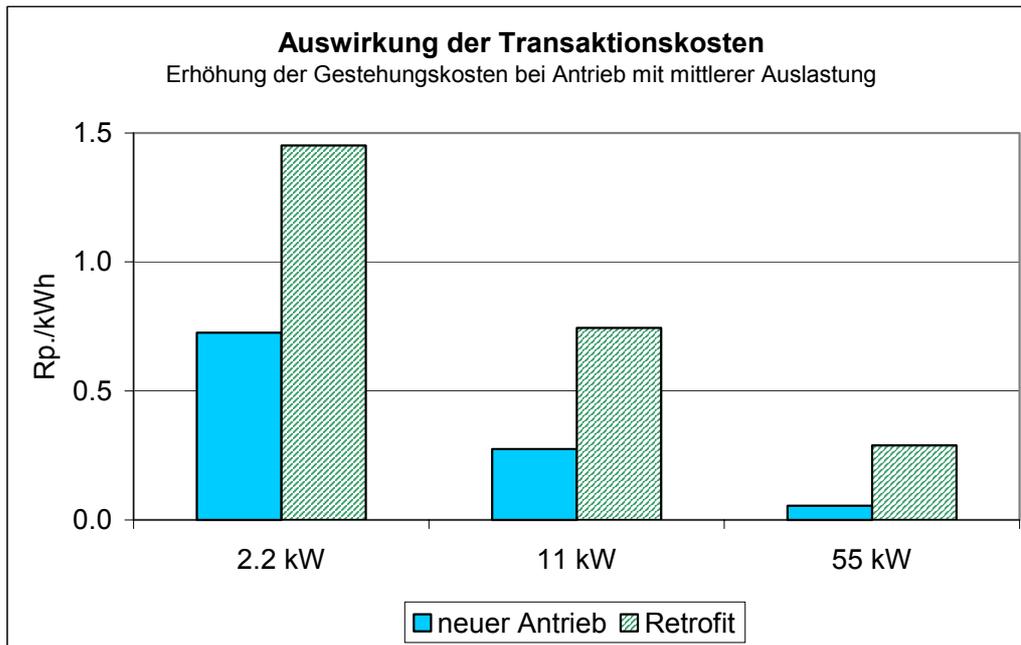
Die Wirtschaftlichkeitsschwelle von drehzahlvariablen Antrieben hat sich mit den sinkenden Stromgestehungskosten zunehmend in Richtung von Antrieben mit geringerer Betriebsstundenzahl oder höherer Auslastung verschoben. Dies bedeutet, dass sich das wirtschaftliche Potenzial deutlich vergrössert hat. Die obige Darstellung zeigt, dass bei Anwendungen mit mittlerem Sparpotenzial für alle untersuchten Leistungsklassen interessante Gestehungskosten für den vermiedenen Strombedarf resultieren. Nur bei Anwendungen mit einer hohen Auslastung (geringes Sparpotenzial) oder wenig Betriebsstunden erscheint die unterste untersuchte Leistungskategorie (2.2 kW) in sehr grossen Betrieben mit tiefen Bezugstarifen unwirtschaftlich.

Drehzahlvariable Antriebe haben sich denn auch in einzelnen Anwendungsbereichen (z.B. bei Heizungspumpen) weitgehend als Standardlösung durchgesetzt. Allerdings ist es nach übereinstimmender Aussage der interviewten Branchenvertreter bei weitem nicht so, dass das wirtschaftlichen Potenzial heute vollständig genutzt würde. Trotz einer ausgereiften Technologie werden also offensichtlich die bedeutenden wirtschaftlichen Effizienzsteigerungspotenziale nur ungenügend genutzt. Es ist offensichtlich, dass andere Faktoren dabei eine entscheidende Rolle spielen müssen.

Transaktionskosten

Die folgende Grafik zeigt, um welchen Betrag sich die Gestehungskosten des eingesparten Strombedarfes erhöhen, wenn die wiederkehrenden Transaktionskosten⁹ mitberücksichtigt werden.

⁹ Widerspiegelt den Aufwand, um zu prüfen, ob sich der Mehraufwand für eine Drehzahlsteuerung bei einem bestimmten Antrieb lohnt und gegebenenfalls ein weiteres Exemplar vom bereits evaluierten Lieferanten zu beziehen.



G:\2003\1039\3-Bearb\EM\Monitoring-EM-b.xls]Ergebnisse-Allg Ber 4

Bild 12. Zusätzliche Beiträge zu den Gesteuerungskosten des vermiedenen Stromverbrauchs bei Berücksichtigung der Transaktionskosten; die Zahlen stehen für einen Antrieb mit mittlerer Auslastung

Die Darstellung zeigt, dass die wiederkehrenden Transaktionskosten nur bei der niedrigsten untersuchten Leistungskategorie (2.2 kW) einen spürbaren Einfluss haben. Hier dürfte vor allem bei grossen Industriebetrieben mit niedrigen Strombezugskosten ein Teil des Potenziales durch die Berücksichtigung der Transaktionskosten unwirtschaftlich werden. Andererseits zeigen die Ergebnisse auch, dass es sich vielerorts lohnt, bei bestehenden Anlagen die nachträgliche Installation von Drehzahlregulierungen zu prüfen.

Der Beschaffung des ersten drehzahlvariablen Antriebes geht häufig eine kritische Prüfung voraus, wobei die grundsätzlichen Vor- und Nachteile in Erfahrung gebracht werden und ein geeigneter Anbieter gewählt wird. In Kap. 3.4.2 wird mit einem Aufwand von 1 - 2 Arbeitstagen gerechnet. Diese einmaligen Transaktionskosten verteilen sich bereits in relativ kleinen Betrieben auf mehrere Antriebe, sodass sie rein ökonomisch betrachtet nur in Kleinbetrieben einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von drehzahlvariablen Antrieben haben.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass anhand der monetarisierten Transaktionskosten nur zu einem kleinen Teil erklärt werden kann, wieso die Potenziale durch drehzahlvariable Antriebe in der Industrie nicht optimal ausgeschöpft werden. Entscheidend scheinen vielmehr ungünstige Rahmenbedingungen in vielen industriellen Betrieben zu sein, welche dazu führen, dass auch verhältnismässig geringe Transaktionskosten die Installation einer Drehzahlregulierung verhindern:

- In kleinen Betrieben fehlt oft das notwendige Know-how, um vorhandene Sparpotenziale zu erkennen. Hinzu kommt, dass externe Beratungsleistungen, welche notwendig wären, um die Effizienzpotenziale zu identifizieren, oft grundsätzlich als zu teuer erachtet werden.
- Auch in vielen grossen Betrieben sind die personellen Ressourcen für Planung und Betrieb der technischen Anlagen in den letzten Jahren teilweise massiv reduziert worden. Vielerorts werden diese Aufgaben an externe Firmen vergeben. Diese kommen mit dem Stromverbrauch resp. den Stromkosten, welche in der Regel nur über das ganze Unternehmen - d.h. ohne Zuordnung zu den einzelnen Betrieben - erfasst werden, nicht in Berührung. Intern verfügen die verantwortlichen Mitarbeiter häufig über eine kaufmännische Ausbildung, so dass das Bewusstsein für technologische Effizienzpotenziale den zuständigen Stellen fehlt. Die

unternehmensinternen Strukturen scheinen vielerorts ein entscheidendes Hemmnis für die Verbreitung von drehzahlvariablen Antrieben darzustellen.

- Ventilatoren und Pumpen werden mehrheitlich bei Infrastrukturanlagen (Versorgung des Prozesses mit Kälte-, Wärme-, Luft und Wasser) und nicht im Prozess selbst eingesetzt. Somit können Qualität oder Durchsatzrate des Produktionsprozesses mit drehzahlvariablen Pumpen und Ventilatoren in der Regel nicht positiv beeinflusst werden. Gerade in der Industrie werden Vorteile bei der Produktion viel höher gewichtet als Energieeinsparungen. Es erscheint somit klar, wieso drehzahlvariable Antriebe bei materialverarbeitenden Maschinen deutlich häufiger eingesetzt werden (ca. 40 %) wie bei Pumpen und Ventilatoren (unter 20 %) [De Almeida, et..al., 2000].

Es ist davon auszugehen, dass diese Umstände dazu führen, dass der Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben in vielen Betrieben gar nicht ernsthaft in Erwägung gezogen wird. Dieser Punkt betrifft nicht nur spezifisch Drehzahlsteuerungen, sondern die effiziente Antriebstechnik im Allgemeinen.

Beurteilung der Wirtschaftlichkeit

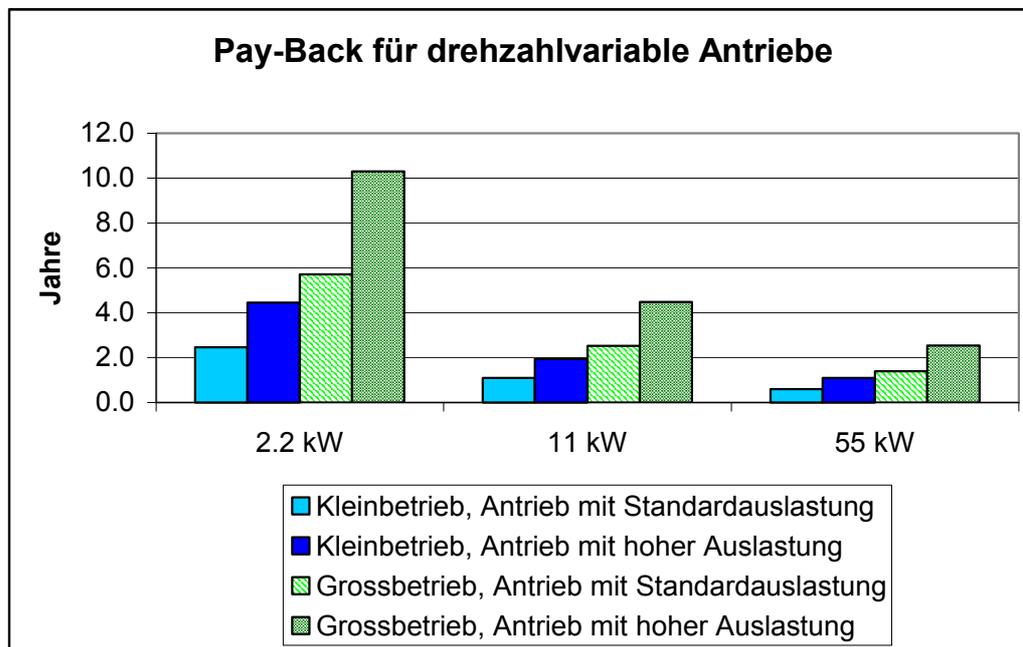
Nach übereinstimmenden Aussagen der interviewten Branchenvertreter wird die Wirtschaftlichkeit von drehzahlvariablen Antrieben in der Industrie anders beurteilt, als oben dargestellt. In der Regel wird die Wirtschaftlichkeit nur bei grösseren Antrieben rechnerisch ermittelt. Bei kleineren Antrieben werden - wenn überhaupt - einfache Grundsätze zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit herangezogen. Eine Rolle spielt dabei sicher auch, dass die (späteren) Lastprofile oft kaum bekannt sind. Wenn überhaupt gerechnet wird, scheint das Berechnen einer Rückzahldauer (Pay-Back) am weitesten verbreitet zu sein. Als Kriterium werden in der Regel sehr kurze Rückzahldauern verlangt (2 - 5 Jahre).

Dieses Kriterium kennzeichnet eher das Investitionsrisiko und weniger zwangsläufig die Rentabilität. Die Berechnung des Pay-Back kann auch dahingehend interpretiert werden, dass für Massnahmen, welche die Qualität des Produktionsprozesses nicht direkt verbessern können, nur eine sehr geringe Risikobereitschaft besteht.

Die Einsparungen, welche ein drehzahlvariabler Antrieb nach der geforderten Pay-Back-Dauer bis zum Erreichen der Lebenserwartung von 12 Jahren erzielt (also der grösste Teil des gesamten Effizienzgewinnes) werden bei der Berechnung des Pay-Back ignoriert. Trotzdem ist diese Betrachtungsweise viel stärker verbreitet, als die Berechnung einer internen Kapitalverzinsung, welche offensichtlich für relativ kleine Einzelmassnahmen als zu umständlich betrachtet wird.

Bei einer Lebensdauer von 12 Jahren entsprechen 2 bis 5 Jahre Pay-Back einer internen Kapitalverzinsung von 17 bis 50 %. Es erscheint damit eher unwahrscheinlich, dass drehzahlvariable Antriebe deshalb nicht eingesetzt werden, weil die knappen finanziellen Mittel in rentablere Vorhaben gesteckt werden (können).

Die folgende Darstellung zeigt die Pay-Back-Zeiten der untersuchten Antriebe:



G:\2003\1039\3-Bearb\EM\Monitoring-EM-b.xls\Ergebnisse-Allg Ber 5

Bild 13. Pay-Back-Dauer von drehzahlvariablen Antrieben als häufig angewendetes Wirtschaftlichkeitskriterium in der Industrie

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Pay-Back-Dauer von 2 - 5 Jahren in grossen Betrieben bereits bei relativ hohen Leistungen (11 kW) kritisch ist. Unter diesen Bedingungen erscheinen nur Antriebe mit hoher Leistung oder sehr geringer Auslastung und hoher Betriebsstundenzahl interessant für den Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben.

Das wirtschaftliche Potenzial erscheint unter diesen Bedingungen massiv kleiner, wie wenn die Gestehungskosten des vermiedenen Strombedarfes mit den Bezugstarifen verglichen werden.

Antriebe in fertig gelieferten Anlagen

Die Mehrzahl der elektrischen Antriebe gelangt als Bestandteil einer fertig gelieferten Anlage oder Maschine zum Endabnehmer.

In Bezug auf die Problematik der Transaktionskosten wäre dies eigentlich als Chance anzusehen, da die Transaktionskosten beim Anbieter anfallen und auf eine Anzahl von Maschinen verteilt werden können. Dieser Vorteil scheint jedoch nicht zu greifen. Offensichtlich gelingt es den Anbietern nicht, den Mehrwert einer effizienten Antriebstechnik glaubhaft darzustellen. Dies liegt sicher zum Teil daran, dass für die zahlreichen betroffenen Maschinen- und Anlagentypen keine energetischen Standards vorhanden sind. So verzichten die Anbieter in der Regel darauf, Mehrkosten für drehzahlvariable Antriebe einzukalkulieren und konzentrieren sich auf das Erzielen tiefer Preise, welche ohne zusätzliche Überzeugungsarbeit für die Auftragsvergabe massgebend sind.

Sind die Anlagen in Betrieb, so wird eine spätere Nachrüstung dadurch erschwert, dass der Endabnehmer auf die Kooperation des Anbieters angewiesen ist, wenn er nicht mögliche Garantiansprüche verlieren will.

4.5 Künftige Entwicklung

4.5.1 Entwicklung der Investitionskosten für den Wechselrichter

Die Leistungselektronik ist eine ausgesprochene Querschnittstechnologie mit einer enormen Fülle von Anwendungen, welche neben der Energietechnik noch zahlreiche weitere Bereiche umfasst (Automobile, Kommunikation, Konsumelektronik, Transport- und Verkehrstechnik). Das Weltmarktvolumen für die Kernkomponenten der Leistungselektronik (Leistungshalbleiter, Leistungs-IC) beträgt heute 17.5 Mrd. \$. Für die kommenden Jahre wird ein Wachstum von 11 % pro Jahr erwartet [Dögl, März, 2004] und aufgrund der immer noch wachsenden Einsatzgebiete ist eine Trendwende kaum abzusehen. Die wichtigsten technologischen Entwicklungsrichtungen umfassen die u.a. weitergehende Systemintegration und die Materialebene (Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen, Steigerung der Leistungsdichte).

Unter weitergehender Systemintegration sind im Bereich der Antriebstechnik insbesondere integrierte Antriebe (Frequenzumformer befindet sich direkt auf dem Motor) zu verstehen. Integrierte Antriebe sind bereits seit einigen Jahren auf dem Markt. Trotz einer möglichen Kosteneinsparung von bis zu 30 % haben sie sich allerdings bis jetzt noch nicht stark verbreitet. Offenbar führen die erhöhten Temperaturen und Erschütterungen noch zu einer geringeren Zuverlässigkeit.

Durch die vorgängig beschriebene weitere Entwicklung der Leistungselektronik kann davon ausgegangen werden, dass auch bei den drehzahlvariablen Antrieben weitere Fortschritte resp. weiterhin sinkende Kosten möglich sein werden. Angesichts der bereits sehr ausgereiften Technologie mit einem sehr hohen Automatisierungsgrad bei der Produktion kann dies keinesfalls ohne weiteres vorausgesetzt werden.

Die weitere Kostenentwicklung kann anhand von Kostendegressionsfaktoren wie im Technologie-Monitoring I abgeschätzt werden [Eicher, Ott, Rigassi, 2003].

Gemäss Kap. 3.1 liegen die Marktanteile für drehzahlvariable Antriebe besonders im mittleren Leistungsbereich noch weit unter dem wirtschaftlichen Potenzial. Grob geschätzt kann angenommen werden, dass sich das Marktvolumen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten um den Faktor 1.5 bis 2.5 erhöhen lässt. Die kumulierte Produktion dürfte dadurch im Zeitraum von 2004 bis 2030 um den Faktor 5.5 bis 8 ansteigen. Ein Vergleich mit anderen Technologien [IEA, 2000] lässt Kostendegressionsfaktoren von 0.85 bis 0.9 als realistisch erscheinen. Unter diesen Annahmen ergibt sich bis 2030 eine Kostenreduktion von 25 % bis 45 %.

Im Rahmen der Studie 'Variable Speed Drives für Electric Motor Systems [De Almeida, et. al., 2000] wurde für den Zeitraum von 1998 bis 2015 eine Kostenreduktion von rund 50 % angenommen. Verglichen damit erscheinen unsere Resultate eher vorsichtig.

4.5.2 Transaktionskosten

Wie bereits im Kap. 3.4 festgestellt wurde, kann die Tatsache, dass das Potenzial von drehzahlvariablen Antrieben in der Industrie mangelhaft ausgeschöpft wird, nur zu einem kleinen Teil mit den monetarisierten Transaktionskosten erklärt werden.

Wir verzichten deshalb hier darauf zu versuchen, die weitere Entwicklung der Transaktionskosten zu quantifizieren. Wesentlich erscheint uns vielmehr eine qualitative Betrachtung, welche zeigt, dass die Bedeutung der Transaktionskosten weiter sinken wird.

Möglich wird dies insbesondere dadurch, dass bei einer weiter zunehmenden Verbreitung der Leistungselektronik die Initialisierungskosten vor der ersten Beschaffung eines drehzahlvariablen

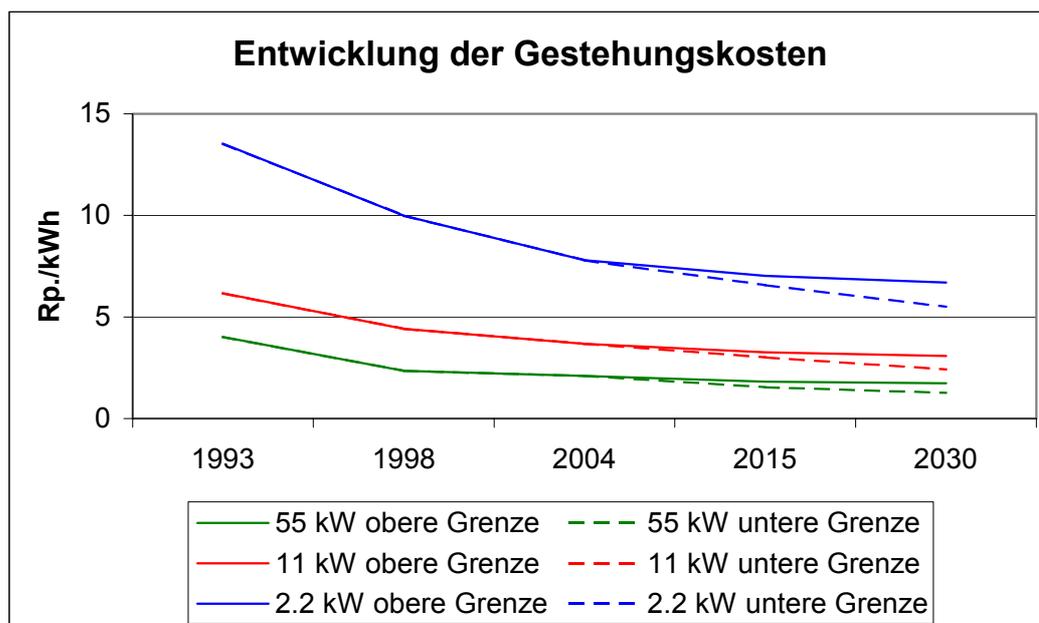
Antriebes wesentlich an Bedeutung verlieren. Dies scheint insbesondere dann wahrscheinlich, wenn drehzahlvariable Antriebe in Zukunft noch verstärkt als Bestandteil einer weiter zunehmenden Automatisierung wahrgenommen werden und folglich weniger in Frage gestellt werden. Wenn sich integrierte Antriebe durchsetzen, wird die Bedeutung der Transaktionskosten zusätzlich sinken, da der Frequenzumformer als Bestandteil des Motors erscheint.

4.5.3 Weitere Entwicklungen

Störanfälligkeit und Netzurückwirkungen von drehzahlvariablen Antrieben sind bereits weitgehend gelöst. Diese Faktoren werden daher die künftige Entwicklung von drehzahlvariablen Antrieben nicht beeinflussen.

4.5.4 Entwicklung der Gesteungskosten des eingespartes Strombedarfes

Die folgende Grafik zeigt die weitere Entwicklung der Gesteungskosten des vermiedenen Strombedarfes, welche sich aufgrund der in den vorhergehenden Abschnitten erarbeiteten Ausgangsgrößen ergibt.



G:\2003\1039\3-Bearb\EM\Monitoring-EM-b.xls]Zukunft Ber1

Bild 14. Entwicklung der Gesteungskosten des vermiedenen Strombedarfes für Antriebe mit mittlerer Auslastung

Es zeigt sich, dass die Gesteungskosten weiter sinken, wenn auch gegenüber den letzten zehn Jahren deutlich verlangsamt. Insgesamt wird dies die Attraktivität von drehzahlvariablen Antrieben weiter erhöhen. An der bisherigen Situation, welche dadurch gekennzeichnet ist, dass lohnenswerte Potenziale ungenutzt bleiben, ändert sich damit jedoch wenig. Wichtiger scheint eher, dass eine sinkende Bedeutung der Transaktionskosten angenommen werden kann.

Somit wird klar, dass längerfristige Erfolge in der Industrie stark abhängig sind von der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmassnahmen, von den betriebsinternen Strukturen resp. vom vorhandenen Bewusstsein (siehe Kap. 3.4.4). Eine Chance für drehzahlvariable Antriebe ergibt sich insbesondere dann, wenn sie in Zukunft noch verstärkt als Bestandteil einer weiter zunehmenden Automatisierung wahrgenommen werden.

4.6 Fazit

Bisherige Entwicklung

Drehzahlvariable Antriebe haben in der vergangenen 10 Jahren durch stark sinkende Kosten und eine verbesserte Zuverlässigkeit an Bedeutung gewonnen. Jedoch bleiben auch heute noch bedeutende lohnenswerte Potenziale ungenutzt.

Als entscheidende Hemmnisse stehen in der Industrie, auf welche im Rahmen der vorliegenden Studie der Focus gelegt wurde, die folgenden Faktoren im Vordergrund:

- **Beurteilung der Wirtschaftlichkeit:**
Als Kriterium für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von kleineren Effizienzmassnahmen wird in der Industrie weitgehend auf eine Rückzahldauer (Pay-Back) von maximal 2 bis 5 Jahren verwendet. Damit wird eher das Investitionsrisiko und weniger zwangsläufig die Rentabilität bewertet. Dies zeigt auch, dass für Massnahmen, welche die Qualität des Produktionsprozesses nicht direkt verbessern können, nur eine sehr geringe Risikobereitschaft besteht.
- **Überbewertung der Transaktionskosten:**
In vielen industriellen Betrieben bestehen ungünstige Rahmenbedingungen, welche zu einer deutlichen Überbewertung der Transaktionskosten führen. In grossen Betrieben sind die modernen Strukturen, welche durch knappe interne personelle Ressourcen und die Auslagerung von Dienstleistungen gekennzeichnet sind, von Bedeutung. In kleinen Betrieben besteht oft eine grundsätzliche Hemmschwelle für den Bezug von 'teuren' externen Beratungsleistungen.

Entwicklungspotenzial

Elektrische Antriebe sind für knapp die Hälfte des Stromverbrauches in der Schweiz zuständig. Das (technische) Sparpotenzial durch Drehzahlregulierung wird auf ca. 10 % des gesamten Stromverbrauches geschätzt, was eine deutliche Erhöhung der Marktanteile bei den neu installierten Antrieben und die Nachrüstung bestehender Antriebe bedingt.

Aufgrund der weiterhin sinkenden Kosten für Wechselrichter und der im Zuge der zunehmenden Verbreitung der Leistungselektronik sinkenden Transaktionskosten kann ein sehr bedeutendes Entwicklungspotenzial vermutet werden.

Erfolgsfaktoren für die Zukunft

Sicher wird die erwartete weitere Preisreduktion die Marktchancen und das Potenzial von drehzahlvariablen Antrieben zusätzlich erhöhen.

Eine Chance für drehzahlvariable Antriebe ergibt sich insbesondere dann, wenn sie in Zukunft noch verstärkt als Bestandteil einer weiter zunehmenden Automatisierung wahrgenommen werden. Dies dürfte für die Schweiz als Produktionsstandort mit hohem Automatisierungsgrad von spezieller Bedeutung sein.

Drehzahlvariable Antriebe haben sich bisher vor allem bei materialverarbeitenden Maschinen etabliert, wo die betriebliche Flexibilität eine grosse Rolle spielt. Deutlich weniger weit fortgeschritten ist die Marktdiffusion dagegen bei Pumpen und Ventilatoren, welche mehrheitlich bei Infrastrukturanlagen (Versorgung des Prozesses mit Kälte-, Wärme-, Luft und Wasser) zum Einsatz kommen. Auch hier ergeben sich neben den energetischen auch betriebliche Vorteile durch die variable Drehzahl, allerdings in weniger ausgeprägtem Masse. Es darf allerdings davon ausgegangen werden, dass die Flexibilität als Zusatznutzen auch hier weiter an Bedeutung gewinnt. Verstärkt wird dies durch die Tatsache, dass drehzahlvariable Antriebe die mechanische Beanspruchung der Anlagen reduzieren und somit zu einem geringeren Wartungsaufwand führen können.

Jedoch müssen für eine erfolgreiche Entwicklung in der Industrie die wesentlichen organisatorischen Hemmnisse (Beurteilung der Wirtschaftlichkeit anhand von Rückzahldauer, betriebsinterne Strukturen und wenig ausgeprägtes Bewusstsein für energetische Aspekte) überwunden werden.

Konsequenzen für die Energiepolitik

Es ist offensichtlich, dass die organisatorischen Hemmnisse für die Diffusion von Energieeffizienzmassnahmen in der Industrie auf entsprechender Ebene angegangen werden müssen. Die Zielvereinbarungen im Rahmen des CO₂-Gesetzes zeigen hier sicher einen gangbaren Weg. Leider muss in Bezug auf drehzahlvariable Antriebe festgestellt werden, dass die Elektrizität von den CO₂-Vereinbarungen nicht betroffen ist. Das Motor Challenge Programm zielt in eine ähnliche Richtung, allerdings bieten hier die gesetzlichen Grundlagen nicht dieselben Voraussetzungen.

Zentrale Aktivitäten des Forschungsprogrammes Elektrizität zielen teilweise sehr direkt auf eine Reduktion der Transaktionskosten. Zu erwähnen ist dabei u.a. das Projekt ProMot, welches Betreibern von elektrischen Antrieben mit einem Software-Werkzeug hilft, die Energieeffizienz von bestehenden Antrieben zu beurteilen und Verbesserungsmaßnahmen zu evaluieren. Reduzierte Transaktionskosten können sicherlich wesentlich dazu beitragen, die Attraktivität von freiwilligen Vereinbarungen im Rahmen des Motor Challenge Programmes zu erhöhen. Damit allerdings wirklich signifikante Verbesserungen der Energieeffizienz erzielbar sind, erscheinen gesetzliche Grundlagen unabdingbar (Einführung einer Lenkungsabgabe wie beim CO₂-Gesetz, wenn mit freiwilligen Massnahmen die gesetzten Ziele nicht erreicht werden). Aufgrund des äusserst vielfältigen Einsatzes von elektrischen Antrieben sind solche übergeordnete gesetzliche Grundlagen sicher viel wirkungsvoller, wie punktuelle gesetzliche Vorschriften für einzelne Einsatzbereiche.

Zu prüfen wäre weiterhin, ob für den Bau von Maschinen und Anlagen Richtlinien und eventuell ein Gütesiegel betreffend Energieeffizienz geschaffen und etabliert werden können. Denkbar wäre beispielsweise, dass eine Richtlinie für den Einsatz von hocheffizienten Elektromotoren, bedarfsabhängigen Steuerungen und drehzahlvariablen Antrieben geschaffen wird. Maschinen und Anlagen, welche entsprechend diesen Richtlinien gebaut werden, können mit einem Gütesiegel für Energieeffizienz ausgezeichnet werden. Machbar wäre auch ein mehrstufiges Verfahren wie bei der Energieetikette. Speziell geeignet wäre ein Gütesiegel für standardisierte Maschinen wie z.B. Druckluftanlagen oder Papiermaschinen, da hier die Richtlinien weiter konkretisiert werden können und die Anwendung vereinfacht wird.

Werden drehzahlvariable Antriebe im Rahmen von Informations-, Ausbildungs- oder Beratungsangeboten gefördert, sind diese als Bestandteil einer weiter zunehmenden Automatisierung darzustellen. Der Zusatznutzen (höhere betriebliche Flexibilität, evtl. längere Wartungsintervalle) ist zudem adäquat zu kommunizieren.

5 Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohngebäude

Vorbemerkung

Komfortlüftungen sind bereits im Projekt 'Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden' [Jakob, Jochem 2003] untersucht worden. Analysiert wurden insbesondere die Investitionskosten sowie die Gestehungskosten der eingesparten Wärme¹⁰ für Neubauten wie auch für Sanierungen. Aufgrund einer Schätzung für die Entwicklung der Investitionskosten bis 2030 wurden auch die künftigen Gestehungskosten ermittelt.

Die Studie kommt zum Ergebnis, dass die Gestehungskosten der eingesparten Wärme bei MFH-Neubauten zwischen 40 und 70 Rp./kWh und bei MFH-Sanierungen unter günstigen baulichen Voraussetzungen zwischen 20 und 50 Rp./kWh liegen.

Folgende Punkte sind im Rahmen der Studie nicht näher untersucht worden:

- Zusatznutzen:
Aufgrund der hohen Kosten der eingesparten Wärme liegt es auf der Hand, dass auch andere Aspekte wie die Energieeinsparung entscheidend für die zunehmende Verbreitung von kontrollierten Wohnungslüftungen sein müssen.
- Nicht optimale bauliche Voraussetzungen bei Sanierungen:
Die Kosten der eingesparten Wärme werden im Sanierungsfall unter der Voraussetzung berechnet, dass keine wesentlichen baulichen Hemmnisse bestehen (u.a. genügend Platz für das Lüftungsgerät, Raumhöhe min. 2.3 m). Dadurch fallen die Investitionen kaum höher aus wie bei Neubauten. Durch den höheren energetischen Gewinn ergeben sich für Sanierungen deutlich niedrigere Wärme gestehungskosten wie für Neubauten. Die effektive Marktentwicklung verläuft allerdings gerade entgegengesetzt. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bei bestehenden Bauten mit anderen Massnahmen (z.B. Ersatz der Fenster) die Wohnqualität mehr gesteigert werden kann wie mit einer Lüfterneuerungsanlage. Zudem ist anzunehmen, dass die baulichen Voraussetzungen oft wesentlich schlechter sind resp. schlechter beurteilt werden, wie in der Studie angenommen.
- Verbesserung des Wirkungsgrades der WRG, weitere mögliche Entwicklungen

Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll deshalb auf diese Aspekte ein besonderes Augenmerk gerichtet werden. Die Arbeiten des Grenzkosten-Projektes dienen als wertvolle Basis.

¹⁰ In der Studie als Grenzkosten der Nutzenergieerduktion bezeichnet

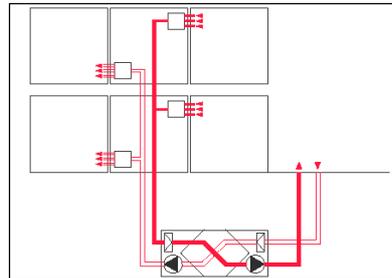
5.1 Marktsituation

5.1.1 Überblick Lüftungssysteme für Niedrigenergiebauten

Mechanische Lüftungssysteme tauschen die Raumluft kontrolliert aus und ermöglichen so gegenüber einer Fensterlüftung eine verbesserte Luftqualität und einen besseren Lärmschutz. Für diese Arbeit sind diejenigen Systeme interessant, welche durch die Reduzierung des Luftwechsels und evtl. durch eine Wärmerückgewinnung eine wesentliche Verminderung der Lüftungswärmeverluste ermöglichen. Im Wesentlichen kommen dafür diejenigen Lüftungssysteme in Frage, welche den Minergie-Standard erfüllen:

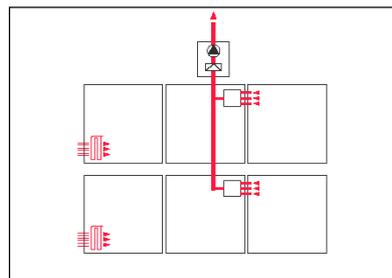
Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung

(evtl. mit Abluftwärmepumpe zur Wassererwärmung oder Zuluftnachwärmung)



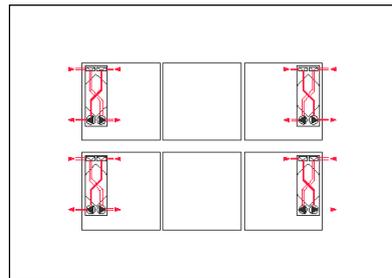
Abluftanlage mit Aussenluft-Durchlässen

(häufig mit Abluftwärmepumpe zur Wassererwärmung)



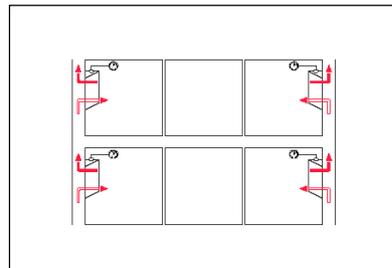
Einzelraumkomfortlüftung

(evtl. mit Abluftwärmepumpe zur Wassererwärmung oder Zuluftnachwärmung)



Automatische Fensterlüftung

(Fenster mit motorischem Antrieb)



Die aufgeführten Systeme können betreffend ihrem energetischen Nutzen und der Häufigkeit der Anwendung wie folgt charakterisiert werden:

	energetischer Nutzen	Häufigkeit der Anwendung
Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung	Mit Abluftwärmepumpe der grösste energetische Nutzen aller Systeme.	Ohne Abluftwärmepumpe bei Minergie das am häufigsten eingesetzte System - auch bei Sanierungen.
Abluftanlage mit Aussenluft-Durchlässen	Wärmerückgewinnung zur Wassererwärmung beim Einsatz einer Abluftwärmepumpe	Bei Minergie das zweithäufig eingesetzte System. Häufig wird eine Abluftwärmepumpe eingesetzt.
Einzelraum-komfortlüftung	Reduzierter Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung	Wird eher selten eingesetzt - vor allem für einzelne Räume.
Automatische Fensterlüftung	Keine Wärmerückgewinnung	Wird eher selten eingesetzt.

Tabelle 9 Charakterisierung von Lüftungssystemen - die Angaben zur Häufigkeit der Anwendung beziehen sich auf Aussagen von Experten.

Das Monitoring wird sich aufgrund des energetischen Nutzens und der grossen Verbreitung auf Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung konzentrieren. Obwohl gegenüber Abluftanlagen ein grösserer Aufwand für die (Zu-) Luftführung betrieben werden muss, wird dieses System auch bei Sanierungen häufiger eingesetzt. Die höheren Kosten scheinen offensichtlich gerechtfertigt durch den höheren Komfort (höhere Zulufttemperatur) und den geringeren Wartungsaufwand (ein zentraler Zuluftfilter).

5.1.2 Marktvolumen

Genaue Zahlen zum Marktvolumen von Lüftungssystemen für Niedrigenergiebauten wurden erstmals im Rahmen des Energie-Clusters in der Arbeitsgruppe Komfortlüftung erhoben (siehe nachfolgende Darstellungen). Die Zahlen vor 2001 sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet und deshalb weniger stark dargestellt.

Eindrücklich ist, wie parallel zum wachsenden Geräteabsatz die Anzahl der Anbieter gestiegen ist. Zu erwähnen ist, dass die Anbieter die Geräte und Komponenten in der Regel nicht selbst herstellen, sondern Geräte (und Komponenten) von grossen, im gesamten europäischen Markt aktiven Herstellern vertreiben.

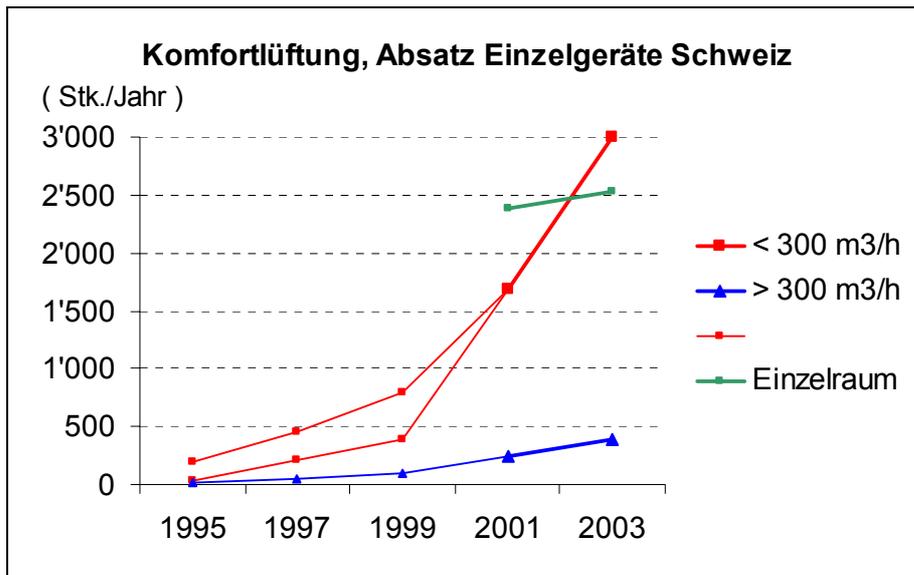


Bild 15. Anzahl verkaufte Komfortlüftungsgeräte [Energie-cluster, Arbeitsgruppe Komfortlüftung, Markterhebung 2004]

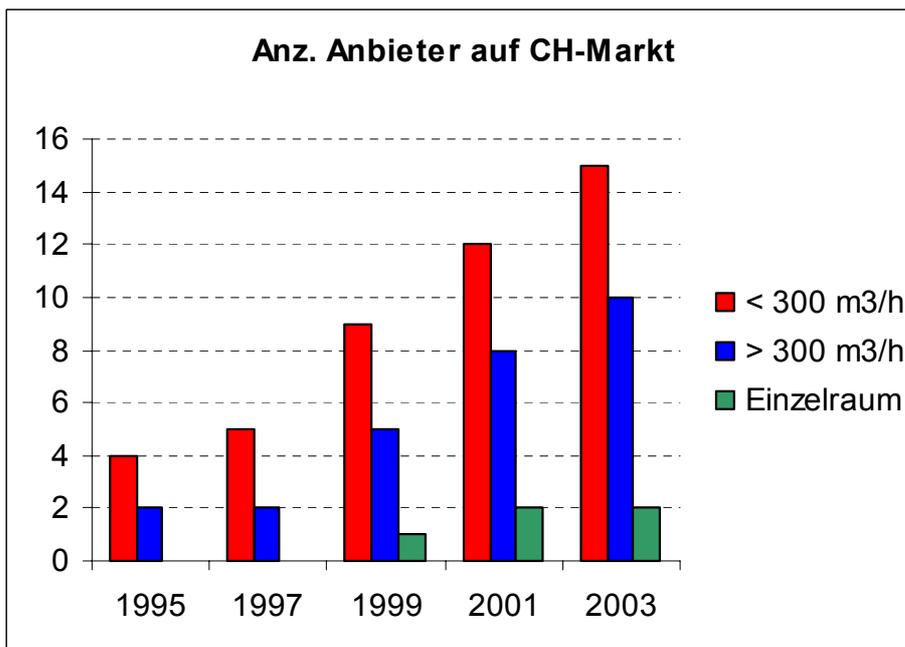


Bild 16. Anzahl Anbieter Komfortlüftungsgeräte [Energie-cluster, Arbeitsgruppe Komfortlüftung, Markterhebung 2004]

Nimmt man für die einzelnen Kategorien der Lüftungsgeräte eine bestimmte Wohnfläche an¹¹, so kann die gesamte mit einer Komfortlüftung ausgestattete Wohnfläche berechnet werden. In den Jahren 2001 und 2003 war diese Wohnfläche in etwa doppelt so gross wie die in den entsprechenden Jahren mit Minergie zertifizierte Wohnfläche (siehe Grafik). Die Einschätzung von Branchenkennern, dass ca. doppelt so viele Gebäude die wesentlichen Anforderungen von Minergie erfüllen (und somit über ein Lüftungssystem in einem Niedrigenergiegebäude verfügen), wie zertifiziert sind, bewahrheitet sich. Es erscheint offensichtlich, dass das Label Minergie die Verbreitung der

¹¹ Wir haben folgende Wohnflächen angenommen: Geräte < 300 m³/h: 160 m²; Geräte > 300 m³/h: 8 Wohnungen je 120 m²; Einzelraumgeräte: 30 m²

Komfortlüftung in der Schweiz wesentlich beeinflusst resp. überhaupt erst im heutigen Masse möglich gemacht hat.

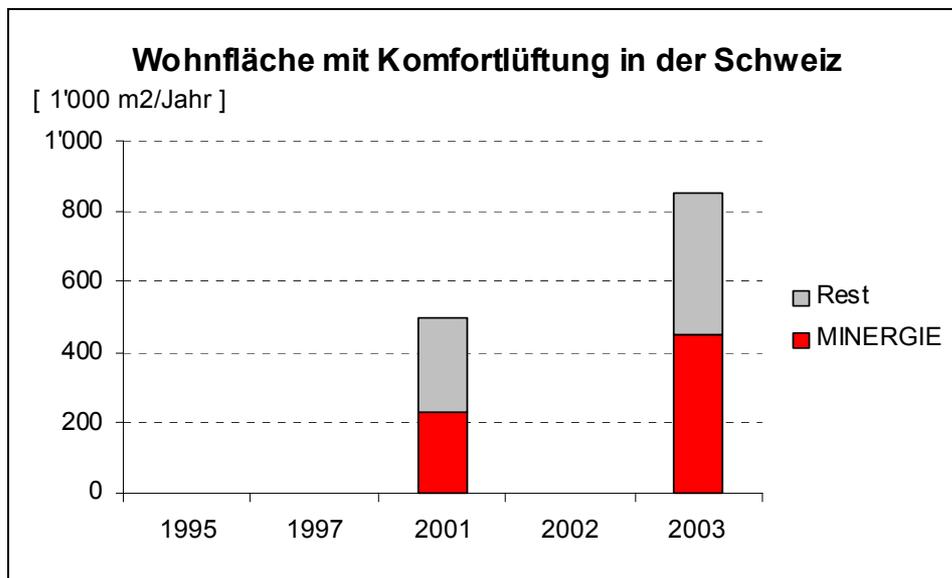


Bild 17. Vergleich geschätzte Wohnfläche mit Komfortlüftung / Minergie zertifizierte Wohnfläche [Energie-cluster, Arbeitsgruppe Komfortlüftung, Markterhebung 2004]

In Europa basiert der Absatz von Komfortlüftungsanlagen bisher insbesondere darauf, dass in Skandinavien, Holland, Frankreich und Belgien eine mechanische Lüftung in Neubauten seit Jahren vorgeschrieben ist. In Deutschland wird diese ab dem Jahr 2000 aufgrund der neuen Energiesparverordnung dringend empfohlen. Grösstenteils werden in diesen Ländern allerdings einfache Abluftanlagen ohne Wärmerückgewinnung installiert. In den erwähnten Ländern werden jährlich über 750'000 Wohnungen neu erstellt. Geht man von in den Skandinavischen Ländern und in Holland von einem deutlich höheren Marktanteil (20 - 40 %) wie in den übrigen Ländern (5 - 10 %), ergibt sich ein Marktvolumen von 60'000 bis 110'000 Wohnungen mit Komfortlüftungen pro Jahr.

5.1.3 Marktanteile

Um die Marktanteile von Lüftungssystemen in Niedrigenergiebauten zu bestimmen, muss zusätzlich die Bautätigkeit bekannt sein. Für Neubauten gibt darüber die Wohnbaustatistik des Bundesamtes für Statistik Auskunft.

Für den Sanierungsbereich stellt sich die Frage, welche Sanierungsvarianten oder -strategien als relevante Bezugsgrösse zu verwenden sind. Zur Umschreibung der verschiedenen Sanierungsstrategien und -varianten werden in der Literatur und in der Praxis leicht unterschiedliche Begriffe verwendet. Wir verwenden dieselben Begriffe wie die Studie 'Neubauen statt Sanieren?' [Ott, Binz, 2002]. Die folgende Tabelle vermittelt einen groben Überblick:

IP Bau / SIA Norm 469	Studie Neubauen statt Sanieren?
<p>Substanzerhaltung/Instandsetzung/ Erneuerung</p> <p>Ziel: Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit des gesamten Bauwerks oder von Teilen desselben in einem mit dem ursprünglichen Neubau vergleichbaren Zustand</p>	<p>MS Minimalsanierung</p> <p>Ziel: Funktionstauglichkeit erhalten.</p>
<p>Erneuerung - Anpassung</p> <p>Ziel: Die Wohnungen sollen den zeitgemässen Neubaustandard erhalten.</p> <p>Ohne wesentliche Eingriffe in das Bauwerk (insbesondere ohne schwerwiegende Eingriffe in die Baustruktur).</p>	<p>TS Teilsanierung</p> <p>Ziel: Bau- und energietechnische Sanierung (mittlere Eingriffstiefe). Werterhaltung (zeitgemässer Standard).</p>
<p>Umbau</p> <p>Ziel: Die Wohnungen sollen an neue/künftige Standards angepasst werden.</p> <p>Wesentliche Eingriffe in das Bauwerk.</p>	<p>GS Gesamtsanierung</p> <p>Ziel: Anpassung an künftige Nachfrage (grosse Eingriffstiefe). Wertsteigerung bzw. langfristige Werterhaltung</p>

Tabelle 10 Begriffe für Sanierungsstrategien und -varianten

Primär ist der Einbau einer kontrollierten Lüfterneuerungsanlage im Rahmen von Gesamtsanierungen oder Teilsanierungen möglich. Eine stichprobenartige Durchsicht von Sanierungen gem. Minergie-Standard zeigt, dass beide Varianten vorkommen, Gesamtsanierungen aber klar häufiger erscheinen. Diesen Eindruck bestätigen auch verschiedene Minergie-Experten. Der Einbau einer kontrollierten Lüfterneuerungsanlage im Rahmen von Teilsanierungen, welche lediglich auf eine mittelfristige Werterhaltung abzielen, scheint zumindest bisher weniger relevant zu sein. Wir benutzen deshalb die Gesamtsanierungen als relevante Bezugsgrösse.

Der Gesamtsanierungsmarkt für Mehrfamilienhäuser wurde im Rahmen der Studie 'Neubauen statt Sanieren' [Ott, Binz, 2002] detailliert berechnet. Grundsätzlich geht die Studie für Gesamterneuerungen von einer Zykluslänge von 75 Jahren aus. Da jedoch qualitativ schlechtere Bauten schon früher gesamterneuert werden müssen, werden für Bauten der Nachkriegsphase kürzere Zykluslängen angenommen. Zu berücksichtigen ist, dass eine Gesamtsanierung auch in mehreren Schritten erfolgen kann. Wir gehen davon aus, dass sich die Zykluslänge für Komfortlüftungsanlagen dadurch nicht ändert, d.h. dass diese bei einer schrittweisen Gesamtsanierung erst am Schluss installiert werden (wenn überhaupt). Die Zahlen des Gesamtsanierungsmarktes können deshalb aus der Studie unverändert übernommen werden. Für Einfamilienhäuser kann das Volumen über den Gebäudebestand näherungsweise entsprechend abgeschätzt werden, indem eine ähnliche Sanierungsrate angenommen wird.

Die Niedrigenergiebauten mit Lüftungssystem (bzw. Wohngebäude mit Komfortlüftung) werden entsprechend den Zahlen von Minergie auf Neubau und Sanierung aufgeteilt.

NE-Neubauten mit Lüftungssystem	630'000	m ² EBF / a
NE-Gesamtsanierungen mit Lüftungssystem	80'000	m ² EBF / a
Neubau EFH	1'951'000	m ² EBF / a
Neubau MFH	3'437'000	m ² EBF / a
Gesamtsanierung EFH	2'040'000	m ² EBF / a
Gesamtsanierung MFH	1'800'000	m ² EBF / a
NE-Neubauten mit Lüftungssystem	12%	+ - 2%
NE-Gesamtsanierungen mit Lüftungssystem	2%	+/- 0.5%
Anteil NE-Wohnbauten mit Lüftungssystem Total	8%	+/- 1%

NE = Niedrigenergie

EBF = Energiebezugsfläche

Tabelle 11 Schätzung Marktanteile Lüftungssysteme in Niedrigenergie-Wohnbauten für Neubau und Gesamtsanierungen (nur reine Wohnbauten).

Auffällig ist der markant höhere Anteil von Niedrigenergie-Neubauten mit Lüftungssystem. Die Ursache für den wesentlich geringeren Anteil bei der Gesamtsanierung kann bei den erschwerten Bedingungen sowohl bei der Gebäudehülle (um zu erreichen, dass ein Niedrigenergie-Niveau erreicht wird) wie auch bei der Installation eines Lüftungssystems liegen.

Soll berücksichtigt werden, dass der Einbau einer Komfortlüftung auch im Rahmen von Teilsanierungen möglich ist, so ergibt sich eine wesentlich grössere Bezugsmenge und damit tiefere Marktanteile im Sanierungsbereich. Im Rahmen der Studie 'Neubauen statt Sanieren?' [Ott, Binz, 2002] gehen befragte Immobilienbewirtschafter von in der Regel zwei Teilsanierungen aus, bevor eine Gesamterneuerung ansteht. In erster Näherung kann deshalb angenommen werden, dass der Marktanteil nur ca. 1 % beträgt, wenn in der Bezugsmenge auch Teilsanierungen berücksichtigt werden.

5.2 Untersuchungsmodell

5.2.1 Definition Fallbeispiel

Um die Entwicklung von Lüftungssystemen für Niedrigenergiebauten zu untersuchen, werden die Kosten der eingesparten Wärme für ein Mehrfamilienhaus anhand der folgenden Fallbeispiele untersucht:

- Neubau Mehrfamilienhaus
- Sanierung Mehrfamilienhaus: Das Gebäude wird im Sinne einer längerfristigen Werterhaltung umfassend saniert:
 - Günstige Voraussetzungen:
Es erfolgt eine Gesamtsanierung in einem Schritt, d.h. die Gebäudehülle sowie Bad und Küche werden ohnehin saniert. Für das Lüftungsgerät und die Luftführung ist ausreichend Platz vorhanden resp. der Platz kann ohne grossen Aufwand geschaffen werden.
 - Ungünstige Voraussetzungen:
Es erfolgt eine Gesamtsanierung in mehreren Schritten, d.h. die Gebäudehülle sowie Bad und Küche sind bereits zu einem früheren Zeitpunkt saniert worden. Zusätzliche Kosten werden dadurch verursacht, dass für das Lüftungsgerät und die Luftführung nicht ohne weitere Massnahmen ausreichend Platz vorhanden ist.

Die Anzahl Wohnungen der Mehrfamilienhäuser und die Energiebezugsfläche der Wohnungen orientiert sich an Schweizer Durchschnittswerten. Für den Neubau werden 8 Wohnungen mit 4.5 Zimmern und 120 m² EBF angenommen. Das zu sanierende MFH aus den sechziger Jahren hat ebenfalls 8 Wohnungen, welche jedoch etwas kleiner sind (3.5 Zimmer, 97 m² EBF).

Untersucht wird ein dezentrales Lüftungskonzept, d.h. jede Wohnung verfügt über eine eigene Lüftungsanlage mit unabhängiger Zu- und Abluft sowie Wärmerückgewinnung. Branchenvertreter gehen davon aus, dass dieses Konzept seine marktbeherrschende Stellung behalten wird.

Das Lüftungsgerät wird innerhalb der Wohnung im Korridor in einem Wandschrank platziert. Die Führung der Aussenluft bis zum Lüftungsgerät sowie der Fortluft nach dem Gerät ins Freie erfolgt über für die einzelnen Lüftungsgeräte getrennte Leitungen, welche in einer Steigzone geführt werden. Die Feinverteilung der Zuluft und Abluft erfolgt im Neubau über einbetonierte, flexible Lüftungsrohre, im Sanierungsfall über eine heruntergehängte Decke im Korridor.

5.2.2 Berechnung der Nutzenergiekosten

Im Folgenden wird ein klassisches Berechnungsmodell für die Ermittlung der Nutzenergiekosten - d.h. im vorliegenden Fall die Gestehungskosten der eingesparten Wärme - entworfen. Dieses Modell umfasst alle wesentlichen technisch-ökonomischen Faktoren und entspricht wie im Basisprojekt Technologie-Monitoring einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung gemäss SIA-Norm 480.

Als Referenz dient jeweils ein identisches Gebäude jedoch ohne Komfortlüftungssystem, d.h. mit Fensterlüftung. Jedoch wird beim Neubau davon ausgegangen, dass für Bad und Küche eine einfache Abluftanlage installiert wird (Kosten ca. Fr. 1'000.--). Die Kosten der durch das Lüftungssystem eingesparten Wärme werden verglichen mit den vermiedenen Kosten bei der Wärmeerzeugung.

Die Berechnung der Nutzenergiekosten wurde bereits im Rahmen des Projektes 'Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohnbauten' [CEPE/HBT, S. 69ff.] detailliert hergeleitet. Hier wird der Berechnungsgang lediglich grob beschrieben. Details können im erwähnten Bericht entnommen werden.

Zunächst ist der thermisch wirksame Luftvolumenstrom sowohl für das untersuchte Gebäude mit Komfortlüftungssystem als auch für ein identisches Gebäude ohne Komfortlüftung (Referenzfall) zu berechnen.

Beim Gebäude mit Lüftungssystem lässt sich der thermische wirksame Luftvolumenstrom gem. SIA 380/1 berechnen:

$$v_{th} = 0.12 \text{ (m}^3\text{/h)/m}^2 + v_m / \text{EBF} * (1 - \text{eta}_{WRG}) * b / 168$$

V_m	mittlere geförderte Luftmenge (gem. HTA Luzern pro Zimmer 26 m ³ /h)
eta_{WRG}	Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung. Die Anbieter geben üblicherweise die Rückwärmehzahl an. Der effektive Wirkungsgrad der WRG liegt ungefähr um 0.1 unter der Rückwärmehzahl, da die Rückwärmehzahl auch die Abwärme des Ventilators und Wärmegewinne über das Gehäuse der Lüftungsgerätes beinhaltet.
b	Betriebsstunden in h/Woche (im Normalfall 168 h - also Dauerbetrieb)
EBF	Energiebezugsfläche

Bei einem angenommenen Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung von 0.8 ergibt sich ein thermisch wirksamer Luftvolumenstrom von 0.30 (m³/h)/m² (Neubau) resp. von 0.34 (m³/h)/m² (Sanierung). Der Unterschied zwischen Neubau und Sanierung wird durch die verschiedenen Annahmen betr. Wohnungsgrösse resp. Anzahl Zimmer verursacht.

Im Referenzfall d.h. ohne kontrollierte Lüfterneuerung mit Wärmerückgewinnung ist der gesamte Luftwechsel thermisch wirksam. Der effektive Luftvolumenstrom ist stark vom Benutzerverhalten abhängig. Da es in der Schweiz keine statistischen repräsentativen Messkampagnen gibt, muss der Luftvolumenstrom geschätzt werden. Entsprechend [CEPE/HBT, 2002] werden folgende Werte verwendet:

	'Grenzkosten' Schätzwert tief	'Grenzkosten' Schätzwert hoch	verwendete Werte Monitoring	
	Luftwechsel [1/h]	Luftwechsel [1/h]	Luftwechsel [1/h]	Volumenstrom [(m ³ /h)/m ²] *
Neubau MFH	0.35	0.5	0.45	1.0
Bestehende MFH, (neue Fenster)	0.5	0.7	0.6	1.3

* berechnet mit einer (Netto-) Raumhöhe von 2.2 m

Tabelle 12 Verwendete Werte für Luftwechsel und Volumenstrom

Nehmen wir einen Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung von 0.8 an, so ergibt sich für das Fallbeispiel folgende Reduktion der Energiekennzahl durch die Installation einer Komfortlüftung:

	thermisch wirksamer Luftvolumenstrom [(m ³ /h)/m ²]		Reduktion Energiekennzahl [MJ/m ² a]
	ohne Komfortlüftung	mit Komfortlüftung	
Neubau MFH	0.99	0.30	83
Sanierung MFH	1.32	0.34	118

Tabelle 13 Mit einer Komfortlüftung erzielbare Reduktion der Energiekennzahl für die Fallbeispiele

5.2.3 Auswahl der Monitoring-Faktoren

Zur Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring detailliert analysiert werden sollen, werden für jene Faktoren, welche durch technologische Fortschritte beeinflusst werden können, folgende Eigenschaften grob beurteilt:

- Dynamik der bisherigen und der künftigen Entwicklung
- (Gestehungskosten-)Relevanz
Die Bestimmung der Relevanz erfolgt aufgrund einer Sensitivitätsanalyse, bei welcher die einzelnen Faktoren ausgehend von einem Basiswert um $\pm 20\%$ variiert werden.

Beurteilung der Dynamik der bisherigen Entwicklung

Nach Aussage von Branchenvertretern konnten in den letzten 10 Jahren insbesondere beim Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung, dem Strombedarf für die Luftförderung und den Planungskosten deutliche Fortschritte erzielt werden. Die massive Reduktion (Halbierung) der Planungskosten (inkl. Bauaufsicht) kann auf klassische Lerneffekte während der Markteinführung zurückgeführt werden. Ein wichtiger Faktor ist zudem, dass bei den Komponenten heute zunehmend auf Systemanbieter zurückgegriffen werden kann, während vor 10 Jahren die Komponenten noch bei mehreren Anbietern beschafft werden mussten. Der Stromverbrauch für die Luftförderung konnte durch den Einsatz von besseren Antrieben (DC-Motoren) in etwa halbiert werden.

Die Kosten für das Lüftungsgerät sind dagegen offenbar bisher real nicht gesunken. Mögliche Ursachen sind der mangelnde Konkurrenzdruck bei stark wachsendem Absatz und evtl. der Umstand, dass die Hersteller als Systemanbieter einen Teil der Planungsleistungen übernommen haben. Die Installationskosten¹² konnten in den letzten 10 Jahren u.a. durch den Einsatz von einfacher zu installierenden Komponenten und Lerneffekten bei den Installateuren spürbar reduziert werden. Dem Aufwand für die Wartung der Lüftungssysteme wird zunehmend Rechnung getragen (z.B. durch herausziehbare Wärmetauscher), so dass für neuere Systeme mit geringeren Kosten gerechnet werden kann.

Beurteilung der Dynamik der künftigen Entwicklung

Insgesamt werden deutlich sinkende Investitionskosten erwartet. Ob dies eher durch niedrigere Gerätekosten oder durch niedrigere Installationskosten erreicht wird, ist schwer absehbar. Wahrscheinlich scheint, dass die Hersteller zusätzlichen Aufwand treiben, um die Installation (und die Planung) weiter zu vereinfachen. Eine weitere Steigerung des Nutzungsgrads der WRG ist noch möglich, allerdings in deutlich geringerem Ausmass wie in den letzten 10 Jahren. Desgleichen ist auch beim Strombedarf für die Luftförderung der grösste Teil des Effizienzpotenzials bereits umgesetzt. Beim Wartungsaufwand bestehen noch weitere Optimierungsmöglichkeiten.

(Stromgestehungskosten-) Relevanz

Die folgende Darstellung zeigt den Einfluss einer Veränderung der wichtigsten Faktoren um $\pm 20\%$ auf die Gestehungskosten der eingesparten Wärme.

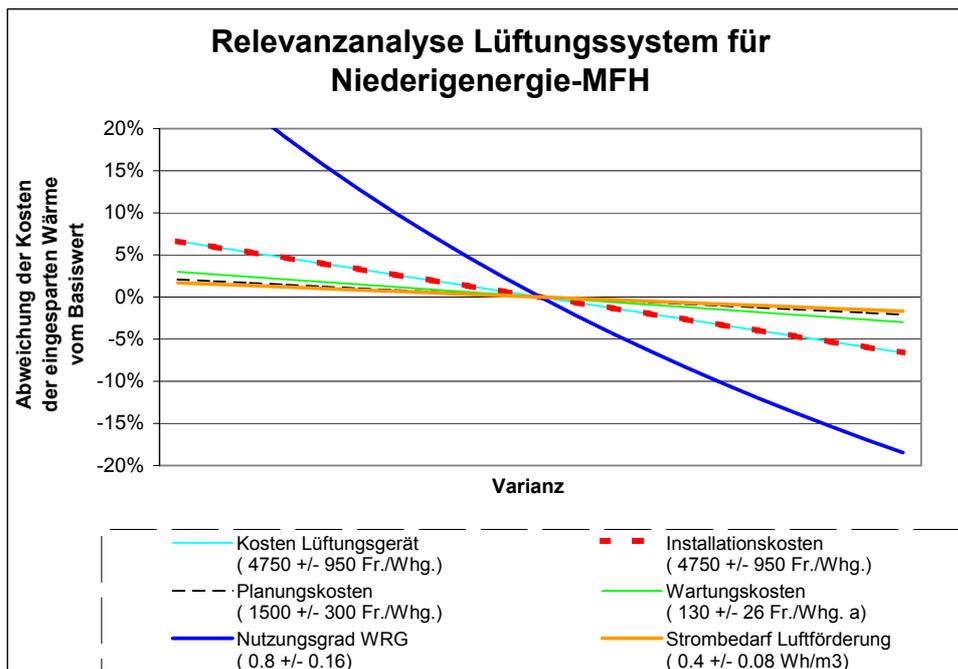


Bild 18. Sensitivitätsanalyse der Gestehungskosten der eingesparten Wärme für ein Lüftungssystem in einem Niederenergie-MFH (Sanierungsfall mit optimalen baulichen Voraussetzungen)

Lesebeispiel: Eine Änderung der Investitionskosten für das Lüftungsgerät um $\pm 20\%$ (Fr. 4'750.-- \pm Fr. 950.--/Wohnung) bewirkt eine Veränderung der Gestehungskosten der eingesparten Wärme um ca. 7%. Um den Einfluss der Faktoren besser vergleichen zu können, sind Kurven einzelner Faktoren an der 0%-Linie gespiegelt, so dass sie alle links im positiven Bereich liegen.

¹² Kosten für die Komponenten der Luftverteilung (Kanäle, Verteiler, Luftauslässe, Schalldämpfer, etc) und die Montage der gesamten Anlage

Eine Veränderung des Nutzungsgrades der WRG hat sehr stark Auswirkungen auf die Gesteungskosten der eingesparten Wärme. Zu berücksichtigen ist in der obigen Grafik, dass die dargestellte Verbesserung gegenüber heute um 20 % (von 80 % auf 96 %) kaum zu erreichen ist.

Bestimmung der Monitoring-Faktoren

Die Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring detailliert verfolgt werden, erfolgt anhand einer zusammenfassenden Bewertung der Dynamik der bisherigen und der künftigen Entwicklung und der Relevanz:

	Beurteilung der Faktoren*				Monitoring
	Dynamik		Relevanz	Wert**	
	bisherige	künftige			
Investition Lüftungsgerät	1	3	2	8	ja
Installationskosten	2	2	2	8	ja
Planungskosten	4	2	0.5	3	nein
Wartungskosten	2	2	1	4	nein
Nutzungsgrad WRG	3	1	5	20	ja
Strombedarf Luftförderung	4	2	0.5	3	nein

* Massstab für Beurteilung der Faktoren:

5: sehr dynamische Entwicklung (Änderungen > +/-50% innerhalb von 10 Jahren) resp. sehr grosse Relevanz (Sensitivität > 20%)
0: keine spürbare Dynamik/Relevanz

**Beurteilungswert: Summe bisherige und künftige Dynamik 2000/2010 multipliziert mit Relevanz

Tabelle 14 Bestimmung der Monitoring-Faktoren für Lüftungssysteme in Niedrigenergie-Wohnbauten

5.2.4 Zusätzlich zu untersuchende Faktoren

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, können die Kosten einer Komfortlüftung alleine durch die Energieeinsparungen ökonomisch nicht gerechtfertigt werden. Für den bisherigen wie für den künftigen Markterfolg sind deshalb auch andere Aspekte von zentraler Bedeutung. Bezeichnenderweise stellt Minergie den gesteigerten Komfort der Gebäudenutzer ins Zentrum des Marketings. Der Energieverbrauch wird als Leitgrösse genannt, um die geforderte Bauqualität zu quantifizieren.

Es soll deshalb der Zusatznutzen einer kontrollierten Wohnungslüftung in Form von verbesserter Luftqualität, Lärmschutz, etc. untersucht werden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass der Zusatznutzen durch allfällige Nachteile (z.B. Geräuschentwicklung durch die Lüftungsanlage) geschmälert werden kann.

5.2.5 Verwendete Erfahrungswerte

Für die Faktoren, welche nicht mit einem Monitoring analysiert werden, werden folgende Erfahrungswerte verwendet:

Faktor	verwendete Werte
Planungskosten: - Neubau - Sanierung	ca. 10 % der Anlagekosten ca. 12.5 % der Anlagekosten
Wartungskosten	Fr. 130.-- pro Wohnung und Jahr
Strombedarf Lüftung - Geräte mit Gleichstrommotor - ältere Geräte mit Wechselstrommotor	0.4 Wh/m ³ 0.8 Wh/m ³
Nutzungsdauer: - Lüftungsgerät - Luftverteilung, Installation	15 Jahre 20 Jahre

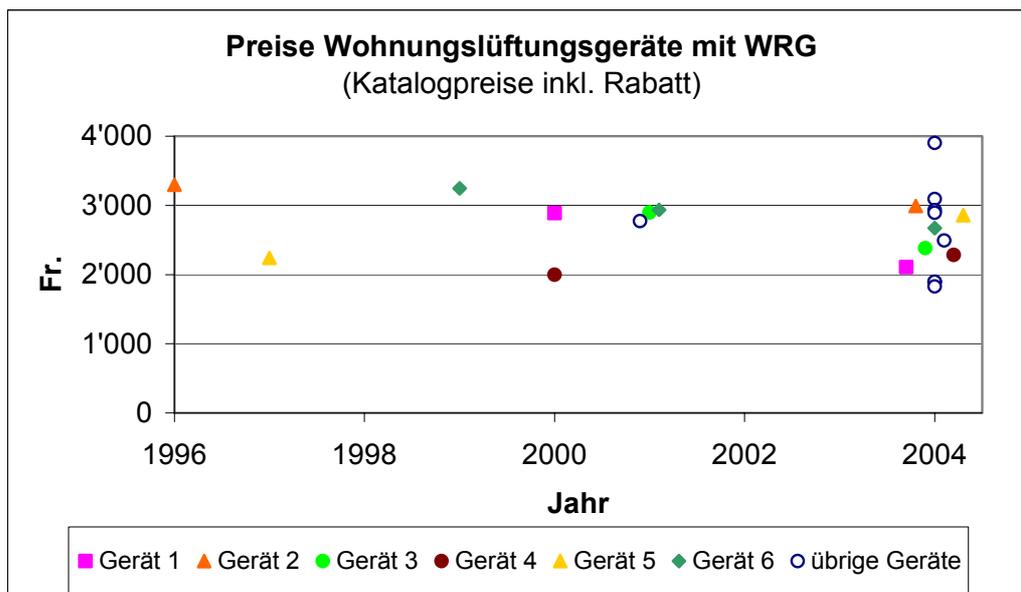
Tabelle 15 Verwendete Erfahrungswerte

5.3 Bisherige Entwicklung / aktueller Stand

5.3.1 Entwicklung der Investitionskosten für Lüftungsgeräte

Ein Vergleich von aktuellen Katalogpreisen mit Preisen aus früheren Jahren zeigt im Durchschnitt keine spürbare Veränderung. Bei den einzelnen Geräten sind aber durchaus Bewegungen sichtbar. Während eine Mehrzahl der Geräte heute niedrigere Katalogpreise aufweist, ist bei einigen Geräten ein Anstieg festzustellen. Die festzustellenden Preisanstiege können zumindest bei einem Teil der Geräte auf eine deutlich verbesserte Ausstattung zurückgeführt werden (verbesserte Steuerung/Regelung, effizientere Wärmetauscher und Ventilatoren).

Offensichtlich werden aber heute deutlich höhere Rabatte gewährt wie noch zu Beginn des Jahrzehnts. Die von den Anbietern angegebenen durchschnittlich gewährten Rabatte sind in den letzten 4 Jahren um bis zu 15 % gestiegen, der Durchschnitt liegt bei einer Steigerung von 8 %. Offensichtlich war der Kostendruck bis vor wenigen Jahren nicht besonders ausgeprägt, beginnt jetzt aber zu steigen. Diesen Eindruck bestätigen auch die interviewten Planer und Experten.



G:\2003\1039\3-Bearb\Lüftung\Monitoring-kwl.xls\Ergebnisse-Neubau

Bild 19. Entwicklung der Preise für Wohnungslüftungsgeräte (< 300 m³/h) mit Wärmerückgewinnung (ohne Wärmepumpe)

Die Preisdifferenzen bei den aktuell angebotenen Geräten erscheinen auf den ersten Blick relativ hoch. Zu berücksichtigen ist, dass die Ausstattung der Geräte teilweise recht unterschiedlich ist. So sind z.B. die Möglichkeiten zur Anlagesteuerung unterschiedlich umfangreich und es werden unterschiedlich effiziente Wärmetauscher und Ventilatoren eingesetzt.

Trotzdem, dass Komfortlüftungen nunmehr seit mehr als zehn Jahren in der Schweiz installiert werden, sind die Preise für die Lüftungsgeräte bis vor wenigen Jahren praktisch unverändert geblieben. Folgende Faktoren haben dabei eine Rolle gespielt:

- Aufgrund der bisher in der Schweiz eher bescheidenen Marktanteile und des noch sehr jungen Marktes für Komfortlüftungen ist der Druck auf die Preise bisher gering geblieben. Viel stärker wie der Preis scheinen bisher gute Referenzen und die Einschätzung der Produktequalität eine Rolle bei der Wahl des Anbieters zu spielen. Die Anbieter geben entsprechend an, dass sie primär versuchen, sich durch ihre Dienstleistungen und die Qualität der angebotenen Geräte von der Konkurrenz abzuheben als durch tiefe Preise.
- Bei einigen Anbietern befindet sich der Bereich Komfortlüftung noch im Aufbau. Einige grosse Handelsfirmen haben erst kürzlich Komfortlüftungsgeräte in ihr Programm aufgenommen. Auch die schon längere Zeit aktiven Anbieter erweitern ihr Sortiment an Komponenten für die Luftverteilung (Kanäle, Rohre, Verteilkästen, Zuluft-/Abluftdurchlässe, etc.).
- Da sich der sowohl Gesamtmarkt wie auch die Vertriebskanäle der einzelnen Anbieter noch im Aufbau befinden, fällt ein überdurchschnittlicher Aufwand für Marketing und Ausbildung an.
- Die Ausstattung der Geräte wurde laufend verbessert (z.B. Steuerung mit Zeitschaltprogramm und Filterüberwachung, effizientere Ventilatoren).

Die bisherige Entwicklung scheint weitgehend der "Price umbrella"-Phase zu entsprechen, wie sie in [IEA, 2000] dargestellt wird (siehe Grafik). Diese Phase ist durch stabile Preise und den Markteintritt neuer Anbieter gekennzeichnet. Da das betroffene Produkt in dieser Phase (noch) als Innovation gilt, spielen bei der Wahl des Anbieters Qualitätsmerkmale ein relativ grosse Rolle und der Druck auf die Preise wird entsprechend reduziert. Kosteneinsparungen durch Effizienzsteigerungen bei Produktion und Vertrieb werden von den Anbietern nicht an die Kunden weiter zu geben, sondern eher dazu genutzt, das Vertriebsnetz und die Produktionskapazitäten weiter auszubauen oder den früheren Entwicklungsaufwand zu refinanzieren. Zu berücksichtigen ist aber auch, dass die Geräte heute in der Regel über eine deutlich bessere Ausstattung verfügen wie vor 10 bis 15 Jahren, wodurch die

möglichen Kosteneinsparungen spürbar reduziert werden. Die Bestimmung von Kostendegressionsfaktoren macht in anbetracht der vorgenannten Punkte wenig Sinn.

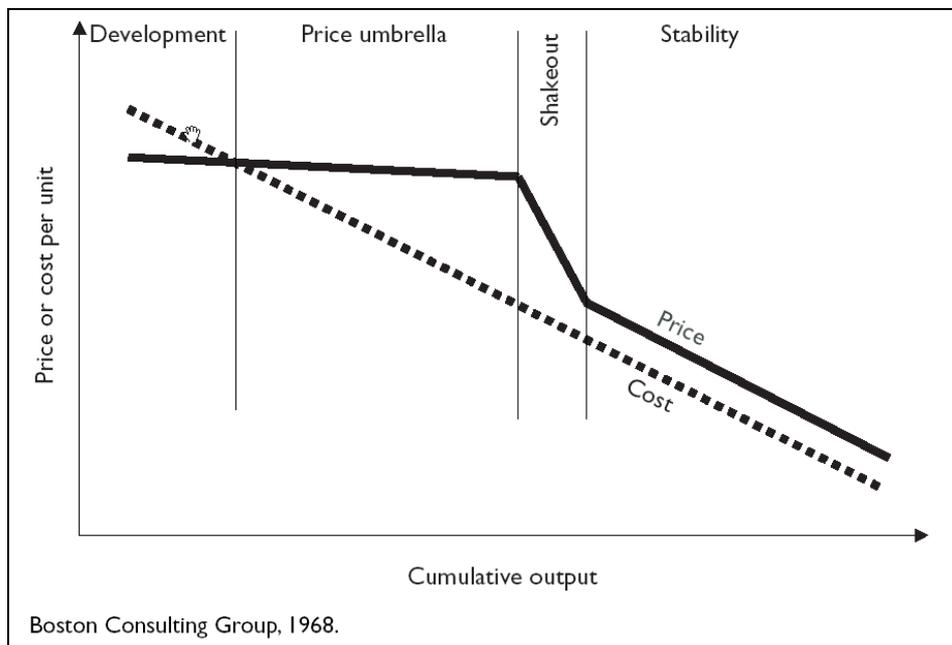


Bild 20. Preis- und Kostenentwicklung für neue Produkte [IEA, 2000]

5.3.2 Entwicklung der Installationskosten

Bei den Installationskosten ist zwischen den Kosten für die Komponenten der Luftverteilung (Kanäle, Verteiler, Luftauslässe, Schalldämpfer, etc) und den Kosten für die Montage der gesamten Anlage (Lüftungsgerät und Luftverteilung) zu unterscheiden.

Die Beurteilung der Entwicklung gestaltet sich relativ anspruchsvoll. Eine Analyse von Abrechnungen oder Offerten konkreter Projekte macht wenig Sinn, da die Preise sehr stark abhängig sind von der Konkurrenzsituation und den baulichen Voraussetzungen der Objekte. Die folgenden Aussagen basieren deshalb im Wesentlichen auf den Aussagen von Branchenvertretern.

Kontrollierte Wohnungslüftungen werden sowohl von (grösseren) Lüftungsfirmen wie auch von (eher kleineren) Sanitär- und Heizungsinstallationsfirmen montiert. Die Lüftungsfirmen, welche sonst eher grosse Klima- und Lüftungsanlagen installieren, kommen eher bei Wohnüberbauungen oder bei anspruchsvollen Sanierungen zum Zuge. Sanitär- und Heizungsinstallateure drängen eher auf den Einfamilienhaus- und den Neubaumarkt.

Der Arbeitsaufwand für die Montage einer kontrollierten Wohnungslüftung hat sich seit Mitte der 90er Jahre spürbar reduziert. Die Anbieter haben Ende der 90er Jahre zunehmend begonnen, Systeme und nicht mehr nur einzelne Komponenten zu vertreiben. Für die verbreitetsten Anwendungsbereiche können heute aufeinander abgestimmte Systemkomponenten eingesetzt werden, ohne dass spezielle Komponenten gesucht oder gar selbst hergestellt werden müssen. Für den Sanierungsbereich führen bisher nur wenige Anbieter spezielle Komponenten an (z.B. Lüftungskanäle mit ansprechendem Design für Aufputzmontage). Die angebotenen Systemkomponenten können durch Steckverbindungen, Schnellspanverschlüsse, o.ä. rasch luftdicht miteinander verbunden werden. Im Neubau werden heute vermehrt kostengünstige flexible Kunststoffrohre anstelle der früher üblichen Spirorohre eingesetzt. Insgesamt wird geschätzt, dass sich der Arbeitsaufwand seit Mitte der 90er Jahre im Neubau um ca. 20 - 25 %, bei einer Sanierung um ca. 10 - 15 % reduziert hat.

Trotzdem wird von den Branchenvertretern kein eindeutiger Trend zu günstigeren Angeboten wahrgenommen. Eine wichtige Rolle kann dabei spielen, dass die Installateure offenbar zu Beginn den Aufwand für die Montage einer Lüftungsanlage deutlich unterschätzt haben. So sind zum Beispiel die Ansprüche an das Erscheinungsbild der Luftverteilung im Wohnbereich ungleich höher wie bei einer Heizungsanlage, welche sich im Keller befindet. Möglich ist auch, dass die Ansprüche der Bauherren heute höher sind wie Mitte der 90er Jahre, als die Installation einer kontrollierten Wohnungslüftung noch einer Pioniertat gleichkam.

Die Preise der Komponenten haben sich ähnlich wie die Preise der Lüftungsgeräte verhalten, d.h. die Preise sind in den letzten Jahren um rund 10 % gesunken. Positiv hat sich sicher das steigende Marktvolumen ausgewirkt. Auch hier ist zu vermuten, dass die Anbieter bei Herstellung und Vertrieb eine deutlich höhere Kostenreduktion erzielt haben, jedoch einen guten Teil davon für Verbesserungen (u.a. montagefreundlichere Komponenten), für die Erweiterung des Sortiments und für zusätzliche Dienstleistungen der Anbieter (Planungsleistungen, Baubegleitung, etc.) eingesetzt haben. Zu berücksichtigen ist, dass bisher nur ein Teil der Anbieter spezielle Komponenten für den Sanierungsbereich anbietet. Durch die geringen Stückzahlen dürften die Preise hier weniger gesunken sein.

Zusammengefasst ergeben sich für die Entwicklung der Installationskosten trotz einer beachtlichen Steigerung des Marktvolumens bisher in der Schweiz im Neubaubereich nur eine relativ bescheidene Reduktion um ca. 5 - 10 % und im Sanierungsbereich praktisch konstante Preise.

Gegenüber dem Neubau unterscheiden sich die Kosten bei einer Sanierung unter optimalen Voraussetzungen vor allem durch den um ca. 25 % höheren Installationsaufwand (inkl. Elektriker und Bau). Die Kosten für die Komponenten und das Material der Lüftungsanlage unterscheiden sich dagegen kaum. Wird eine kontrollierte Wohnungslüftung im Rahmen einer Gesamtsanierung installiert und es ist ausreichend Platz für das Lüftungsgerät und die Luftführung vorhanden, so kommt die Anlage nur geringfügig teurer wie bei einem Neubau.

Sind die Voraussetzungen im Sanierungsfall allerdings nicht optimal, so können schnell erhebliche Mehrkosten entstehen. Oft muss für das Lüftungsgerät (in Korridor, Bad oder Küche) der Platz erst geschaffen werden und bestehende Steigzonen müssen erweitert oder mit einer zweiten Zone ergänzt werden, um Fort- und Aussenluft zum Lüftungsgerät zu führen. Auch die Luftverteilung innerhalb der Wohnung kann problematisch sein, wenn z.B. die Verminderung der lichten Raumhöhe im Korridor um 12 bis 15 cm nicht möglich ist. Die Installation einer Komfortlüftung ist unter solchen Umständen meist nur dann mit vertretbarem Aufwand möglich, wenn sie im Rahmen einer umfassenden Gesamtsanierung des Gebäudes erfolgt. Das Spektrum der bei nicht optimalen Voraussetzungen entstehenden Mehrkosten ist äusserst breit. Wir berücksichtigen bei den Berechnungen für ungünstige Bedingungen im Sanierungsfall Mehrkosten von Fr. 3'000.--, welche eher moderate Schwierigkeiten widerspiegeln. Kumulieren sich die oben erwähnten Probleme, so können die Mehrkosten auf ein Mehrfaches dieses Betrages steigen. In der Praxis wird die Installation einer kontrollierten Wohnungslüftung unter solchen Umständen kaum ernsthaft in Betracht gezogen.

5.3.3 Entwicklung Wirkungsgrad Wärmerückgewinnung

Für die Beurteilung der Wärmerückgewinnung einer Lüftungsanlage werden die folgenden Begriffe verwendet:

- Temperatur-Änderungsgrad:

Der Temperatur-Änderungsgrad wird bei der Prüfung von Wärmetauschern verwendet und ist international genormt (EN 308). Der Temperatur-Änderungsgrad entspricht unter üblichen Bedingungen (Aussenluftmassenstrom gleich Abluftmassenstrom, kein Einsatz von Heizenergie für Feuchtezunahme im Wohnbereich, keine Leckagen) dem Verhältnis von Energieübertragung des Wärmetauschers zu den Lüftungswärmeverlusten ohne Wärmerückgewinnung.

- **Wärmebereitstellungsgrad:**
Dieser Begriff wurde in Deutschland im Rahmen der Prüfung von Wohnungslüftungsgeräten eingeführt. Es handelt sich um keinen international genormten Begriff. Der Wärmebereitstellungsgrad ergibt sich aus dem Quotienten aus der im Lüftungsgerät der Zuluft zugeführten Energie und dem Lüftungswärmebedarf. Damit werden die Erwärmung durch den Zuluftventilator und die Wärmeflüsse über das Gehäuse als Gewinn interpretiert, was falsch ist, da es sich um Heizenergie handelt. Die Einsparung an Heizenergie wird dementsprechend überschätzt
- **Rückwärmzahl:**
entspricht dem Temperatur-Änderungsgrad, sofern vom Wärmetauscher nur sensible Wärme und keine Feuchtigkeit zurückgewonnen wird.

Wir verwenden im Folgenden den Temperatur-Änderungsgrad als Mass für den Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung. Die Wirksamkeit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung wird durch Leckagen in der Gebäudehülle oder genauer gesagt durch den Aussenluftmassenstrom über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle reduziert (um ca. 10 %). Dies wird mit dem im Kap. 4.2.2 beschriebenen Berechnungsverfahren berücksichtigt.

Bei den angebotenen Lüftungsgeräten geht der Trend zu den energetisch sehr effektiven Gegenstrom- oder Kreuz-Gegenstrom-Wärmetauscher. Heute verwendet bereits eine Mehrzahl der auf dem Markt angebotenen Gerätemarken diesen Typ. Damit wird ein Temperatur-Änderungsgrad von ca. 0.8 erreicht. Zunehmend verdrängt werden dagegen die Kreuzstrom-Wärmetauscher, welche bloss einen Temperatur-Änderungsgrad von 0.5 bis 0.6 erzielen. Seit jüngerer Zeit werden einige Geräte mit Rotor-Wärmetauscher auf dem Markt angeboten. Vom Temperatur-Änderungsgrad her bringt dieser Typ gegenüber einem Gegenstrom-Wärmetauscher keine Vorteile. Jedoch ist er in der Lage, die Feuchtigkeit zu übertragen. Dies bringt keine energetischen Vorteile, kann aber das hin und wieder auftretende Problem von zu trockener Raumluft lösen.

Da Gegenstromwärmetauscher billiger sind wie Kreuzstromwärmetauschern, dürfte den Anbietern die Umstellung leicht gefallen sein (oder fallen). Der Einsatz eines Rotationswärmetauschers verursacht (gegenüber einem Gegenstromwärmetauscher) wesentliche Mehrkosten für das Lüftungsgerät selbst, wenn berücksichtigt wird, dass eine Luftvorwärmung (Vereisungsschutz) und eine Kondensatableitung mit diesem Wärmetauschertyp nicht notwendig sind. Den Mehrkosten steht somit im Wesentlichen der Vorteil der Feuchterückgewinnung gegenüber. Zu berücksichtigen ist dabei, dass trockene Luft nur von einem sehr kleinen Teil der Mieter (4 %) als Nachteil einer kontrollierten Wohnungslüftung wahrgenommen wird [Econcept, Cepe, 2005].

Wir gehen davon aus, dass sich der Temperatur-Änderungsgrad seit Anfang der neunziger Jahre mit dem Einsatz von effizienteren Wärmetauschern durchschnittlich von 0.55 auf heute 0.80 verbessert hat.

5.3.4 Zusatznutzen

Eine kontrollierte Lüfterneuerung bringt in Wohngebäuden nicht nur energetische Vorteile, sondern durch die stets frische, temperierte Luft, die Reduktion von Schadstoffen und den im Vergleich mit einer herkömmlichen Fensterlüftung geringeren Bedienungsaufwand zusätzlichen Nutzen. Bereits zu Beginn dieses Kapitels wurde vorweg genommen, dass die Kosten einer Komfortlüftung alleine durch die Energieeinsparungen ökonomisch nicht zu rechtfertigen sind. Für den Markterfolg von Komfortlüftungen ist deshalb der Zusatznutzen von zentraler Bedeutung.

Die Bedeutung des Zusatznutzen einer kontrollierten Lüfterneuerung in Wohngebäuden wurde bereits im Rahmen der folgenden Arbeiten analysiert:

- Die Zahlungsbereitschaft für Lüfterneuerungsanlagen wurde im Rahmen des Projektes 'Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohnbauten' untersucht [Econcept, Cepe,

2005]. Die Untersuchung basiert im Wesentlichen auf einer sogenannten Conjoint Analyse, welche die Zahlungsbereitschaft der Bewohnern von MFH und EFH für Behaglichkeit und Wohnqualität sowie für energieeffizienten Wohnbau durch eine eingehende Befragung und ein gedankliches Experiment ermittelt¹³. Insgesamt wurden 501 Interviews realisiert (248 MFH und 253 EFH). Die Conjoint Analyse wurde durch direkte Fragen nach der Zahlungsbereitschaft sowie durch die Methode des Hedonic Pricing ergänzt, welche Zahlungsbereitschaften aus der Analyse von Marktdaten ermittelt.

- Die 'Akzeptanz von Komfortlüftungen im Wohnungsbereich' wurde 2001 [Müller, Peters, et.al. 2001] mittels umfangreicher Umfragen und einer Literaturrecherche untersucht. Befragt wurden je 100 Architekten und Investoren sowie 150 Mieter mit einer kontrollierten Lüfterneuerung und 300 Mieter ohne eine solche.

Soweit möglich werden im Folgenden die Ergebnisse der aktuelleren Studie 'Zusatznutzen' erwähnt. Die Ergebnisse der Studie 'Akzeptanz' werden ergänzend genutzt, insbesondere bei der Meinung von Architekten und Investoren und bei gewichtigen Abweichungen.

Eine zeitliche Entwicklung des Zusatznutzens kann aufgrund der vorliegenden Studien nicht direkt abgeleitet werden. Wir konzentrieren uns deshalb darauf den aktuellen Stand wiederzugeben.

Bestimmende Faktoren für den Zusatznutzen

Die Bewertung des Zusatznutzens hängt ab von den Vorteilen, welche mit dem Einsatz einer Lüfterneuerungsanlage erwartet werden und von allfällig erwarteten oder zumindest befürchteten Nachteilen. Für die Bewertung von Vor- und Nachteilen ist der Kenntnisstand von ausschlaggebender Bedeutung.

Mieter

Über 40 % der Mieter ohne Lüfterneuerungsanlage geben im Rahmen der Umfrage 'Zusatznutzen' an zu wissen, was eine solche Anlage ist. Dieses Ergebnis deckt sich nicht mit der Studie 'Akzeptanz', wo nur rund 10 % der befragten Mieter ohne Lüfterneuerungsanlage angeben, dass ihnen die Begriffe Lüfterneuerungsanlage und Komfortlüftung etwas sagen. Es scheint sehr unwahrscheinlich, dass diese Differenz mit der zeitlichen Distanz der beiden Umfragen (3 Jahre) begründet werden kann. Nachvollziehbar erscheint der Umstand, dass (gemäss Umfrage 'Akzeptanz') der Informationsstand bei Mietern deutlich niedriger ist, als bei den Architekten und Investoren. Gemäss den Umfrageergebnissen bei der direkten Befragung in der Studie 'Zusatznutzen' ist die Höhe der Zahlungsbereitschaft abhängig vom Bekanntheitsgrad der Lüftung, was jedoch bei der Conjoint Analyse nicht bestätigt werden konnte. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit geben praktisch alle befragten Experten an, dass für ein weiteres Wachstum des Einsatzes von Komfortlüftungsanlagen der Informationsarbeit eine zentrale Bedeutung zukommt.

Gemäss der Studie 'Zusatznutzen' wird als wichtigster Vorteil einer Lüfterneuerungsanlage eindeutig die Raumluftqualität wahrgenommen und zwar von Mietern mit und ohne Lüfterneuerungsanlage. Der Rückkehr in frisch gelüftete Räume nach Abwesenheit wird eine besondere Bedeutung beigemessen. Eine deutlich geringere Bedeutung haben offensichtlich die Reduktion von Feuchtigkeitsproblemen, Aussenlärm und Schadstoffen, der gestiegene Komfort (Fenster müssen zum Lüften nicht geöffnet werden) sowie die Erhöhung der Sicherheit durch geschlossene Fenster.

Als Nachteile werden am weitaus häufigsten Geräusche genannt, welche der Lüftungsanlage zugeschrieben werden, gefolgt vom Unbehagen, dass die Fenster nicht geöffnet werden sollten und

¹³ Den Befragten werden zu diesem Zweck hypothetische Wahlalternativen präsentiert, welche sie im Rahmen der Befragung ihren Präferenzen entsprechend zu rangieren oder zu bewerten haben. Durch die Analyse der Entscheidungen der Befragten lässt sich die Zahlungsbereitschaft nach bestimmten Gütern und Gütermerkmalen ermitteln.

Geruchsübertragungen durch die Lüftung. Weitere Nachteile wie z.B. Zugluft und höhere Kosten werden von weniger als 5 % der Befragten genannt.

Architekten und Investoren

Architekten und Investoren wurden nur bei der Studie 'Akzeptanz von Komfortlüftungen' befragt. Im Rahmen der Umfrage gab zwar eine deutliche Mehrheit der befragten Architekten und Investoren an, dass ihnen die Begriffe Lüfterneuerungsanlage und Komfortlüftung bekannt sind. Dies muss allerdings noch lange nicht bedeuten, dass sie zu den wesentlichen Fragen über ausreichend und sachlich richtige Informationen verfügen.

Auffällig ist, dass die Zusatznutzen in der Form von Luftqualität, Komfort, Lärmschutz oder Feuchtigkeitsreduktion nur von einer Minderheit¹⁴ der Architekten und Investoren als Vorteile einer Lüfterneuerungsanlage genannt werden. Bei den Architekten werden dagegen von über der Hälfte der Befragten die Energieeinsparungen als Vorteil genannt.

Bei den Nachteilen stehen eindeutig die höheren Kosten im Zentrum. Andere potenzielle Nachteile wie Geräusche, Unterhalt, etc. werden eher selten genannt (Nennungen im Bereich von 10 % der Befragten).

Bei den im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Interviews gaben alle Experten an, dass für zusätzliche Markterfolge von Lüfterneuerungssystemen verstärkte Informations- und Marketingaktivitäten zentral sind. Vereinzelt wurden skeptische Architekten speziell als eigentliche 'Verhinderer' von Lüfterneuerungsanlagen bezeichnet. Hält man sich vor Augen, dass gemäss der oben erwähnten Umfrage bei den Architekten vor allem die Energieeinsparungen als Vorteil und die höheren Kosten als Nachteil wahrgenommen werden, so wird deutlich, weshalb Lüfterneuerungsanlagen oft zurückhaltend beurteilt werden: Der Zusatznutzen scheint eindeutig zu wenig bekannt zu sein.

Quantifizierung des Zusatznutzens

Im Rahmen der Studie 'Zusatznutzen' wurde zudem versucht, die Zahlungsbereitschaft von Mietern für verschiedene Energieeffizienz-Massnahmen zu quantifizieren. Bezüglich kontrollierter Wohnungslüftung wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

- Bei MFH wird die Zahlungsbereitschaft der MieterInnen für eine Wohnungslüftung mithilfe der erwähnten Conjoint-Analyse auf durchschnittlich Fr. 115.-- pro Monat geschätzt (mit einem 95%-Vertrauensintervall Fr. 75.-- bis Fr 153.--). Bei Befragten, die in Neubauten wohnen, ist die Zahlungsbereitschaft mit rund Fr. 150.-- pro Monat etwas höher als bei MieterInnen, die in bestehenden Gebäuden wohnen (rund Fr. 100.--/Mt.).
- Die Analyse von Marktdaten mittels der Methode des Hedonic Pricing ergab für den Neubaubereich einen Mietpreiseffekt von gut +7 %. (Für den Gebäudebestand liegen zu wenig Daten von Wohnungen mit Lüftungen vor, um mit diesem Ansatz Zahlungsbereitschaften zu ermitteln). Das heisst, dass Wohnungen mit Wohnungslüftung im Vergleich zu Wohnungen mit sonst gleichen oder ähnlichen Eigenschaften (Grösse, Ausstattung, Zustand, Lage etc.) ein um diesen Betrag systematisch höheres Mietpreinsniveau aufweisen. Diese Ergebnisse gelten für die Marktregion Zürich, wo der aufgrund der Marktdaten abgeleitete Preiseffekt im Neubaubereich also in der gleichen Grössenordnung liegt wie die mit der Befragung indirekt ermittelte Zahlungsbereitschaft.

¹⁴ 9 - 28 % der Befragten nannten Luftqualität, Komfort, Lärmschutz oder Feuchtigkeitsreduktion als Vorteil (Mehrfachnennungen möglich)

- Bei der direkten Befragung zeigte sich, dass die Zahlungsbereitschaft vom Einkommen der Befragten abhängig zu sein scheint (Personen mit höherem Einkommen geben eine höhere Zahlungsbereitschaft an als Personen mit niedrigem Einkommen), was jedoch bei den Befragten in MFH bei der Conjoint Analyse nicht nachgewiesen werden konnte. Aufgrund der ergänzend zur Conjoint-Analyse durchgeführten direkten Befragung wären 25 % der befragten MFH-Mieter bereit, mehr Mietzins für eine Lüfterneuerungsanlage zu bezahlen.
- Bei Altbauten mit unsanierten Fenstern ist die Zahlungsbereitschaft für neue Fenster höher als diejenige für eine Komfortlüftung. Damit wird einerseits bestätigt, dass bei Teilsanierungen der Ersatz von alten Fenstern eine höhere Priorität genießt als der Einbau einer kontrollierten Wohnungslüftung.¹⁵
- Die Zahlungsbereitschaft für eine kontrollierte Lüftung ist bei Neubauten grösser als bei Altbauten. Dies kann als Folge des vorgenannten Punktes oder evtl. als Einkommenseffekt interpretiert werden. Bei Altbauten ist ein Komfortgewinn in erster Linie durch neue Fenster möglich und zwar sowohl aufgrund der kalten Oberflächentemperaturen wie auch aufgrund der Undichtigkeiten und der damit verbundenen Zugerscheinungen. Bei Neubauten dagegen bringt eine weitere Verbesserung bei Fenstern nur noch einen geringen zusätzlichen Nutzen.

Folgende Umstände sind bei der Interpretation der Ergebnisse der Conjoint Analyse unbedingt zu berücksichtigen: Die Zahlen basieren auf den Angaben, welche die Befragten im Rahmen eines Interviews gemacht haben. Ob diese bei der Wohnungswahl tatsächlich entsprechend entscheiden und die zusätzlichen Kosten in Kauf nehmen würden, muss unklar bleiben. Die Befragung zur Conjoint-Analyse erfolgte, nachdem die wesentlichen Eigenschaften einer kontrollierten Wohnungslüftung möglichst neutral beschrieben wurden. Heute kann nur bei einer kleinen Minderheit der Mieter davon ausgegangen werden, dass sie die Vorzüge einer Lüfterneuerungsanlage bereits kennt und bei der Wohnungssuche entsprechend berücksichtigt.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass das Sample der Befragten zum grössten Teil aus den Kantonen ZH, BE, AG, TG und BL stammt. Möglicherweise ist die Zahlungsbereitschaft in anderen Kantonen bzw. in peripheren Gebieten aufgrund eines höheren Anteils von Haushalten mit tiefem Einkommen sowie aufgrund eines geringeren Bekanntheitsgrades von Minergie tiefer.

Für einen Vermieter stellt sich folglich die Frage, ob es ihm gelingt, den potenziellen Mietern die Vorzüge zu vermitteln und so die entsprechende Zahlungsbereitschaft zu aktivieren.

5.3.5 Entwicklung der Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden wird die Wirtschaftlichkeit von Lüftungssystem für Niedrigenergie-Wohngebäuden für zwei mögliche Sichtweisen differenziert betrachtet:

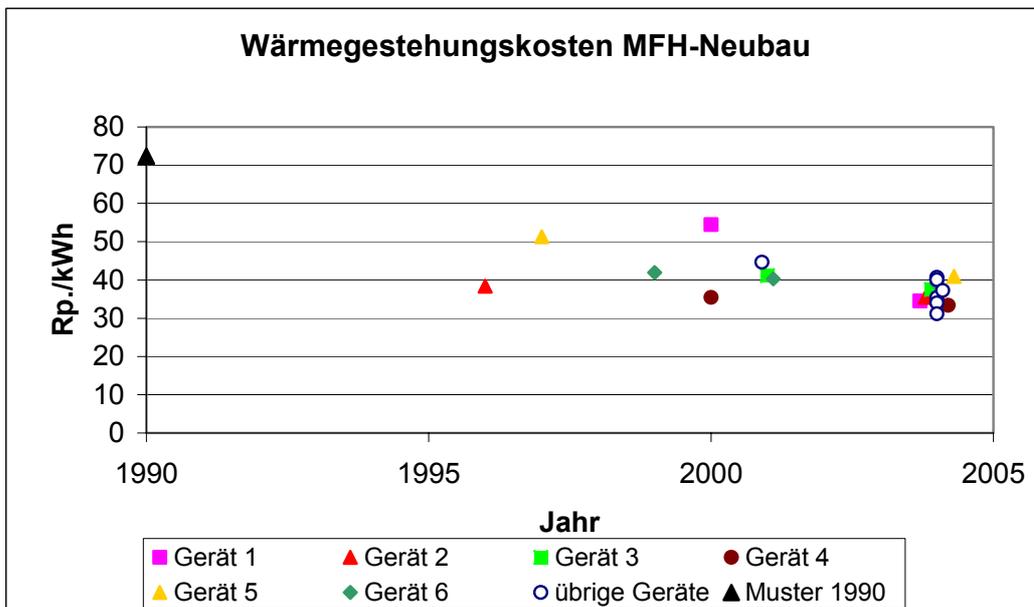
- **Energiotechnologische Sicht:**
Bei der rein energietechnologischen Sicht werden die aufgrund der Anschaffungs- und Betriebskosten für das Lüftungssystem die Gestehungskosten der mit dem System eingesparten Wärme berechnet. Diese Gestehungskosten werden den vermiedenen Kosten bei der Wärmeerzeugung gegenübergestellt (Kosten für Heizöl). Diese Sichtweise entspricht der im Technologie-Monitoring I gewählten Methodik.
- **Sicht des Investors:**
Die Sicht des Investors entscheidet schlussendlich über den Markterfolg von Lüftungssystemen in Niedrigenergie-Wohngebäuden. Aus Sicht des Investors müssen die zusätzlichen Investitions- und Unterhaltskosten des Lüftungssystems durch eine bessere Vermietbarkeit resp. höhere Mitzinserträge gerechtfertigt werden. Diese wiederum können anhand der im vorhergehenden Kapitel dargestellten Zahlungsbereitschaft beurteilt werden. Mit der Berücksichtigung der

¹⁵ Wobei die Gefahr besteht, dass wenn durch den Ersatz der Fenster (und weiterer Massnahmen) die Dichtigkeit der Gebäudehülle erhöht wird Folgeprobleme durch unzureichenden Luftwechsel entstehen, wenn nicht auch eine kontrollierte Wohnungslüftung installiert wird.

Investitions- und Unterhaltskosten des Lüftungssystems sowie des zusätzlichen Mietzinsersparnis kann die Rendite (resp. der interne Zinssatz) aus Sicht des Investors berechnet werden. Die reduzierten Energiekosten, fallen dem Mieter zugute. Zudem sind sie in der Zahlungsbereitschaft der Mieter bereits berücksichtigt.

Energetechnologische Sicht: Gestehungskosten der eingesparten Wärme

Die folgende Grafik zeigt die Wärmegestehungskosten der einzelnen untersuchten Geräte für den Neubau eines Mehrfamilienhauses¹⁶. Geräte, für welche Zahlen aus verschiedenen Jahren verfügbar sind, sind gesondert aufgeführt (Geräte 1 -6). Eingetragen ist zudem ein Mustergerät aus dem Jahr 1990. Die Annahmen für Geräte- und Installationskosten, Wärmerückgewinnungsgrad, etc. wurden aus den Ergebnissen der vorhergehenden Kapiteln abgeleitet.



G:\2003\1039\3-Bearb\Lüftung\[Monitoring-kwl.xls]Ergebnisse-Neubau Ber2

Bild 21. Kosten der eingesparten Wärme für eine kontrollierte Wohnungslüftung in einem MFH-Neubau

Alle Geräte, für welche Zahlen aus mehreren Jahren verfügbar waren, zeigen eine sinkende Tendenz der Wärmegestehungskosten. Besonders ausgeprägt ist die Reduktion bei Geräten, welche einen effizienteren Wärmetauscher einsetzen wie früher (Geräte 1 und 5). Die durchschnittlichen Gestehungskosten der untersuchten Geräte aus dem Jahr 2004 liegen für das untersuchte Fallbeispiel bei 38 Rp./kWh. Verglichen mit dem Mustergerät aus dem Jahr 1990 (72 Rp./kWh) ergibt sich nahezu eine Halbierung der Wärmegestehungskosten innerhalb von 14 Jahren. Die nachfolgende Grafik zeigt den Anteil der einzelnen Faktoren auf die Entwicklung der Gestehungskosten.

¹⁶ Definition gemäss Fallbeispiel im Kap. 4.2.1

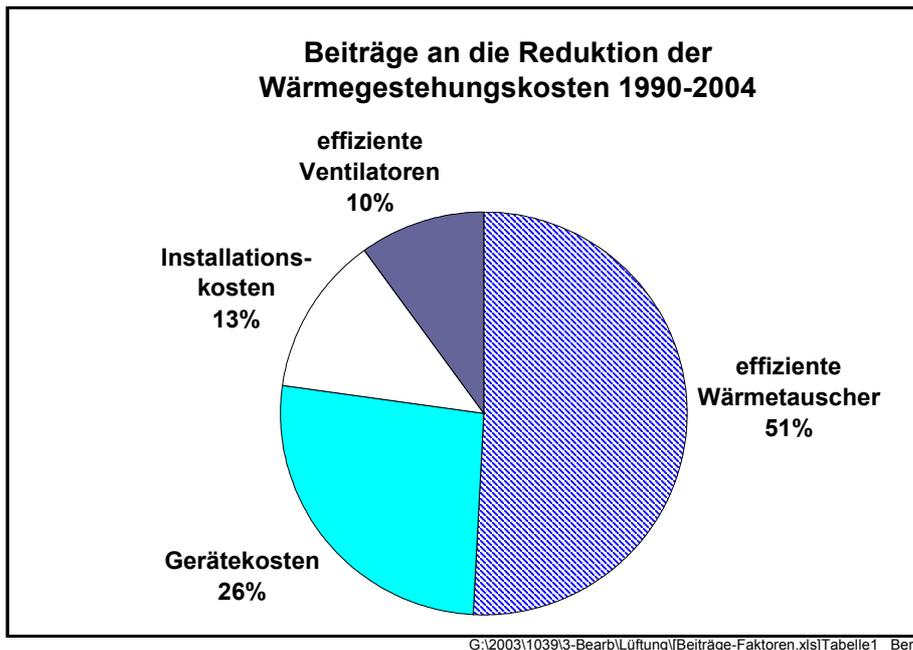
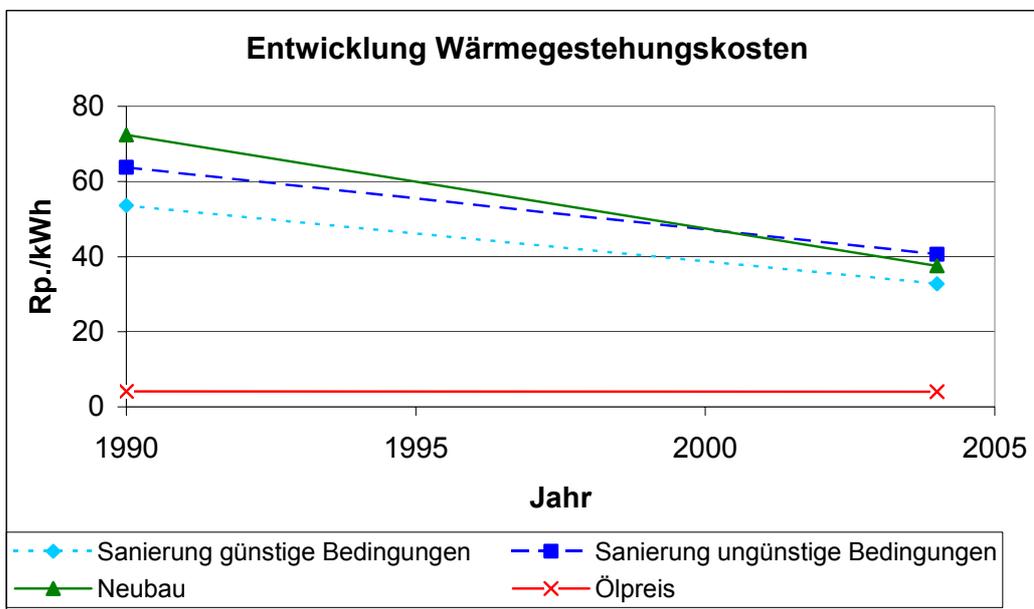


Bild 22. Anteil der einzelnen Faktoren an der Entwicklung der Gestehungskosten

Aus rein energiepolitischer Sicht, d.h. ohne Berücksichtigung des Zusatznutzens - erscheint eine kontrollierte Lüftung dann rentabel, wenn die Gestehungskosten der eingesparten Wärme günstiger sind wie die vermiedenen Kosten bei der Wärmeerzeugung. Das folgende Diagramm zeigt die Entwicklung der Wärmegestehungskosten für die untersuchten Fallbeispiele (Mehrfamilienhaus Neubau, Sanierung unter günstigen und ungünstigen Bedingungen) sowie die Heizölpreise, welche die vermiedenen Kosten der Wärmeerzeugung widerspiegeln.



G:\2003\1039\3-Bearb\Lüftung\Monitoring-kwl.xls\Ergebnisse-allg Ber1

Bild 23. Bisherige Entwicklung der Wärmegestehungskosten einer kontrollierten Wohnungslüftung gem. Fallbeispiel

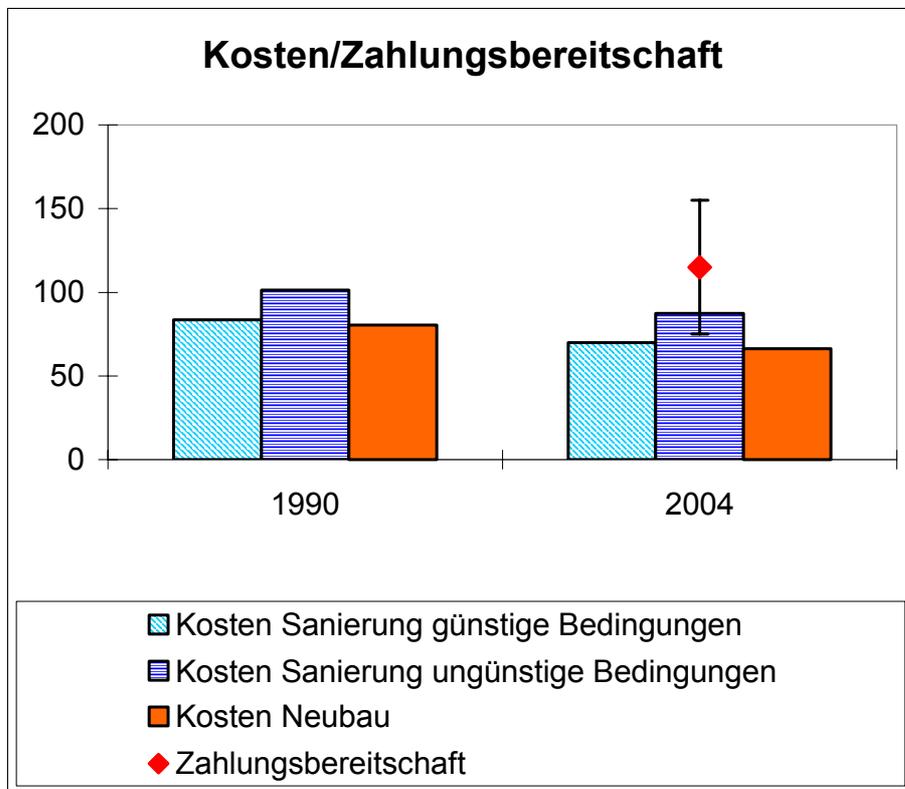
Für alle untersuchten Fallbeispiele ergibt sich eine deutliche Reduktion der Gestehungskosten der eingesparten Wärme. Allerdings sind alle Werte weit entfernt von den vermiedenen Brennstoffkosten

einer Heizungsanlage. Die Unterschiede zwischen Neubau und Sanierung fallen relativ gering aus. Im Sanierungsfall sind nicht nur die Investitionskosten höher sondern auch der energetische Gewinn¹⁷.

Sicht des Investors: Rentabilität der Investition

Der Investor muss für die Investitionskosten und den Unterhalt der Anlage aufkommen. Die Investitionen für eine Komfortlüftung betragen pro Wohnung rund Fr. 9'000.--, wobei die Unterschiede zwischen Neubau und Sanierung bei günstigen Voraussetzungen nur sehr gering ausfallen. Bei weniger günstigen Voraussetzungen fallen die Investitionen ca. Fr. 3'000.-- höher aus. Die Wartungskosten schlagen mit rund Fr. 130.-- pro Wohnung und Jahr zu Buche.

Die nachfolgende Grafik zeigt, dass der Investor für eine Komfortlüftung mit monatlichen Aufwendungen von Fr. 70.-- (Neubau und Sanierung unter günstigen Voraussetzungen) resp. Fr. 90.-- (Sanierung unter eher ungünstigen Voraussetzungen) rechnen muss. Eingetragen ist zudem die Zahlungsbereitschaft von durchschnittlich Fr.115.-- pro Monat (mit einem 95%-Vertrauensintervall Fr. 75.-- bis Fr. 153.--).



G:\2003\1039\3-Bearb\Lüftung\[Monitoring-kwl.xls]Ergebnisse-allg Ber3

Bild 24. Kosten einer kontrollierten Wohnungslüftung aus Sicht des Vermieters (Kapital- und Wartungskosten) im Vergleich zur Zahlungsbereitschaft der Mieter

Insbesondere bei Neubauten steht den Aufwendungen für eine Wohnungslüftung eine deutlich höhere Zahlungsbereitschaft der Mieter gegenüber. Bei Sanierung wird die Zahlungsbereitschaft zwar geringer eingeschätzt als bei Neubauten, jedoch liegt sie auch hier über den Aufwendungen. Auch wenn die Unsicherheiten der Quantifizierung der Zahlungsbereitschaft berücksichtigt werden, kann doch festgestellt werden, dass die Aufwendungen für eine Komfortlüftung über erhöhte Mietzinse

¹⁷ Bei einer Sanierung wird für den Referenzfall (baugleiches Gebäude ohne kontrollierte Lüftung) ein höherer thermisch aktiver Luftvolumenstrom angenommen wie bei einem Neubau, da die Gebäudehülle weniger dicht ist.

gedeckt werden können und die Attraktivität der Wohnungen trotzdem steigt. Dem Vermieter muss es jedoch gelingen, dem potenziellen Mieter die Vorteile der Komfortlüftung zu kommunizieren.

Im Sanierungsbereich ist zu berücksichtigen, dass die Zahlungsbereitschaft für eine Komfortlüftung geringer ist als für energietechnisch verbesserte Fenster. Für die Investierenden besteht jedoch gerade bei der Erneuerung des Gebäudebestandes das Risiko, dass nach dem Einbau verbesserter Fenster Feuchtigkeitsprobleme auftauchen können, wenn die Lüftungsfrage nicht gelöst wird. Da Komfortlüftungen mit beträchtlichen Investitionen und Eingriffen in die Wohnung verbunden sind, ist damit zu rechnen, dass sie primär bei Gesamtanierungen eingebaut werden. wo im Sinne einer wertvermehrenden Strategie Mietzinserhöhungen in Kauf genommen werden.

5.4 Künftige Entwicklung

5.4.1 Entwicklung der Investitionskosten für Lüftungsgerät

Wie im Kapitel bisherige Entwicklung beschrieben, kann angenommen werden, dass bisher die Kosteneinsparungen durch Effizienzsteigerungen bei Produktion und Vertrieb von den Anbietern nicht an die Kunden weitergegeben werden. Vielmehr wurden diese dazu genutzt, die Produkte weiter zu verbessern, das Vertriebsnetz und die Produktionskapazitäten auszubauen und den früheren Entwicklungsaufwand zu refinanzieren. Dieser Zustand führt - wenn er zulange anhält - zu einem instabilen Markt mit überhöhten Preisen. Dies wird gemäss [IEA, 2000] üblicherweise in einer Shakeout-Phase¹⁸ kompensiert, in welcher die Preise viel stärker fallen, als die Anbieter ihre eigenen Kosten reduzieren können (siehe Grafik). Entsprechend ist zu erwarten, dass die Verkaufspreise der Lüftungsgeräte in Zukunft stark unter Druck geraten. Die Tatsache, dass die Anbieter begonnen haben, höhere Rabatte zu gewähren, kann als Zeichen interpretiert werden, dass dies bereits begonnen hat. Die Entwicklung z.B. bei den Wärmepumpen (siehe Technologie-Monitoring I) in den 90er Jahren zeigt, dass die Hersteller/Anbieter in dieser Phase so stark unter Druck geraten können, dass einige mit Zusammenschlüssen reagieren müssen oder ganz vom Markt verdrängt werden.

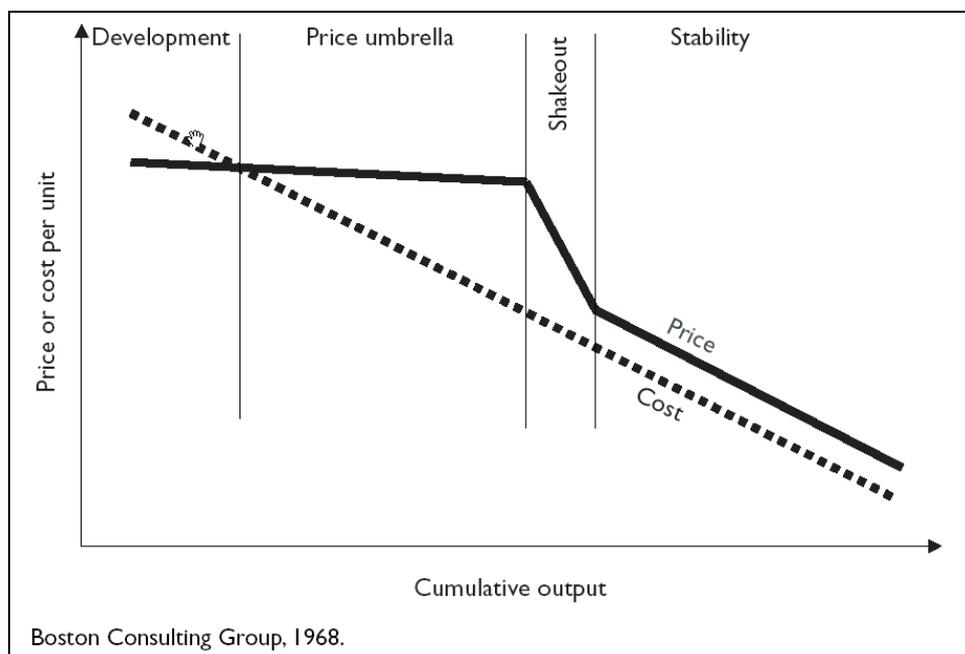


Bild 25. Preis- und Kostenentwicklung für neue Produkte [IEA, 2000]

¹⁸ Shakeout = Gesundschumpfung

Die Produktion der Lüftungsgeräte erfolgt bisher auf Fertigungsstrassen, wobei die einzelnen Arbeitsschritte in der Regel von Hand ausgeführt werden. Mittelfristig wird primär damit gerechnet, dass vor allem die Teilkomponenten (z.B. Wärmetauscher) vollautomatisch produziert werden. Die Fertigung des Lüftungsgerätes dürfte dagegen erst später automatisiert werden. Wie rasch die Kostensenkungspotenziale durch automatisierte Produktion erschlossen werden, hängt von der Entwicklung des europäischen Marktes ab. Dieser basiert bisher insbesondere darauf, dass in Skandinavien, Holland, Frankreich und Belgien eine mechanische Lüftung in Neubauten seit Jahren vorgeschrieben ist. In Deutschland wird diese ab dem Jahr 2000 aufgrund der neuen Energiesparverordnung (ESVO) dringend empfohlen. Grösstenteils werden in diesen Ländern allerdings einfache Abluftanlagen ohne Wärmerückgewinnung installiert. Ein deutliches Wachstum für Komfortlüftungen scheint vor allem dann möglich, wenn sich der Anteil der Komfortlüftungen in diesen Ländern erhöht und dieses System auch in weiteren Ländern an Bedeutung gewinnt. Mehr als eine Verdoppelung des bisherigen Volumens bis 2030 dürfte allerdings nur realistisch sein, wenn sich die Rahmenbedingungen (Energiepreise) deutlich ändern.

Die grossen Hersteller produzieren schon heute deutlich mehr als 10'000 Geräte pro Jahr. Wir gehen deshalb davon aus, dass die Produktion auch bei einem moderaten Wachstum bis ins Jahr 2020 weitgehend automatisiert erfolgt und dadurch ein spürbares Kostenreduktionspotenzial genutzt werden kann.

Auch beim Vertrieb der Geräte und Komponenten in der Schweiz kann noch ein bedeutendes Kostensenkungspotenzial vermutet werden. Im Jahr 2003 haben 15 Anbieter in der Schweiz 3'000 Lüftungsgeräte mit einer Leistung $< 300 \text{ m}^3/\text{h}$ abgesetzt (siehe Kap. 4.1). Auf jeden Anbieter kommen damit im Durchschnitt nur 200 Geräte pro Jahr - also ein Gerät pro Arbeitstag. Wenn man berücksichtigt, dass neben den Geräten noch eine Vielzahl von Komponenten für die Luftverteilung anzubieten sind, erscheint es offensichtlich, dass für einen effizienten Vertrieb deutlich höhere Absatzzahlen pro Anbieter notwendig sind. Auch bei insgesamt steigendem Markt wird unter den Anbietern in der Schweiz ein Verdrängungskampf zu erwarten, welcher mittelfristig deutlich höhere Absatzzahlen pro Anbieter ermöglichen wird. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Aufwand der Anbieter für Marketing, Akquisition/Ausbildung der Installateure und Aufbau des Sortiments bei einem zunehmend etabliertem Markt in Zukunft deutlich sinken wird.

Wir gehen davon aus, dass sich die Kosten für die Lüftungsgeräte bis 2020 durch Kosteneinsparungen bei Produktion und Vertrieb bis 2020 um 25 - 50 % reduzieren und sich danach kaum mehr weiter entwickeln. Diese Annahme gilt unter der Bedingung, dass die Ausstattung der Geräte nicht mehr wesentlich verändert wird. Wenn sich am Markt Geräte mit Kühlfunktion oder Feuchterückgewinnung (Rotationswärmetauscher) durchsetzen, wird kaum eine Preisreduktion im angegebenen Mass möglich sein. Die erwähnten Funktionen werden sich am Markt allerdings nur etablieren, wenn der zusätzliche Nutzen zu einer entsprechenden zusätzlichen Zahlungsbereitschaft führt.

5.4.2 Entwicklung der Installationskosten

Bei den Installationskosten (Kosten für Komponenten der Luftverteilung plus Montage der gesamten Anlage) wird eine weniger dynamische Entwicklung wie bei den Lüftungsgeräten erwartet.

Die Installation von Komfortlüftungen kann deutlich weniger von Lern- und Skaleneffekten eines wachsenden Marktes profitieren wie die Herstellung der dafür notwendigen Komponenten (inkl. Lüftungsgerät).

Für die Installateure spielt die geografische Nähe zu den Projekten eine wichtige Rolle. Das Wachstum einer einzelnen Firma wird dadurch gehemmt, dass bald neue Filialen eröffnet werden müssten, um ein grösseres Gebiet abzudecken. Ein steigendes Marktvolumen führt deshalb bei den Installateuren dazu, dass sich die Anzahl der Marktteilnehmer erhöht. Die bisherige Entwicklung zeigt dies deutlich, indem klassische Sanitär- und Heizungsinstallateure begonnen haben, ihr Geschäftsfeld um den Komfortlüftungsbereich zu erweitern. Eine steigende Anzahl von Marktteilnehmern führt zu

geringeren Lern- und Skaleneffekten, indem die Anzahl der ausgeführten Anlagen für den einzelnen Teilnehmer prozentual weniger stark steigt wie der Gesamtmarkt.

Bei den Herstellern und Händlern spielt die geografische Nähe zu den Projekten zumindest innerhalb der Landesgrenzen praktisch keine Rolle. Ein wachsender Markt kann nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der Marktteilnehmer - es kann sogar das Gegenteil der Fall sein. Ein Marktwachstum führt deshalb direkt zu Skaleneffekten.

Eine Reduktion der Installationskosten scheint vor allem durch verbilligte Komponenten bei gesteigertem Marktvolumen möglich. Hier rechnen wir mit einer Kostenreduktion in derselben Grössenordnung wie bei den Lüftungsgeräten. Der Arbeitsaufwand dürfte primär im Sanierungsbereich noch sinken, wenn die Hersteller wie für den Neubau vermehrt spezielle Luftverteilsysteme anbieten (z.B. Fernbedienungsschalter mit Funk- statt Drahtverbindung). Möglich ist auch, dass sich traditionelle Lüftungsfirmen auf die Installation von Komfortlüftungen spezialisieren. Vor allem bei grossen Projekten könnte dies zu reduzierten Montagekosten führen.

Insgesamt gehen wir bei der künftigen Entwicklung der Installationskosten bis 2030 von einer Kostenreduktion von ca. 20 - 30 % aus.

5.4.3 Entwicklung Wirkungsgrad Wärmerückgewinnung

Die besten heute angebotenen Lüftungsgeräte verfügen über Wärmetauscher, die einen Temperatur-Änderungsgrad von 0.85 aufweisen. Weitere Verbesserungen sind möglich, jedoch mit einem höheren konstruktivem Aufwand verbunden. Zum einen kann der Wirkungsgrad mit einem vergrösserten Wärmetauscher - oder genauer gesagt mit einer grösseren Wärmetauscherfläche - verbessert werden. Eine grössere Wärmetauscherfläche kann auch mit einer aufwändigeren Geometrie des Wärmetauschers erreicht werden.

Ob sich solche Systeme am Markt durchsetzen, bleibt fraglich, da die zusätzlichen Anschaffungskosten kaum durch die eingesparten Energiekosten kompensiert werden können. Eine weitere Verbesserung des durchschnittlichen Wirkungsgrads der eingesetzten Geräte wird aber dennoch eintreten. Zu erwarten ist nämlich, dass die heute noch eingesetzten Kreuzstromwärmetauscher von kostengünstigeren Gegenstromwärmetauschern oder von Rotationswärmetauschern, welche beide über einen deutlich höheren Wirkungsgrad verfügen, ganz verdrängt werden.

Der Temperatur-Änderungsgrad der heute eingesetzten Geräte beträgt etwa 0.80 (siehe Kap. 4.3.3). Wir gehen davon aus, dass bis 2010 die Kreuzstromwärmetauscher praktisch ganz verschwunden sind, was eine Erhöhung des Temperatur-Änderungsgrads auf durchschnittlich 0.85 erlauben wird. Längerfristig ist es unter optimistischen Rahmenbedingungen (steigende Energiepreise und gesteigertes Bewusstsein bezüglich Energieeffizienz) möglich, dass aufwändigere Wärmetauscher (siehe oben) an Bedeutung gewinnen. Ein durchschnittlicher Temperatur-Änderungsgrad von 0.9 dürfte das obere Ende des möglichen Spektrums bedeuten.

5.4.4 Entwicklung des Zusatznutzens

Der Zusatznutzen resp. die für den Zusatznutzen bei den Mietern vorhandene Zahlungsbereitschaft kann sich durch folgende Entwicklungen künftig verändern:

Bekanntheitsgrad

Der Bekanntheitsgrad der kontrollierten Wohnungslüftung wird sich in Zukunft durch die zunehmende Verbreitung deutlich verbessern. Heute kennt erst eine Minderheit der Bevölkerung die

Vor- und Nachteile einer kontrollierten Wohnungslüftung. In Zukunft wird sich der Anteil derjenigen, welche in der Schule, am Arbeitsplatz oder in einer Wohnung die Eigenschaften bewusst wahrgenommen haben, deutlich erhöhen. Die Umfrageergebnisse der Studie 'Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohnbauten' [Econcept, Cepe, 2005] zeigen, dass die Zahlungsbereitschaft für eine kontrollierten Wohnungslüftung abhängig ist vom Bekanntheitsgrad der Lüftung. Bei steigendem Bekanntheitsgrad darf also auch einer erhöhten Zahlungsbereitschaft ausgegangen werden - unter der Voraussetzung, dass die Qualität der Anlagen sich nicht verschlechtert.

Minimierung der Nachteile

Gerade bei steigendem Bekanntheitsgrad muss den möglichen Nachteilen eine besondere Beachtung geschenkt werden, da sich bekanntlich schlechte Meldungen viel schneller verbreiten wie gute. Eine zusätzliche Gefahr für die Qualität der Anlagen geht vom zunehmendem Konkurrenzdruck aus. Es kann erwartet werden, dass die Bauherren den Preis als Vergabekriterium für eine Lüfterneuerungsanlage in Zukunft deutlich stärker gewichten wie heute, wo wie bei einer jungen Technologie üblich auch Referenzen und die Einschätzung der Produktqualität noch relativ stark berücksichtigt werden. Der Anreiz für Planer, Anbieter und Installateure wird zunehmen, durch eine geringere Anzahl von Zu- und Abluftöffnungen, durch weniger umfangreiche Massnahmen zur Schalldämmung o.ä. die Kosten zu senken und sich so gegenüber der Konkurrenz einen Vorteil zu verschaffen. Bei steigenden Absatzzahlen werden schliesslich neue Marktteilnehmer erscheinen, welche über weniger Erfahrung und evtl. auch über eine schlechtere Ausbildung verfügen.

Andererseits darf auch erwähnt werden, dass zahlreiche Anbieter in den letzten Jahren einiges unternommen haben, um die Qualität ihrer Anlagen sicher zu stellen. Erwähnt seien an dieser Stelle Ausbildungsveranstaltungen für Installateure, Planungstools und technologische Weiterentwicklungen wie z.B. der Einsatz besserer Filter und Schalldämpfer. Es ist allerdings klar, dass damit eine breite, möglichst flächendeckende Qualität der neu installierten Anlagen, wie sie für den guten Ruf der Technologie notwendig ist, nicht sichergestellt werden kann.

Bis heute existiert in der Schweiz keine Norm oder kein Label, welches dem Endkunden eine Lüfterneuerungsanlage entsprechend dem Stand der Technik garantiert. Bei den im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Interviews gaben alle Experten an, dass für zusätzliche Markterfolge von Lüfterneuerungssystemen die Qualitätssicherung entscheidend ist. Es liegt deshalb auf der Hand, dass die Einführung entsprechender Qualitätsstandards als Voraussetzung für einen steigenden Markt angesehen werden muss.

Unter der Annahme, dass die erwähnten Standards geschaffen werden und sich am Markt durchsetzen, kann davon ausgegangen werden, dass die von den Bewohnern wahrgenommenen Nachteile (insbesondere von der Lüftungsanlage verursachte Geräusche und Geruchsübertragung) deutlich entschärft werden können. Vor allem langfristig kann mit einer weiterentwickelten Technologie bei einem etabliertem Markt, wo kaum mehr neue Teilnehmer in den Markt drängen, davon ausgegangen werden, dass die heute von den Benutzern genannten Nachteile auf ein kaum mehr wahrnehmbares Niveau reduziert werden können.

Optimierung des Zusatznutzens

Eine weitere Möglichkeit, um den Zusatznutzen zu erhöhen, ist es, die bekannten Vorteile der kontrollierten Wohnungslüftung weiter zu optimieren oder neue Vorteile zu schaffen.

Die Anbieter von Komfortlüftungssystemen haben bereits in den letzten Jahren versucht, den Zusatznutzen durch bessere Filter, welche Staub und Blütenpollen zurückhalten, zu erhöhen. Dieser Aspekt dürfte aber nur für einen kleinen Teil der Bevölkerung (Allergiker) von Bedeutung sein, was auch durch Umfragen bestätigt wird [Econcept, Cepe, 2005]. Primär wurden bisher aber Verbesserungen der angebotenen Systeme und Komponenten unternommen, um Schwachstellen zu eliminieren.

Die übrigen von den Benutzern wahrgenommenen Vorteile (gute Raumluftqualität, Rückkehr in frisch gelüftete Räume nach Abwesenheit, Reduktion von Feuchtigkeitsproblemen und Aussenlärm, der gestiegene Komfort sowie die Erhöhung der Sicherheit durch geschlossene Fenster) lassen sich - eine richtige Planung der Anlage vorausgesetzt - durch technische Massnahmen kaum verbessern.

Es ist schwierig vorauszusagen, ob in Zukunft vermehrt Anlagen mit Feuchterückgewinnung oder Kühlfunktion installiert werden. Eine Feuchterückgewinnung ist mit einem Rotationswärmetauscher möglich, welcher wesentlich teurer ist, wie eine heute üblicher Gegenstromwärmetauscher. Eine geringfügige Reduzierung der Raumtemperaturen im Sommer ist bereits heute möglich, wenn die Frischluft über ein Erdregister eingebracht wird. Mit einer geeigneten adiabatischen Kühlung¹⁹ kann eine stärkere Wirkung mit relativ geringem Energieverbrauch erreicht werden. Durch die geringen Luftmengen einer kontrollierten Wohnlüftung kann die Raumtemperatur nur um max. 2 bis 3°C reduziert werden. Es ist deshalb offen, ob sich nicht von der Lüftung unabhängige Kühlsysteme - wenn überhaupt - durchsetzen.

Sicher ist hingegen, dass eine Erhöhung des Zusatznutzens durch Feuchterückgewinnung oder Kühlfunktion durch die zusätzlichen Kosten für das Lüftungsgerät zumindest teilweise kompensiert wird.

Veränderte Rahmenbedingungen

Die Bedeutung bestimmter Zusatznutzen ist von den äusseren Rahmenbedingungen abhängig. So kann z.B. die Bedeutung der Reduktion des Aussenlärms und von Staubpartikeln sinken, wenn das Immissionsniveau durch Massnahmen an den Quellen reduziert wird. Insbesondere beim Feinstaub ist es aber auch möglich, dass die Bedeutung durch eine steigende Wahrnehmung der Problematik und der Auswirkungen zunimmt. Bedeutende Auswirkungen auf die Zahlungsbereitschaft für den Zusatznutzen wie sie in [Econcept, Cepe, 2005] ermittelt worden ist, sind jedoch nicht zu erwarten. In den Umfragen, welche der Arbeit zugrunde liegen, wurden die Reduktion des Aussenlärms und der Schadstoffe in der Raumluft nur von einem kleinen Teil der befragten Mieter als Vorteil einer Lüfterneuerungsanlage genannt. Dies schliesst aber keinesfalls aus, dass diese Vorteile an belasteten Standorten ein entscheidendes Kriterium darstellen können. Zu berücksichtigen sind die sich verändernden Rahmenbedingungen dann, wenn langfristige Marktpotenziale aufgrund des Lärmschutzes und der Reduktion von Schadstoffen berechnet werden.

Zusammenfassung

In der Summe gehen wir mittelfristig davon aus, der Zusatznutzen durch die Etablierung von Qualitätsstandards gesteigert und durch den zunehmenden Bekanntheitsgrad besser wahrgenommen wird.

Wenn die Ansprüche an den Wohnkomfort weiter steigen, kann der Zusatznutzen einer Komfortlüftung durch Kühlfunktion und evtl. Feuchterückgewinnung erhöht werden. Zu berücksichtigen ist aber, dass dem erhöhten Zusatznutzen auch zusätzliche Kosten gegenüberstehen, womit die Attraktivität in geringerem Masse steigt.

In welchem Masse und in welchem Tempo durch die erwähnten Punkte die Zahlungsbereitschaft für eine Wohnung mit Komfortlüftung steigt, lässt sich allerdings kaum quantifizieren.

¹⁹ Verdunstungskühlung wobei die Abluft vor dem Wärmetauscher gekühlt wird; bei Verwendung von Kontaktbefeuchtern oder Kaldampfgeneratoren werden Leistungsziffern > 7 erreicht.

5.4.5 Entwicklung der Wirtschaftlichkeit

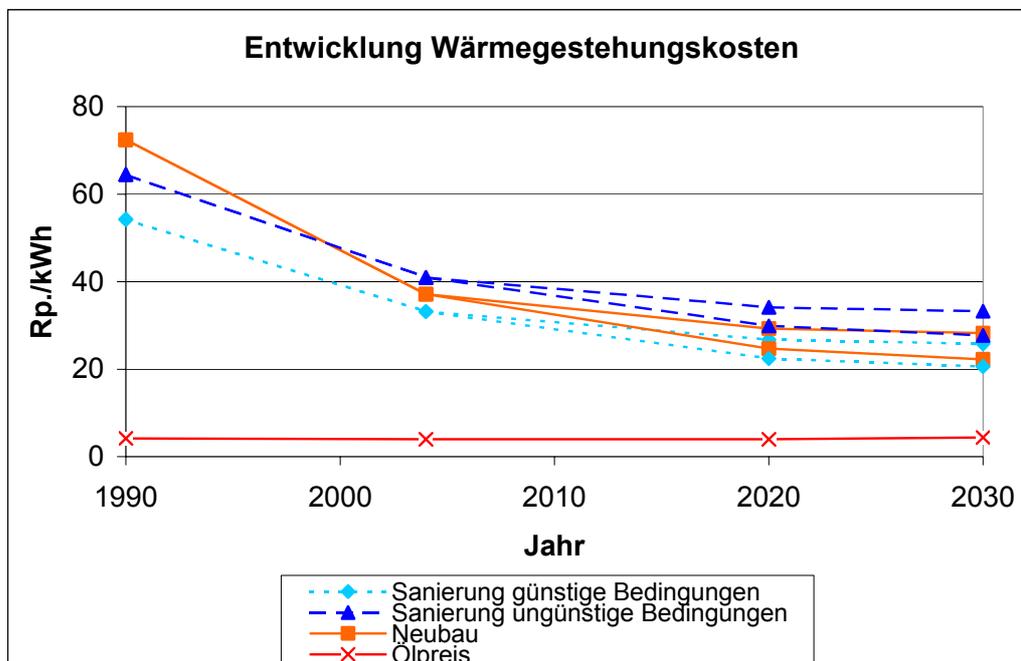
Die folgende Tabelle zeigt entsprechend den vorangehenden Kapiteln die Entwicklung der Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit beeinflussen:

	Stand 2004	Veränderung 2004/2020	Veränderung 2020/2030
Kosten Lüftungsgerät	Fr. 2'650.--	-25 bis -50 %	-
Installationskosten: - Neubau - Sanierung	Fr. 5'500.-- Fr. 5'900.--	-15 bis -25 %	-5 %
Wärmerückgewinnungsgrad	0.80	+0.05	0 bis +0.05
Strombedarf für Luftförderung	0.4 kWh/m ³	-10 bis -20 %	- 10 %
Planungskosten	Fr. 800.--	-25 bis -50 %	-

Tabelle 16 Entwicklung der Faktoren, welche für die Wirtschaftlichkeit entscheidend sind

Energetechnologische Sicht: Gestehungskosten der eingesparten Wärme

Die erwartete Entwicklung der Wärmegestehungskosten zeigt, dass die Gestehungskosten der eingesparten Wärme in Zukunft weniger rasch sinken werden wie bisher. Dies liegt primär daran, dass der Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsgeräte seit Beginn der 90er Jahre massiv verbessert worden ist und sich nur noch in beschränktem Ausmass weiter senken lässt. Dies kann auch nicht durch die verstärkt sinkenden Geräte- und Installationskosten kompensiert werden.



G:\2003\1039\3-Bearb\Lüftung\[Monitoring-kwl.xls]Ergebnisse-allg Ber4

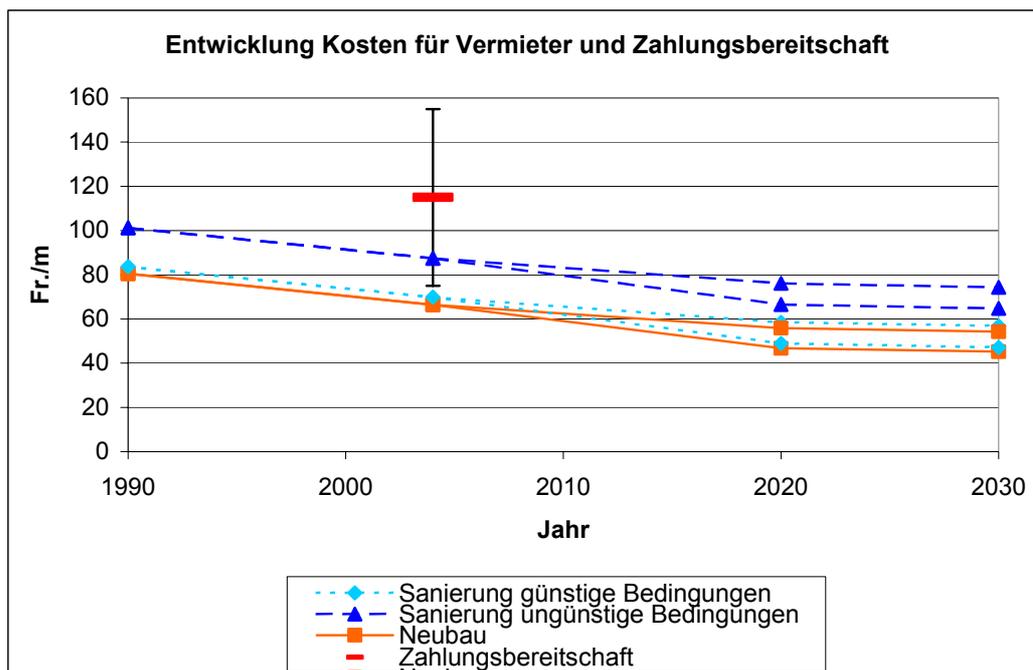
Bild 26. Entwicklung der Gestehungskosten der eingesparten Wärme für eine kontrollierte Wohnungslüftung

Auch auf lange Sicht kann eine Wirtschaftlichkeit von Komfortlüftungen alleine aufgrund der vermiedenen Energiekosten nicht erreicht werden. Die Bewertung des Zusatznutzens wird deshalb nach wie vor entscheidend bleiben für den Markterfolg.

Sicht des Investors: Rentabilität der Investition

Aus Sicht des Vermieters ist entscheidend, dass die Kosten für Investition und Unterhalt der Lüftungsanlage durch eine erhöhte Zahlungsbereitschaft der Mieter aufgewogen werden.

Die Investitionen für eine Komfortlüftung werden bis 2030 von heute rund Fr. 9'000.-- auf Fr. 5'500.-- bis Fr. 7'000.-- pro Wohnung fallen. Die Unterschiede zwischen Neubau und Sanierung bei günstigen Voraussetzungen bleiben gering (siehe nachfolgende Grafik). Durch die sinkenden Investitionen wird vor allem der Sanierungsbereich profitieren, da hier die Zahlungsbereitschaft geringer ist als bei Neubaubauten. Beim Neubau sieht das Verhältnis zwischen den Aufwendungen des Vermieters und der Zahlungsbereitschaft der Mieter nach wie vor sehr vielversprechend aus.



G:\2003\1039\3-Bearb\Lüftung\[Monitoring-kwl.xls]Ergebnisse-allg Ber5

Bild 27. Entwicklung der Wirtschaftlichkeit von Komfortlüftungen aus Sicht des Vermieters

Wie bereits erwähnt, sind die angegebenen Zahlungsbereitschaften mit Vorsicht zu interpretieren. Wichtig ist insbesondere der Umstand, dass die Befragten im Laufe der Umfrage über die wesentlichen Vorteile einer kontrollierten Wohnungslüftung informiert worden sind. Andererseits darf nicht vergessen werden, dass es sich um Mittelwerte handelt. Die Werte liegen bei Personen mit höherem Einkommen vermutlich spürbar höher. Im Sanierungsbereich dürften sich vor allem bei Gesamtsanierungen für gehobene Ansprüche zunehmend Chancen für Komfortlüftungen ergeben. Hier wirkt sich auch positiv aus, dass bei der Gebäudeerneuerung die Lüftungsfrage ohnehin gelöst werden muss, da sonst nach dem Einbau verbesserter Fenster Feuchtigkeitsprobleme auftreten können.

5.5 Fazit

Bisherige Entwicklung

Die Anzahl der installierten Komfortlüftungen hat in den letzten Jahren rasch zugenommen. Erfolgreich ist die Komfortlüftung vor allem im Neubau, wo sie bereits bedeutende Marktanteile erzielt (ca. 10 %). Als Vorteil einer Komfortlüftung wird vielmehr der Zusatznutzen - primär in der Form einer verbesserten Raumluftqualität - als die Reduktion der Lüftungswärmeverluste wahrgenommen.

Ausschlagend für den bisherigen Markterfolg in der Schweiz war eindeutig das Label Minergie, welches neben einer überdurchschnittlichen Wärmedämmung auch eine kontrollierte Lüfterneuerung verlangt. Die öffentliche Hand hat mit dem Label Minergie die Einführung von Komfortlüftungen in der Schweiz entscheidend in Gang gebracht.

Die kontrollierte Wohnungslüftung kann mittlerweile als ausgereifte Technologie bezeichnet werden. Bei schlecht geplanten oder ausgeführten Anlagen treten z.T. noch Probleme mit Geräuschen der Lüftungsanlage oder Geruchsübertragung auf.

Entwicklungspotenzial

Ein bedeutendes Entwicklungspotenzial besteht für Komfortlüftungen vor allem aufgrund der Tatsache, dass bei informierten Mieter vor allem im Neubau eine hohe Zahlungsbereitschaft zu bestehen scheint, der Bekanntheitsgrad insgesamt aber noch eher gering ist.

Im Neubau scheint einer wesentlichen Steigerung des bisherigen Marktanteils wenig im Wege zu stehen. Schwieriger dürften Erfolge im Sanierungsbereich zu erzielen sein. Besonders erfolgsversprechend scheinen hier Gesamtsanierungen für gehobene Ansprüche.

Aus technischer Sicht haben die Lüftungsgeräte bereits einen hohen Stand erreicht. Die Anbieter haben begonnen, zunehmend Gesamtsysteme aufzubauen. Diese werden in Zukunft noch verstärkt rationellere Arbeitsabläufe ermöglichen. Zudem bieten sie eine wichtige Voraussetzung für eine effektive Qualitätssicherung. Die Preise für Komfortlüftungen werden noch deutlich sinken.

Erfolgsfaktoren für die Zukunft

Es scheint offensichtlich, dass für den Markterfolg von Lüftungssystem in Niedrigenergie-Wohnbauten auch auf längere Sicht der Zusatznutzen in Form der gesteigerten Luftqualität, etc. matchentscheidend bleiben wird. Die aus dem rein energetischen Blickwinkel berechneten Energiegestehungskosten der eingesparten Wärme lassen sich durch technische Fortschritte nicht auf das Mass der vermiedenen Wärmebereitstellungskosten reduzieren - auch dann nicht, wenn die Energiekosten massiv steigen oder die externen Kosten mitberücksichtigt werden.

Der Zusatznutzen resp. die daraus resultierende effektive Zahlungsbereitschaft für kontrollierte Lüftungssysteme muss deshalb bei der Marktbearbeitung im Zentrum stehen. Primär muss es dabei darum gehen, die Zahlungsbereitschaft, wie sie im Rahmen der Studie 'Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohnbauten' ermittelt worden ist, am Markt tatsächlich zur Geltung zu bringen.

Dies bedingt einerseits, dass der Bekanntheitsgrad von Komfortlüftungen bei Vermietern, Investoren und Architekten steigt. Insbesondere muss dabei vermittelt werden, dass die Attraktivität einer Wohnung mit überdurchschnittlicher Wärmedämmung und einer Komfortlüftung steigt, da vor allem im Neubau und bei Sanierungen für gehobene Ansprüche eine grosse Zahlungsbereitschaft vermutet werden kann. Eine Komfortlüftung stellt aus Sicht des Vermieters eine lohnenswerte Investition dar.

Ebenso wichtig ist es, dass der Zusatznutzen einer Komfortlüftung den Mietern vermittelt werden kann. Nur so gelingt es, die beim informierten Mieter vorhandene Zahlungsbereitschaft breit zum Tragen zu bringen. Längerfristig muss es darum gehen, den Begriff Komfortlüftung als Synonym für eine ausgezeichnete Raumluftqualität zu etablieren und entsprechende Komfortansprüche zu entwickeln.

Eine besondere Beachtung ist bei wachsendem Marktvolumen und zunehmendem Kostendruck der Qualitätssicherung zu schenken. Schlecht ausgeführte Anlagen, welche z.B. störende Geräusche erzeugen oder Gerüche übertragen, machen den Zusatznutzen zunichte. Wenn sich die negativen Erfahrungen herumsprechen, können sie die Zahlungsbereitschaft für Komfortlüftungen entscheidend gefährden.

Es scheint offensichtlich, dass eine effektive Qualitätssicherung am einfachsten mit geeigneten Gesamtsystemen sichergestellt werden kann. Die Schaffung eines entsprechenden Qualitätslabels sollte deshalb unbedingt geprüft werden. Aber auch der Ausbildung von Installateuren und Planern kommt eine wichtige Bedeutung zu.

Konsequenzen für die Energiepolitik

Aufgrund des Verlaufs der quantitativen Entwicklung und der Aussagen von Branchenvertretern erscheint es offensichtlich, dass die Verbreitung der Komfortlüftung in der Schweiz zu wesentlichen Teilen auf das Label Minergie zurückzuführen ist. Das Beispiel Komfortlüftung zeigt eindrücklich, wie die Markteinführung einer neuen Technologie im Rahmen eines Standards, welcher primär über die gesteigerte (Wohn-)Qualität definiert wird, gelingen kann. Die Energieeffizienz kommt im Fahrwasser des Zusatznutzens (gesteigerter Komfort) deutlich schneller voran, wie dies alleine möglich gewesen wäre. Werden die Zukunftschancen von neuen Technologien beurteilt, kann eine einseitige energietechnische Beurteilung die Resultate nicht korrekt wiedergeben.

Bisher fehlen im Wohnungslüftungsbereich koordinierte Branchenaktivitäten weitgehend. Für die öffentliche Hand bietet sich die Möglichkeit, durch das Initialisieren einer gemeinsamen Plattform die Aktivitäten der Marktteilnehmer wesentlich zu verstärken.

Zumindest was technische Fragestellungen betrifft, ist dies im Rahmen des Energie-Clusters mit der Gründung der Arbeitsgruppe Komfortlüftung bereits gelungen. Die Arbeitsgruppe bildet eine wertvolle Basis für eine verstärkte Qualitätssicherung beispielsweise durch die Erarbeitung von Standards für Gesamtsysteme oder durch die Initiierung von Weiterbildungskursen für Installateure und Planer.

Im Bereich Information, Marketing, Aus- und Weiterbildung sind firmenübergreifende Aktivitäten fast ausschliesslich unter dem Label Minergie vorhanden. Diese Einbettung in ein Gesamtsystem erscheint für einen grossen Teil des zu bearbeitenden Marktes als richtig, insbesondere wenn die Endkunden (Gebäudebesitzer und Mieter) direkt angesprochen werden sollen. Schliesslich gilt es im Sinne einer effektiven Kommunikation den Gesamtnutzen (Komfort, Energieeffizienz, etc.) in den Vordergrund zu stellen und nicht die einzelnen Elemente, welche diesen ermöglichen (Wärmedämmung und Lüftung). Trotzdem können für spezielle Marktbereiche unabhängige Kommunikationsaktivitäten durchaus sinnvoll sein. So zum Beispiel wenn der Lärmschutz im Vordergrund steht. Hier ist es sicher einfacher und effektiver, das Interesse für eine Komfortlüftung direkt über diesen Aspekt zu wecken. Dass im Verlaufe einer vertieften Information auch das Label Minergie als weitergehende Komfortsteigerung zur Sprache kommt, ist dabei durchaus möglich und erwünscht. Im weiteren wäre zu prüfen, ob ein allfälliges Gütesiegel für Komfortlüftungen im Rahmen des Minergie Labels positioniert wird oder als unabhängiges Qualitätszeichen. Für letzteres würde der bedeutende Anteil an Gebäuden mit Komfortlüftung aber ohne Minergie Label sprechen (ca. 50%).

6 Membrantechnik

6.1 Ausgangslage und Gegenstand der Untersuchung

Bereits im Technologie-Monitoring I wurde aufgezeigt, dass bei Grossverbraucherprozessen ein bedeutendes Energiesparpotenzial, kombiniert mit einem hohen Innovationspotenzial und guter Wirtschaftlichkeit, erwartet wird [Eicher et al. 2003]. Der bedeutende Energieverbrauch industrieller Prozesse wird durch vielfältigste, oft massgeschneiderte Prozesse, Technologien und Produkte verursacht. Dies erschwert die Auswahl einer Technologie für das Technologie-Monitoring, da jede Technologie oder jeder Prozess für sich betrachtet, im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch der Schweiz, ein relativ kleines Energiesparpotenzial aufweist. Die Untersuchung einer ausgewählten Technologie kann also nur einen kleinen Teil der Grossverbraucherprozesse abdecken. Um der grossen Bedeutung der industriellen Prozesse Rechnung zu tragen, entschied die Begleitgruppe des Technologie-Monitoring II (TM II), als Beispiel einer zukunftsweisenden, innovativen Technologie, die Membrantechnik zu untersuchen. Die Membrantechnologie ist kein Einzelverfahren sondern bildet ein breites Technologiefeld mit zahlreichen Einsatzmöglichkeiten und steht hier stellvertretend für zahlreiche neue, zukunftsweisende Verfahren, die ein bedeutendes Energiesparpotenzial aufweisen. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie in unterschiedlichsten Bereichen mit grossem Wachstum (z.B. Biotechnologie) weisen auf ein grosses Markt- und Entwicklungspotenzial hin, das die Aufnahme der Membrantechnik in das Technologie-Monitoring begründet. Jene Anwendungen der Membrantechnik, beispielsweise im Gesundheitsbereich, die eine Verbesserung von Prozessen bewirken oder gänzlich neue Möglichkeiten für Problemlösungen und Produkte eröffnen, aber unter dem Gesichtspunkt des Energiesparens nicht relevant sind, werden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Die Untersuchung konzentriert sich auf Anwendungen, die in der Schweiz energetisch relevant sind. Nur am Rande werden auch international relevante Anwendungen betrachtet, die ein bedeutendes Energiesparpotenzial aufweisen, in der Schweiz aber nicht zum Einsatz kommen wie z.B. die Meerwasserentsalzung. Diese Frage ist aus Schweizer Sicht allenfalls für die Exportindustrie interessant.

Untersucht wird der heutige Stand und die Verbreitung der Technologie sowie die mögliche Entwicklung bis in ca. 10-20 Jahren. Mittels Literaturrecherchen, Interviews mit Forschenden und Anbietern sowie Anwendern der Technologie werden die existierenden Verfahren und Anwendungen sowie deren Bedeutung aufgezeigt.

Die Untersuchung der Membrantechnik weicht in folgenden Punkten von der Systematik der übrigen Untersuchungsbereiche des Technologie-Monitorings ab:

- Die Technologie steht als innovatives Beispiel, stellvertretend für die zahlreichen Prozesse und Verfahren in der Industrie, obwohl das energetische Sparpotenzial in absoluten Zahlen relativ klein ist.
- Statt eines einzelnen Verfahrens wird ein ganzes Technologiefeld untersucht. Die grosse Heterogenität dieses Technologiefelds führt dazu, dass statt repräsentativer Fallstudien für definierte Anwendungsbereiche einer Technologie, eher eine Markt- und Potenzialstudie durchgeführt wird. Die zahlreichen technologischen Varianten und die stark unterschiedlichen Anwendungsbereiche der Membrantechnik sowie unterschiedlichste Referenzverfahren und Auslegungen von Anlagen verunmöglichen ein Rechnen mit Durchschnittswerten. Dennoch werden exemplarisch Resultate bereits durchgeführter Fallstudien präsentiert (vgl. Kap. 6.4.1).
- Statt betriebswirtschaftlich quantifizierter Monitoringfaktoren werden qualitativ orientierte Hemmnisse und Erfolgsfaktoren für die Durchsetzung der Technologie identifiziert.

6.2 Verfahren der Membrantechnik

Im Folgenden werden jene Verfahren der Membrantechnik beschrieben, mit denen im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren Energie und Ressourcen eingespart werden können. Ein Kriterium zur Auswahl der untersuchten Verfahren war die Einschätzung der befragten Fachleute sowie die Ergebnisse der Literaturrecherche zum Sparpotenzial der Zukunft (energetisch relevante Anwendung innert der nächsten 10-20 Jahre). Eine ausführliche Darstellung der Untersuchungsergebnisse in den einzelnen Anwendungsbereichen folgt in den Kapiteln 6.3 und 6.4.

Ultra- und Mikrofiltration gehören zur Gruppe der druckgetriebenen Verfahren. Beide Verfahren arbeiten nach dem Prinzip poröser Filter, besitzen jedoch im Vergleich zur klassischen Filtration deutlich kleinere Poren. Mikrofiltrationsmembranen gewährleisten beispielsweise den vollständigen Rückhalt von Bakterien, Ultrafiltrationsmembranen sogar von Viren. Die Barrierewirkung gegen Mikroorganismen sowie die Entwicklung preisgünstiger Module und optimierter Betriebsweisen eröffnen der Ultra- und Mikrofiltration seit einigen Jahren neue Anwendungen in der grosstechnischen Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. Neben diesen Bereichen weisen die Ultra- und Mikrofiltration nach wie vor ein grosses Einsatzpotenzial in der Industrie auf, vor allem in den chemischen und pharmazeutischen Branchen sowie in der Lebensmittelindustrie.

Umkehrosmose und Nanofiltration gehören ebenfalls zu den druckgetriebenen Verfahren und werden zur Trennung von organisch/anorganisch-wässriger sowie rein organischer Systeme eingesetzt. Umkehrosmose-Membranen trennen Moleküle mit einem Molgewicht über 100g/mol vollständig ab und weisen einen Salzurückhalt von über 99% auf. Typische Betriebsdrücke liegen zwischen 15 und 150 bar. Mit organischen Nanofiltrations-Membranen werden bei Druckdifferenzen von 10 bis 50 bar für organische Moleküle hohe Rückhalte oberhalb eines Molgewichtes von 300g/mol (entspricht einer Molekülgrösse von 1nm) erzielt. Das zentrale Differenzierungsmerkmal organischer Nanofiltrations-Membranen ist ihre ionenselektive Wirkung. Anorganische Nanofiltrations-Membranen setzen den Trennschnitt etwa bei 600 g/mol und weisen eine sehr eingeschränkte Ionenselektivität auf.

Pervaporation und Dampfpermeation sind Verfahren zur Trennung wässrig-organischer oder rein organischer flüssiger Gemische. Bei der Pervaporation gehen die permeierenden Komponenten vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand über. Bei diesem Schritt kühlt sich das Feedgemisch ab, wodurch die Trennleistung abnimmt. Daher bestehen technische Pervaporationsanlagen aus Reihenschaltungen mit Membranmodulen und Wärmeaustauschern. Die Triebkraft für den Stofftransport erfolgt in der Regel durch ein permeatseitiges Vakuum. Die Pervaporation arbeitet unabhängig vom Phasengleichgewicht und ist daher dort interessant, wo konventionelle Trennverfahren nur mit hohem energetischen Aufwand durchgeführt werden können oder ganz versagen. Hauptanwendungen sind die Trennung von engsiedenden oder azeotropen Gemischen, die mit herkömmlicher Destillation nicht getrennt werden können. Aufgrund der notwendigen Zwischenaufheizung und des Einsatzes von Kältemaschinen zur Kondensation des Permeats ist die Pervaporation ein relativ teures Membranverfahren. Das wirtschaftliche Potenzial liegt vor allem in der Kombination mit anderen Prozessschritten. Bei der Dampfpermeation wird das zu trennende Gemisch direkt dampfförmig zugeführt, wodurch der Phasenwechsel und der damit verbundene Temperaturabfall entfällt.

Nachstehende Abbildungen vermitteln eine Übersicht der existierenden Verfahren.

Prozess	Trennmechanismus	transportierter Stoff	Membrane
Umkehrosmose (RO)	Lösung/Diffusion (LD)	Lösemittel	(n-p) nicht-poröse
Nanofiltration (NF)	LD, Donnaneeffekt	Lösemittel, Ionen	n-p-
Ultrafiltration (UF)	Konvektion oder viskoser Fluss	Lösemittel, NM-Gelöstes	(P-) Poren-
Mikrofiltration (MF)	Konvektion oder viskoser Fluss	Lösemittel, HM-Gelöstes	(P-) Poren-
Dialyse	Diffusion	Gelöstes, Ionen	RO/UF-
Donnan-Dialyse	Diffusion	spezielle Ionen	NF/IA-
Elektrodialyse (ED)	elektr. Ladung	Ionen	IA- (Ionenaustausch-)
Pervaporation	Lösungs/Diffusion	Gelöstes	P-
Gaspermeation	Lösungs/Diffusion	Gasmoleküle	n-p-/P-
Dampfpermeation	Lösungs/Diffusion	Dämpfe	P-
Flüssigmembranen	Lösungs/Diffusion	Gelöstes, Ionen	P-Träger-

Bild 28. Systematik der Membranprozesse unterschieden nach dem Trennmechanismus (obere Tabellenhälfte: Druckgetriebene Verfahren, untere Tabellenhälfte: Verfahren mit Konzentrationsgradienten oder Partialdruckdifferenz) [ÖWAW-Regelblatt 406, 2002]

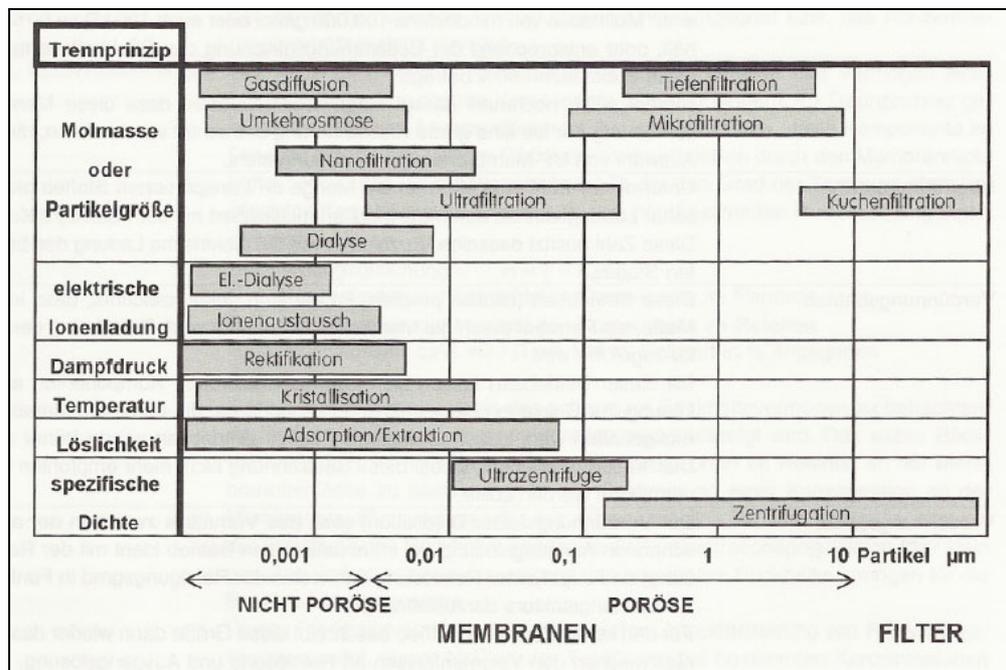


Bild 29. Trennoperationen und deren Trennprinzip [ÖWAW-Regelblatt 406, 2002]

Membranmodule, Membrantrennstufen und Membrantrennanlagen

Für den Einsatz von Membranen in technischen Anlagen haben sich heute fünf prinzipiell unterschiedliche Modulkonfigurationen²⁰ durchgesetzt. Diese Einheiten setzen sich aus mehreren Membranen zusammen. Eine wichtige Eigenschaft der Module ist, in einem kleinen Volumen möglichst viel Membranfläche zu "verpacken". Die Module stellen jene Einheiten dar, die bei einem Membranwechsel in der Regel als Ganzes ersetzt werden. Die Membrantrennstufe beinhaltet ein oder mehrere Module sowie jene Einrichtungen, die nötig sind, um eine Membrantrennung durchzuführen wie beispielsweise eine Pumpe, mit deren Hilfe die Flüssigkeit vom Tank in das Modul gepumpt wird. Membrantrennanlagen bestehen aus der Membrantrennstufe und den notwendigen Behältern, die das zu trennende Stoffgemisch aufnehmen können.

6.3 Bisherige Entwicklung und aktuelle Marktsituation der Membrantechnik

6.3.1 Technische Entwicklung der Verfahren

Bereits Ende der 60er-Jahre wurde erstmals das Verfahren der Ultrafiltration beschrieben [Stevenson 2003]. Seit über dreissig Jahren werden die druckgetriebenen Verfahren in der Wasseraufbereitung angewendet. Ab ca. Mitte der 80er-Jahre wurde die Pervaporation/Dampfpermeation in Pilotanlagen getestet. Die ersten kommerziellen Anlagen mit diesem Verfahren sind heute ca. zehn Jahre alt. Auch an den übrigen Membrantrennverfahren wird seit längerem geforscht. Die Verbreitung der kommerziellen Nutzung ist bei den einzelnen Verfahren sehr unterschiedlich. Dies liegt nach Auskunft mehrerer Interviewpartner²¹ aber nicht nur am Stand der Technik, sondern auch an der mangelnden Know-How Diffusion und an den hohen Investitionskosten. Die Entwicklung im Bereich Pervaporation/Dampfpermeation ist schwierig zu beurteilen: Einige Anbieter haben sich aus diesem Segment bereits wieder zurückgezogen mit der Begründung, dass die möglichen Anwendungen lediglich Marktnischen seien und wenig Zuwachs möglich sei. Zwei grössere Unternehmungen, die in diesem Verfahren aktiv sind, haben jedoch betont, dass für sie die Marktentwicklung in den letzten Jahren positiv war.

Die Übertragung der Membrantechnik von einer erprobten Anwendung auf einen neuen Zweck ist teilweise schwierig. Es können technische Probleme auftreten, wie kürzere Lebensdauer der Membranen bei Kontakt mit gewissen Substanzen, Wahrung der Resistenz der Membranen gegenüber grösseren Verunreinigungen und Aufrechterhalten der guten Transporteigenschaften [Jochem et al. 2002]. Nach Aussage mehrerer Produzenten bestehen aber keine grundsätzlichen technischen Probleme, welche die breite Anwendung der Technologie verhindern würden.

6.3.2 Marktsituation und Preise in der Schweiz

Zur Kostenentwicklung der letzten Jahre von Membranen, Modulen und Anlagen liegen keine detaillierten Zahlen vor. Es waren von den Unternehmungen weder Zahlen zu den Kosten noch Zahlen über die Preisentwicklung der letzten Jahre, welche die Kostenentwicklung spiegelt, erhältlich. Die folgenden Ausführungen beruhen auf Interviews mit Anbietern von Membranen, Modulen und Anlagen.

²⁰ Das Rohr-, Kapillar-, Platten-, Spiral- und Hohlfasermodulekonzept

²¹ Liste der geführten Interviews vgl. Anhang

Membranen

Die Angaben der Interviewpartner zur Preisentwicklung der Membranen differieren stark. Kleine Anlagenbauer gaben an, dass die Preise für Membranen für die meisten Verfahren und Anwendungen konstant blieben oder höchstens marginal gesunken sind. Grössere Anlagenbauer gaben an, dass die Preise je nach Membranart und Anwendung heute zwei- bis viermal tiefer sind als vor zehn Jahren. Dies stützt die Aussage mehrerer Interviewpartner, dass die Preisentwicklung vor allem eine Frage der Absatzmenge der Membranen ist. Um die Kosten der Membranproduktion zu senken, ist es notwendig, grosse Stückzahlen zu produzieren, was jedoch nur bei Membrantypen möglich ist, die in grossen Mengen abgesetzt werden können. Dies ist beispielsweise bei Grossanlagen der Grundstoffchemie der Fall. Die heutigen Produktionszahlen, der in schweizerischen Anlagen verwendeten Membrantypen sind aufgrund der speziellen Auslegung und ihrem Einsatz in kleinen Anlagen noch immer relativ tief. Für Standardprodukte, wie beispielsweise Anlagen zur Meerwasserentsalzung oder Grossanlagen der Grundstoffchemie, die immer gleiche Stoffe verarbeiten, sind die Membranpreise in den letzten Jahren deutlich gesunken.

Module und Anlagen

Als Gründe für die Preissenkungen in den letzten Jahren bei Modulen und Anlagen wurden die Zunahme des Absatzes von Anlagen (Mengeneffekt) und die Verstärkung der Konkurrenz, vor allem im Bereich der Produktion von Grossanlagen der Grundstoffchemie, die jedoch in der Schweiz keinen Absatz finden, genannt. Der Hinweis der befragten Firmen auf Zunahme des Konkurrenzdrucks bei den Anbietern deutet darauf hin, dass sich der Markt in den letzten Jahren entwickelt hat. Die Preissenkungen bei den Membranen wirkten sich positiv auf die Kosten der Module und Anlagen aus. Bereits 1991 stellte eine Studie fest, dass die hohen Investitionskosten ein zentrales Hindernis für die Verbreitung der Membrantechnik darstellen [Morovic et al. 1991]. Im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren werden die Investitionskosten von Membrananlagen noch immer als hoch beurteilt, konkrete Zahlenangaben lieferte jedoch keine der kontaktierten Unternehmungen. Zudem ist ein direkter Vergleich mit Referenzverfahren schwierig, da es für jedes Membranverfahren mehrere mögliche Alternativen mit unterschiedlichen Kosten gibt.

Anbieter und Produzenten von Membranen, Modulen und Anlagen in der Schweiz

In der Schweiz existieren wenige Membranproduzenten, die zur Hauptsache für den Schweizer Markt produzieren. Der Hauptanteil der in der Schweiz weiterverarbeiteten Membranen wird aus Deutschland, Frankreich und den USA importiert. Der Exportmarkt für produzierte Membranen hat heute aus volkswirtschaftlicher Sicht in der Schweiz eine kleine Bedeutung; der einzige grössere Produzent in der Schweiz setzt ca. 20% seiner Produktion im Ausland ab.

Im Bereich des Modul- und Anlagenbaus gibt es mehrere inländische Anbieter, die sowohl Membranmodule herstellen, die in grössere Anlagen integriert werden können, als auch schlüsselfertige Anlagen produzieren. In diesem Bereich wurden wenige führende Firmen und mehrere Kleinanbieter identifiziert. Es werden in der Schweiz auch Anlagen von ausländischen Firmen installiert. Der Marktanteil der inländischen Anbieter im Vergleich zum Gesamtabsatz der Branche konnten nicht eruiert werden. Der Exportmarkt konzentriert sich bei den Anlagen in erster Linie auf den Bereich der Wasseraufbereitung. Zwei Firmen mit Sitz in der Schweiz produzieren hauptsächlich für den ausländischen Markt (Wasseraufbereitung und -entsalzung). Deren Module und Anlagen werden jedoch im Ausland (v.a. Deutschland) gebaut [www.dechema.de].

Im EU-Projekt ATLAS beurteilten Experten den aktuellen europäischen Markt für Produktion und Absatz als stark [www.europa.eu.int]. In der EU gibt es zahlreiche Firmen, die in der Membrantechnik aktiv sind. Die Anwendungen sind vielfältig und machen ca. einen Viertel des Weltmarktes für Membrantechnologie aus. Die Hauptentwickler und Anbieter der Technologie befinden sich jedoch in den USA und in Japan.

Um den Schweizer Markt zu entwickeln, ist eine Erschliessung der Exportmärkte wichtig. Aufgrund der Industriestruktur (viele Kleinanwendungen, keine Grundstoff- und wenig Petrochemie) stehen die Produzenten einem kleinen Inlandmarkt gegenüber, was den Absatz grosser Mengen verunmöglicht und den Anteil der Forschungs- und Entwicklungskosten an den Gesamtkosten überproportional werden lässt. Der Marktzutritt bei den industriellen Grossanwendungen auf internationaler Ebene ist erschwert, da Entwicklungen nicht zuerst im Heimmarkt getestet werden können.

Untenstehende Tabelle zeigt eine Übersicht der wichtigsten, bereits heute kommerziell genutzten Membranverfahren und deren Anwendungen.

Anwendungen	Verfahren Membrantechnik	Referenzverfahren (RV)	Spezifische Energieersparnis ggü. RV
Nachklärung Siedlungsabwasser	Mikrofiltration Ultrafiltration	Belebtschlammverfahren	Keine
Trinkwasseraufbereitung	Mikrofiltration Ultrafiltration	Sandfilter mit Flockungsmittel	Klein
Meerwasserentsalzung	Nanofiltration Umkehrosiose	Destillation	Gross
Reinigung industrieller Abwässer	Ultrafiltration Nanofiltration Umkehrosiose	Evaporation Verbrennung Destillation Spaltanlagen	Gross
Trennung, Reinigung und Aufkonzentrieren von Lösungen	Umkehrosiose Nanofiltration	Destillation Evaporation	Gross
Entwässerung organischer nicht wässriger Lösungsmittelgemische	Pervaporation Dampfpermeation	Trocknungsverfahren Evaporation Destillation mit chemischen Hilfsstoffen	Gross
Lebensmittelindustrie	Mikrofiltration Ultrafiltration Umkehrosiose	Evaporation Destillation Herkömmliche Filtration Flüssigextraktion Gasabsorption	Gross

Tabelle 17 Übersicht der häufigsten Membranverfahren, deren Anwendungen und Referenzverfahren

6.3.3 Wasseraufbereitung

Im Bereich der Wasseraufbereitung, insbesondere in der Trinkwasseraufbereitung und Meerwasserentsalzung haben sich die druckgetriebenen Verfahren etabliert. Seit über dreissig Jahren stehen Anlagen im Einsatz. Die Nachklärung kommunaler Abwässer und die Reinigung industrieller Abwässer mit Membrantechnik ist eher neueren Datums und dementsprechend noch weniger verbreitet. Es existieren aber auch in diesen Bereichen funktionierende Anlagen, die das Pilotstadium hinter sich gelassen haben.

Nachklärung kommunaler Abwässer mit einer Membranbelebungsanlage (Mikrofiltration)

Der spezifische Energieverbrauch von Membranbelebungsanlagen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Der höchste Anteil am Gesamtenergieverbrauch bei Membranbelebungsanlagen wird für die Belüftung der Filtration benötigt. Daneben spielen weitere Faktoren eine Rolle, wie die Qualität der Membranmodule, die durchschnittlich zufließende Abwassermenge oder die Art der Belüftung. Dies führt zu Schwankungen des spezifischen Energieverbrauchs je nach Anlage zwischen 0,8 und 4 kWh/m³ Wasser [Engelhardt 2003]. Es besteht im Vergleich zu einer Nachklärung mit Belebtschlammverfahren kein energetischer Nutzen. Die Vorteile der Membrantechnik liegen in der platzsparenden Bauweise. Zudem können zusätzliche Stoffe aus dem Abwasser entfernt werden, die bei herkömmlichen Verfahren in die Umwelt gelangen (z.B. endokrine Stoffe).

Trinkwasseraufbereitung mit Umkehrosmose oder Mikro-/Ultrafiltration

In der Schweiz sind mehrere Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung mit Membrantechnik installiert. Die Umkehrosmose ist in diesem Gebiet seit über 20 Jahren etabliert und nahm weltweit in den letzten Jahren stark zu. Die Mikro- und Ultrafiltration ist weniger verbreitet, hat jedoch weltweit seit ca. 1997 stark zugenommen. Die Vorteile der Membrantechnik sind der geringe Platzbedarf, die Möglichkeit zur Entfernung feinsten Stoffe sowie der reduzierte resp. vermiedene Einsatz von Flockungsmitteln. Aus energetischer Sicht sind die Vorteile gering.

Meerwasserentsalzung

Die Meerwasserentsalzung mittels Membrantechnik weist ein bedeutendes Energiesparpotenzial gegenüber herkömmlichen Entsalzungsanlagen auf. Weltweit besteht ein grosses Einsatzgebiet und es existieren auch Schweizer Firmen, die in diesem Markt aktiv sind, jedoch nicht in der Schweiz, sondern in Deutschland produzieren.

6.3.4 Reinigung industrieller Abwässer mit Umkehrosmose, Nanofiltration oder Ultrafiltration

Aufarbeitung und Wiederverwendung von Wasser (Kesselspeisewasser und Brüdenkondensaten) durch Umkehrosmose und Nanofiltration sind relevant für die Lebensmittelindustrie, die Elektronikindustrie, die Papierindustrie und die Textilindustrie. In der metallverarbeitenden Industrie bzw. der Kfz-Industrie wird Membrantechnik für die Emulsionstrennung eingesetzt, wo das Abwasser stark mit Öl verschmutzt ist. Hier werden auf dem Markt bereits fertige Module angeboten, die durch Vorreinigungsstufen ergänzt werden müssen. Ein grosses Einsatzgebiet stellt die Aufarbeitung und Rückführung von Waschlaugen in der Lebensmittelindustrie sowie in Spitälern und Grosswäschereien dar [Sotoudeh 2000].

Diese Verfahren sind bereits heute im Markt etabliert, werden jedoch in unterschiedlichem Ausmass angewendet. Genaue Zahlen zu den laufenden Anlagen in der Schweiz sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht verfügbar. Es existieren diverse Unternehmen in der Schweiz, die Module und Anlagen entwickeln und bauen, jedoch die Membranen bereits fertig beziehen. Das gewählte Verfahren und die Kosten hängen ab von der Art des zu reinigenden Abwassers und mit welchen Stoffen das Wasser verschmutzt ist. Genaue Angaben über die Menge Energie, die eingespart wird im Vergleich zur herkömmlichen Reinigung konnten nicht ermittelt werden. Je nach Verfahren dürfte die Energieeinsparung aber bedeutend sein, beispielsweise wenn Lösungsmittelhaltige Abwässer statt verbrannt oder destilliert mit Membrantrennverfahren gereinigt werden.

6.3.5 Entwässerung organischer Lösungsmittel und Lösungsmittelgemische mit Pervaporation und Dampfpermeation

Der bedeutendste in der Schweiz vertretene Membranproduzent in diesem Bereich, der auch Module und schlüsselfertige Kleinanlagen herstellt, verfügt nach eigenen Angaben in der Schweiz über einen Marktanteil von schätzungsweise 80%. Produziert werden die Membranen und Anlagen jedoch in Deutschland. Der Markt in der Schweiz ist klein, da diese Verfahren eher ein Nischenprodukt darstellen und Referenzverfahren wie Trocknungsverfahren oder Destillation meist nicht ersetzen, sondern ergänzen und verbessern (Hybridanlagen). Neben dem Marktführer gibt es noch einen weiteren Membranproduzenten mit Produktionsanlagen in der Schweiz, sowie einige Destillationsanlagenbauer, die Pervaporations- und Dampfpermeationsanlagen entwickeln und planen. Der Schweizer Membranproduzent hat in der Schweiz Membranen für drei Pilotanlagen produziert. Es gibt Hinweise, dass sich einige Firmen bereits wieder aus der Anlagenproduktion mit diesem Verfahren zurückgezogen haben.

Zur Anwendung kommen diese Verfahren bei Industrieprozessen, wo Wasser und/oder Methanol aus organischen Stoffen (nicht-wässrige Lösungen) entfernt werden müssen. Hauptkunde in der Schweiz ist die chemische Industrie in der Nordwestschweiz. Für die Entwässerung sogenannter nicht-wässriger Lösungen in der chemischen Industrie ist die Dampfpermeation/Pervaporation die verbreitetste Membrantechnik. Weltweit existieren ca. 100-200 Anlagen. In der Schweiz ist auch dieses Verfahren ein Nischenprodukt, da Grossanlagen (z.B. zur Herstellung von Isopropanol oder Bioethanol) fehlen und der Einsatz in Kleinanlagen bis heute nicht sehr gross ist. Es besteht jedoch auch hier ein Marktpotenzial.

Ob diese Verfahren zu einer bedeutenden Energieeinsparung führen, hängt von chemischen Voraussetzungen und der Art der behandelten Stoffe und der Anlagengrösse ab. Meist werden nicht bestehende Verfahren ersetzt, sondern ergänzt (z.B. zwischen zwei Destillationskolonnen wird eine Membrananlage zwischengeschaltet, so dass die erste Destillationsstufe früher beendet und die zweite auf einem höheren Niveau begonnen werden kann). Der Einsatz von Membrananlagen führt dadurch meist zu energetischen Verbesserungen, die allerdings erst bei Grossanlagen ins Gewicht fallen. In der Schweiz sind solche Grossanlagen wie z.B. grosse Destillationskolonnen für die Herstellung von Isopropanol oder Bioethanol nicht vorhanden. Bei Grossanlagen kann die Energieeinsparung gegenüber konventionellen Anlagen 20% oder mehr betragen.

In der Schweiz werden Pervaporation und Dampfpermeation eher aus ökologischen Gründen oder zur Verbesserung des Prozessergebnisses als aus rein energetischen Gründen angewendet, da nur kleinere Anlagen zum Einsatz kommen und dadurch der Einsatz von Schleppmitteln (chemische Hilfsstoffe) vermieden werden kann.

6.3.6 Trennung und Reinigung von Produkten sowie Aufkonzentrieren von Lösungen mit Umkehrosmose, Nanofiltration oder Ultrafiltration

Diese Verfahren sind bereits heute im Markt etabliert, werden jedoch in unterschiedlichem Ausmass eingesetzt. Genaue Zahlen zu den laufenden Anlagen in der Schweiz sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht verfügbar. Es existieren diverse Unternehmen in der Schweiz, die Module und Anlagen entwickeln und bauen, jedoch die Membranen bereits fertig beziehen. Das gewählte Verfahren und die Kosten hängen ab von der Art des zu reinigenden Stoffes und den zu entfernenden Substanzen. Genaue Angaben über die Menge Energie, die eingespart wird im Vergleich zur herkömmlichen Reinigung und Aufkonzentrierung sind nicht verfügbar. Je nach Verfahren dürfte die Energieeinsparung aber bedeutend sein.

In der **chemischen und pharmazeutischen Industrie** sind die druckgetriebenen Membrantechniken heute eher noch ein Nischenprodukt, verfügen jedoch über ein Potenzial für die Zukunft. Die Anwendung konzentriert sich dort auf den Bereich der wässrigen Lösungen (trennen, reinigen, aufkonzentrieren). In der Schweiz ist die Anwendung in der chemischen und pharmazeutischen Industrie mengenmässig weniger bedeutend, da der Schwerpunkt auf hochspezialisierten Produkten liegt, die im Vergleich zu Grossanlagen der Grundstoffchemie relativ kleine Mengen verarbeiten.

In der **Lebensmittelindustrie** in der Schweiz haben die druckgetriebenen Verfahren der Membrantechnik heute schätzungsweise einen Anteil von ca. 10% an den relevanten Prozessen. Das Potenzial wird als sehr gross eingeschätzt und in Zukunft wird die Membrantechnik einen grösseren Stellenwert haben, da sie einerseits bestehende Prozesse verbessert und beschleunigt, andererseits aber auch gänzlich neue Verarbeitungsarten von Lebensmitteln ermöglicht. Im internationalen Vergleich bewegt sich die Schweiz beim Einsatz der Membrantechnik in der Lebensmittelindustrie mengenmässig im ersten Drittel der Anwender. Eingesetzt werden druckgetriebene Verfahren in der Milchverarbeitung (z.B. Entsalzung von Molke), für Konzentrations- und Filtrationsprozesse (z.B. Fruchtsäfte) sowie für Proteintrennung. Nicht nur die Trennung von Stoffen, sondern auch die Bildung von Emulsionen und Einbringung von Substanzen ist für die Lebensmittelindustrie eine bedeutende Anwendung. Insbesondere in der Getränkeindustrie ist die Einbringung von Kohlensäure in Softdrinks und auch Bier mittels Membrantechnik verbreitet. Ein weiteres Anwendungsfeld der Membrantechnik ist die Entwässerung oder Trocknung von Substanzen [Basics 2000].

6.3.7 Einsatz der Membrantechnik weltweit

Die wichtigsten Anwendungen der Membrantechnik, die in der Schweiz nicht oder nur in äusserst beschränktem Umfang vorkommen, sind die Petrochemie, die Grundstoffchemie sowie die Meerwasserentsalzung. Dies sind jene Anwendungen, wo die Membrantechnik einen wesentlichen Beitrag leistet zur Energieeinsparung. Ihnen ist gemeinsam, dass enorme Mengen des immer gleichen Stoffs behandelt werden und die Referenzverfahren viel Energie verbrauchen. Der einheitliche Stoffdurchfluss vereinfacht bei diesen Grossanwendungen den Einsatz der Membrantechnik, da der Prozess immer gleich verläuft und nicht - wie beispielsweise in der schweizerischen Spezialitätenchemie - häufig wechselnde Gemische behandelt werden, worauf die Membranen jedes Mal wieder anders reagieren. Die grossen Mengen machen den Einsatz von Grossanlagen wirtschaftlich und die energetische Relevanz ist bedeutend. Eine quantitative Schätzung für Europa oder das weltweite Potenzial ist aufgrund der Datenlage nicht möglich.

6.4 Potenzial der Membrantechnik und zukünftige Entwicklung

Die energetische Gesamtrelevanz wird determiniert durch das spezifische Energiesparpotenzial der verschiedenen Anwendungen sowie die Einsatzmöglichkeiten der Membrantechnik in der Wirtschaft. Dieses Marktpotenzial wiederum ist abhängig von der technischen Weiterentwicklung der Verfahren und damit verbundenen neuen Anwendungsgebieten. Die unterschiedlichen Ausgangslagen der Einsatzgebiete, Referenzverfahren etc. erschweren die Bestimmung des spezifischen Energiesparpotenzials für alle Verfahren und Anwendungen. Im Folgenden werden daher exemplarisch einige Beispiele für spezifische Einsparungen vorgestellt. Aus diesem Grund ist es auch nicht sinnvoll, eine Hochrechnung auf das energetische Gesamtpotenzial durchzuführen. Die Literaturrecherche ergab einige Resultate zu groben Potenzialschätzungen für einzelne Anwendungen, jedoch keine umfassenden Daten weder auf schweizerischer noch auf internationaler Ebene. In den folgenden Abschnitten werden die bestehenden Schätzungen auf europäischer und schweizerischer Ebene sowie die Einschätzungen der Interviewpartner dargestellt.

Der Einsatz von technischen Membranen zur Trennung von Stoffgemischen hat heute eine wirtschaftliche Bedeutung erlangt. Energierrelevante Anwendungsgebiete finden sich in der Industrie (chemische und pharmazeutische Industrie, Lebensmittelindustrie) und in der Wasseraufbereitung (industrielle Abwasserreinigung und Meerwasserentsalzung). Je nach Anwendung stehen unterschiedliche Verfahren im Vordergrund. Gemessen am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz scheint das Energiesparpotenzial im Inland durch den Einsatz der Membrantechnik begrenzt. Durch Einsatz von Membrantechnik anstelle thermischer Trennverfahren können Nutzenergieverluste massgeblich reduziert werden. Das in der Studie "Steps towards a 2000 watt society" entworfene Szenario des Jahres 2050 sieht vor, dass energieintensive thermische Trennprozesse weitgehend durch neue Verfahren, insbesondere die Membrantechnik, abgelöst worden sind [Jochem et al. 2003].

6.4.1 Spezifisches Einsparpotenzial in ausgewählten Anwendungen

Die Membrantechnik bewirkt vor allem Energieeinsparungen im Wärmebereich sowie durch die Zeitersparnis im Verarbeitungsprozess. Durch den Einsatz dieser neuen Technologie ist mit leicht höherem Stromverbrauch zu rechnen. Die Einsparung an Wärme ist jedoch ein Vielfaches höher als der Mehrkonsum an Strom. Folgende Beispiele verdeutlichen das energetische Einsparpotenzial der Membrantechnik:

- Der Energieverbrauch für die Entfernung von 1 kg Wasser aus einer wässrigen Lösung beträgt mit Membrantrennverfahren ca. 90 kJ, während mit herkömmlichen Verfahren 350 kJ (mechanical vapour compression) oder gar 3 MJ (Evaporation ohne Wärmerückgewinnung) benötigt würden [Jochem et al. 2002].
- Der Energieverbrauch einer mit Umkehrosmose funktionierenden Entsalzungsanlage beträgt lediglich ca. 1/5 des Verbrauchs einer mehrstufigen Verdampfungsanlage [Sotoudeh 2000].
- In der Lebensmittelindustrie kann durch den Einsatz einer Umkehrosmoseanlage statt einer herkömmlichen Verdampfungsanlage bis zu 90% der Energie gespart werden [Jochem et al. 2002].
- Mit Ultrafiltration können bei Waschlauge ca. 80-90% der Lauge zurückgeführt und damit die entsprechende Menge Säure zur Neutralisation eingespart und die Salzfracht des Abwassers reduziert werden. Die Laugenaufarbeitung und Entsalzung von (Ab-)Wasser sind Anwendungen, die nicht nur in der Chemie, sondern auch in anderen Branchen wie Textil, Papier, Lebensmittel, Elektronik vorkommen [Sotoudeh 2000].

Die spezifische Energieeinsparung im Vergleich zum Referenzverfahren hängt stark von den Gegebenheiten des Produktionsprozesses ab und kann für die einzelnen Membrantrennverfahren nicht allgemeingültig bestimmt werden. Oben genannte Beispiele dienen daher zur Illustration der Möglichkeiten der Membrantechnik und können nicht als Basis für Hochrechnungen des gesamten Sparpotenzials in der Industrie verwendet werden.

In einer österreichischen Studie [Sotoudeh 2000], die das Durchsetzungspotenzial und die Wirtschaftlichkeit vorsorgender Umwelttechnologien beurteilt, wurden die Mikro-, Ultra- und Nanofiltration sowie die Umkehrosmose in Fallbeispielen untersucht. Obwohl auch in dieser Studie aus oben genannten Gründen keine detaillierten quantitativen Angaben zum spezifischen Sparpotenzial gemacht werden, liefert sie interessante Resultate, die zeigen, dass betriebswirtschaftliche Einsparungen nicht nur aus dem geringeren Energieverbrauch resultieren sondern auch durch:

- verminderten Einsatz von Chemikalien
- geringeren Abwasser- und Permeatentsorgungskosten
- geringere Transportkosten durch das Eindicken von Produkten

- erhöhte Produktqualität (Lebensmittelindustrie)

Je nach Verfahren und Prozessart können diese Vorteile stark variieren, was eine allgemeingültige Aussage über finanzielle Einsparungen ggü. alternativen Verfahren verunmöglicht. Die österreichischen Befragten sind jedoch überzeugt von den technischen Vorteilen (z.B. selektive und produktschonende Trennmethode, hohe Betriebssicherheit, flexible Modulbauweise etc.) und dem grossen Umweltschutzpotenzial der Membrantechnik.

6.4.2 Zukünftiges Markt- und Energiesparpotenzial der Membrantechnik

Untenstehende Tabelle zeigt den Anteil der Prozessenergie am Gesamtenergieverbrauch der Industrie der Schweiz auf. Eine Übersicht, welche energieintensiven Prozesse in jeder Branche durch Membrantechnik ersetzt werden können, wurde bereits in den vorangehenden Kapiteln dargestellt. In welchem Ausmass sich dadurch Energie einsparen lässt, resp. welchen Anteil diese Prozesse am Gesamtenergieverbrauch der Industrie haben, lässt sich aus den vorhandenen Daten aber nicht ermitteln. Es ist zu beachten, dass seit 1990 der Gesamtenergieverbrauch der Industrie um 22 PJ auf rund 168 PJ gesunken ist, was knapp 20% des Gesamtenergieverbrauchs der Schweiz entspricht [Bundesamt für Energie 2002]. Für den Einsatz von Membrantechnik geeignete Branchen sind Chemie/Pharma mit einem geschätzten jährlichen Sparpotenzial von ca. 1-2 PJ. Die Nahrungsmittelindustrie mit einem energetischen spezifischen Sparpotenzial bei den relevanten Prozessen von über 30% ist ein relevantes Einsatzgebiet der Membrantechnik. Ein quantifiziertes Gesamtpotenzial dieses Industriezweigs durch Einsatz der Membrantechnik kann aus den verfügbaren Daten nicht entnommen werden. Auch in der Textil-, Papier-, Automobil- und metallverarbeitenden Industrie lassen sich durch Anwendung der Membranverfahren Einsparungen erzielen, wozu allerdings keine quantifizierten Angaben verfügbar sind [Sotoudeh 2000].

Branche	Verbrauch Prozessenergie 1990 in PJ (gerundet)	Anteil Prozessenergie am Gesamtenergieverbrauch der Industrie, CH 1990 ²²	Spezifisches Sparpotenzial durch Ersatz herkömmlicher Prozesse mit MT ²³	Gesamtes Sparpotenzial in absoluten Zahlen ²⁴
Chemie und Pharma	18.5	10%	30-50%	1-2PJ
Nahrungsmittel	12	6%	max. 35%	n.a.
Textil	9	5%	20-50%	n.a.
Papier	16	8%	max. 30%	n.a.
Metall	15.5	8%	n.a.	n.a.
Total	71	37%		n.a.

Tabelle 18 Anteil der Prozessenergie am Energieverbrauch der Schweiz im Jahr 1990 [Bundesamt für Energie 2002; Basics 2000; Basics 1996; Jochem et al. 2002]

Nach Aussage des Instituts für Verfahrenstechnik ivt in Aachen werden in Zukunft alle Membranverfahren weiterentwickelt werden. Die Umkehrosmose, die Ultra- und Nanofiltration sowie die Gaspermeation (Brennstoffzellen) stehen jedoch im Zentrum der Forschung. Der Gesprächspartner des ivt schätzt das Marktpotenzial der Ultra- und Nanofiltration höher ein, als jenes der teureren und aufwendigeren Umkehrosmose. Anwender bevorzugen aus Kostengründen wo immer möglich die günstigeren und einfacher zu handhabenden Verfahren. Dies könnte dazu führen, dass für industrielle Zwecke die Forschung im Bereich Ultra- und Nanofiltration forciert wird.

²² (Basics 1996: 190 PJ) in % gerundet

²³ Jochem et al. 2002

²⁴ Jochem et al. 2002

In einer Studie des ITA in Österreich, beurteilten die befragten Engineeringfirmen, Anlagenbauer sowie Anwenderfirmen den Einsatz der Membrantechnik als vielversprechend. Die Chancen liegen in den technischen und ökologischen Vorteilen. Verbesserte Ressourceneffizienz und höhere Produktqualität durch schonende Trennverfahren bewirken ein hohes Umweltschutzpotenzial, das - teilweise indirekt - auch energetische Einsparungen bewirkt. Ersetzt die Membrantechnik thermische Verfahren, so sind der geringere Energieverbrauch und CO₂-Ausstoss relevant. Bei fast allen integrativen Verfahren, d.h. wo die Membrantechnik Teil eines übergeordneten Prozesses ist, besteht ein Bedarf an individueller Optimierung des Verfahrens vor Ort. Die Leistungen der Membrananlagen hängen ab von der Art des Prozesses, den verarbeiteten Stoffen und der Auslegung der Gesamtanlage. Daher ist die Standardisierbarkeit der Verfahren begrenzt und eine quantifizierte Hochrechnung der spezifischen Einsparung auf ein Gesamtpotenzial der Industrie nicht möglich.

In Zukunft dürfte der Einsatz der Membrantechnik in der Schweiz in all jenen Bereichen an Bedeutung gewinnen, die bereits heute teilweise diese Technologie anwenden: in der chemischen und pharmazeutischen Industrie, in der Lebensmittelindustrie sowie in der Aufbereitung und Reinigung von Abwasser.

Insgesamt werden rund 60 bis 70% des Energieverbrauchs der **chemischen und pharmazeutischen Industrie** in der Schweiz (1990: ca. 18 PJ) für die Produktionsprozesse verwendet (Prozesswärme, Destillation, Trocknung) [Basics 1996]. Davon entfallen rund 13% auf die Destillation und 10% auf Trocknungsprozesse. Durch den Einsatz von Membrantechnik könnte beispielsweise der Wärmebedarf für Destillation bis ins Jahr 2020 um ca. 50% reduziert werden. Der Zusatzbedarf an Strom würde um 10% der Wärmeeinsparungen erhöht. Schätzungen zum Sparpotenzial für thermische Trennverfahren in der Schweiz gehen von ca. 1-2 PJ/a aus [Jochem et al. 2002]. Dies ist eine nicht sehr bedeutende Menge, was damit zusammenhängt, dass in diesem Industriezweig in der Schweiz keine Grundstoffchemie angesiedelt ist, sondern mehrheitlich spezialisierte Produkte in vergleichsweise kleiner Menge hergestellt werden.

Mit zunehmender industrieller Verarbeitung von Nahrungsmitteln ist auch in der **Lebensmittelindustrie** mit steigender Anwendung der Membrantechnik zu rechnen. Es werden grundsätzlich neue Prozesse und Verarbeitungsschritte ermöglicht. Die Einsatzmöglichkeiten sind entsprechend der grossen Heterogenität der Branche sehr vielfältig und weisen ein grosses Energiesparpotenzial auf, welches heute erst ansatzweise ausgeschöpft ist. Quantitative Angaben können keine gemacht werden: 1990 betrug der Energieverbrauch für Prozesswärme und mechanische Prozesse in der Lebensmittelindustrie rund 12 PJ, was ca. 6% des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs entspricht. Welcher Anteil dieses Energieverbrauchs für Prozesse aufgewendet wurde, die durch Membrantechnik ersetzt werden könnten, lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht eruieren.

Auch in der kommunalen und industriellen **Abwasseraufbereitung**, die bereits heute in der Membrantechnik einen wichtigen Platz einnimmt, wird der Einsatz von Membrananlagen voraussichtlich weiter zunehmen. Einerseits, weil Membrananlagen aus Platzgründen sehr vorteilhaft sind, andererseits auch aus ökologischen Gründen, weil damit der Einsatz chemischer Mittel reduziert werden kann. Ein weiterer Faktor, der in Zukunft noch wichtiger werden wird, ist die Fähigkeit von Membrananlagen, Stoffe zu eliminieren, die mit anderen Verfahren im (Trink-)Wasser verbleiben, z.B. endokrine Substanzen. Aus energetischer Sicht ist der Einsatz der Membrantechnik vor allem in der industriellen Abwasseraufbereitung, -reinigung und -entsorgung relevant. Durch verminderten Ressourcenverbrauch und Abwasserströme mit Aufbereitung und Rückgewinnung durch Ultrafiltration lassen sich bedeutende Mengen Energie sparen. Die Laugenaufarbeitung und Entsalzung von (Ab-)Wasser sind Anwendungen, die nicht nur in der Chemie, sondern auch in anderen Branchen vorkommen (Textil, Papier, Lensmittel, Elektronik) [Sotoudeh et al. 2000].

Das grösste Potenzial liegt nach Einschätzung von EU-Experten in der Behandlung von wärmeempfindlichen Substanzen (z.B. Lebensmittel) und von azeotropen Gemischen. In einem EU-Projekt wird das spezifische Einsparpotenzial der Membrantechnik für das Jahr 2000 auf 30-35% und für das Jahr 2010 auf 40-55% geschätzt (vgl. untenstehende Tabelle). Aus dieser Schätzung ist ersichtlich, dass eine bedeutende Entwicklung der Technologie erwartet wird.

Geschätzte spezifische Einsparungen an Primärenergie in % im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren		
Jahr	2000	2010
Neue Membranen in der Nahrungsmittelindustrie	35	55
Umkehrosmose	30	40
Pervaporation	30	40

Tabelle 19 EU-Schätzungen zur Entwicklung des spezifischen technischen Potenzials der Membrantechnik in Europa (Einsparung in % im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren) [www.europa.eu.int]

6.5 Hemmnisse und Erfolgsfaktoren für die Verbreitung der Membrantechnik

6.5.1 Übersicht der identifizierten Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

Bei der Untersuchung der Membrantechnologie stehen folgende Fragen im Zentrum:

- Woran liegt es, dass diese Technologie in den letzten Jahren zwar vermehrt eingesetzt wurde, der eigentliche Durchbruch jedoch noch nicht erzielt wurde?
- Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit die Membrantechnik diesen Durchbruch schafft?

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen identifizierten Monitoringfaktoren, die je nach Ausprägung Hemmnis oder Erfolgsfaktor sein können, erläutert und ihre Eignung für ein zukünftiges Monitoring begründet. Für eine Beurteilung dieser Faktoren ist häufig der Vergleich zu herkömmlichen Technologien notwendig und sinnvoll. Folgende Tabelle zeigt in der Übersicht die Hemmnisse und Erfolgsfaktoren der Membrantechnik und die Empfehlung zur Verwendung als Monitoringfaktoren:

Monitoringfaktor	Empfehlung für ein zukünftiges Monitoring		
	Weiterverfolgen	Evt. berücksichtigen	Nicht berücksichtigen
Prozess- und Produktqualität	X		
Störungsanfälligkeit	X		
Membranlebensdauer			X
Innovationsgrad der Industrie			X
Vernetzung und Information	X		
Marktakzeptanz			X
Forschung	X		
Ökologischer Zusatznutzen	X		
Wirtschaftlichkeit		X	

Tabelle 20 Übersicht der identifizierten Monitoringfaktoren der Membrantechnik und ihre Berücksichtigung bei einem zukünftigen Monitoring

6.5.2 Technische Faktoren

Qualität der Prozesse und der Produkte

Durch die Möglichkeit einer selektiven und schonenden Stofftrennung bietet die Membrantechnik Vorteile für wärmeempfindliche und azeotrope Gemische. Dadurch kann die Produktqualität erhöht werden. Insbesondere in der Lebensmittelbranche ist dies bedeutend, da hitzeempfindliche Inhaltsstoffe wie beispielsweise Vitamine mit dem Membrantrennverfahren erhalten bleiben. In der chemischen Industrie lassen sich so genannte azeotrope Gemische trennen, was mit Destillation nicht möglich wäre, weil die Zusammensetzung der Gemische in der flüssigen und gasförmigen Phase gleich ist. Herkömmliche Verfahren setzen für die Trennung dieser Gemische chemische Hilfsstoffe ein. Membrantrennanlagen können auch in Ergänzung zu Rektifikationskolonnen eingesetzt werden, was die Anzahl der notwendigen Destillationsstufen reduziert. Der Einsatz von Membrantrennanlagen ermöglicht in vielen Fällen eine Zeitersparnis im Produktionsprozess, was sich direkt auf die Produktionskosten auswirkt.

Bei gewissen Anwendungen kann mit Membrantechnik die Produktqualität erhöht, der Produktionsprozess verkürzt oder Hilfsstoffe eingespart werden. Das Potenzial der Membrantechnik für zukünftige Verbesserungen im Produktionsprozess oder der Produktqualität ist der zentrale Vorteil gegenüber anderen Verfahren. Die Beobachtung der Entwicklungen auf diesem Gebiet sollte bei einem Monitoring berücksichtigt werden.

Permeatleistung und Störungsanfälligkeit

In der Grundstoffchemie ist der Einsatz von Membranen weitgehend standardisiert und problemlos. Die Stoffgemische in gleichbleibender Zusammensetzung stellen keine hohen Anforderungen an die Flexibilität der Membrantrennanlagen. Die vergleichsweise kleinen Mengen und häufig wechselnden Stoffe, die in der schweizerischen Chemie- und Pharma-Industrie sowie in der Lebensmittelindustrie verarbeitet werden, stellen für den Einsatz von Membranen eine grosse Herausforderung dar. Zentral für diese Industrien ist die Flexibilität der Anlagen und Prozesse, damit ein schneller und problemloser Wechsel der zu verarbeitenden Stoffe garantiert ist. In diesem Punkt ist die Handhabung der Membrananlagen oft schwierig, da die Membranen auf veränderte Stoffflüsse mit verringerter Trennleistung reagieren können. Ob und wie dieses Problem gelöst werden kann, ist in jedem Fall einzeln zu beurteilen und abhängig von der Zusammensetzung der Gemische, der herzustellenden Produkte, der Input-Menge und der Auslegung der Anlage.

Für häufig wechselnde Stoffgemische ist die Anpassungsfähigkeit der Membranen begrenzt. Die Beobachtung dieser Herausforderung ist bei einer Weiterführung des Monitorings wichtig, da die Flexibilität der Produktionsprozesse für die in der Schweiz relevanten Anwendungen in kleineren Anlagen der Spezialitätenchemie und der Lebensmittelindustrie zentral ist. Eine Anwendung auf breiter Ebene in der Schweiz ist abhängig von der Lösung dieser Frage.

Lebensdauer der Membranen

Von grosser Bedeutung für die Kosten der Membrantrennanlagen ist die Lebensdauer der eingesetzten Membranen. Je nach Membranart und Einsatzgebiet schwankt die Lebensdauer zwischen ein und fünf Jahren für Polymermembranen und über fünf Jahre für keramische Membranen [Sotoudeh 2000].

Die Lebensdauer der Membranen hängt vom Membranmaterial, von den verarbeiteten Gemischen sowie von der Auslegung und Nutzung der Anlage ab. Ein Monitoring der Lebensdauer müsste die Einflüsse dieser Faktoren berücksichtigen, was sehr aufwändig wäre, da jede Anlage einzeln beurteilt werden muss. Eine reine Erfassung der Lebensdauer wäre relativ einfach, bringt aber keinen grossen Erkenntnisgewinn. Die Lebensdauer ist daher eher ungeeignet als Monitoringfaktor.

6.5.3 Übrige Faktoren

Produktionsprozesse und Innovationsgrad der Anwendungen

Besonders gute Chancen für einen umfassenden Einsatz hat die Membrantechnik vor allem bei innovativen Industrien, die Prozesse von Grund auf neu entwickeln. Dort kann die Membrantechnik integriert resp. ganze Verfahren neu darauf aufgebaut werden. Ein bedeutender Bereich mit grossem Entwicklungspotenzial für gänzlich neue Produkte und Prozesse ist die Biotechnologie, wo die Innovationszyklen sehr kurz sind und die Forschung intensiv betrieben wird. Für viele Anwendungen der Biotechnologie existieren keine energieintensiven Konkurrenzverfahren, die durch die Membrantechnologie ersetzt werden können. Deshalb wurde dieser Bereich trotz hohem Entwicklungs- und Anwendungspotenzial nicht in die Untersuchung einbezogen. Ein energierelevanter, ebenfalls nicht berücksichtigter, Einsatzbereich ist die Brennstoffzelle, die jedoch bereits im Technologie-Monitoring I untersucht wurde [Eicher et al. 2003].

Der Ansatzpunkt ist interessant, jedoch für ein Monitoring schwierig zu erfassen.

Information und Vernetzung der Akteure

Europa- und weltweit existieren mehrere Organisationen und Verbände, die sich mit der Membrantechnik befassen. Diese Organisationen sind auf dem Internet vertreten, jedoch sind relativ wenig Informationen öffentlich zugänglich. Es werden regelmässig Tagungen zu aktuellen Themen der Membrantechnik durchgeführt. Auf der Website der Dechema, der deutschen Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., ist ein Membrankatalog mit Adressen von Membran- und Anlagenproduzenten im deutschsprachigen Raum zu finden. In dieser Datenbank sind auch einige Schweizer Unternehmen zu finden. Es existieren mehrere Expertendatenbanken, die per Internet zugänglich sind. Der Zugang zu technischen Informationen scheint für Mitglieder von Verbänden gut zu sein; es können Fachzeitschriften abonniert und Publikationen bestellt werden, die allerdings ziemlich teuer sind.

Die Unternehmen, in denen die laufenden Anlagen stehen, sowie die Entwickler dieser Anlagen, haben ein Interesse daran, die Funktionsweise der Anwendungen vertraulich zu behandeln, solange der Patentschutz läuft. Dadurch erhoffen sie sich einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Mitbewerbern. Dies kann mit ein Grund sein, weshalb die Technologiediffusion relativ langsam verläuft.

Ein hoher Organisationsgrad der Akteure und ein intensiver Informationsaustausch sind wichtig für die Diffusion einer neuen Technologie. Als Monitoringfaktor sind die Vernetzung der Akteure und die Qualität der Informationsvermittlung interessant, weil hier ein Verbesserungspotenzial möglich scheint. Nähere Abklärungen zur internationalen Vernetzung, insbesondere europäischer Organisationen mit Organisationen aus den technologieführenden Ländern USA und Japan, wären aufschlussreich.

Marktakzeptanz und Know-how

Die Akzeptanz der Anwender ist stark davon abhängig, welche Vorteile sie sich durch Einführung eines neuen Verfahrens versprechen. Wenn Kostensenkungen und Produktverbesserungen als sicher erscheinen, werden viele Unternehmungen den Schritt zu einem neuen Produktionsprozess wagen. Damit verbunden sind jedoch immer hohe Investitionen in neue Anlagen und der Ersatz bestehender Anlagen mit langer Amortisationszeit. Stark beeinflusst wird die Risikobereitschaft der Unternehmungen auch durch die Qualität des zu ersetzenden Prozesses; selten wird ein gut funktionierendes Verfahren durch ein neues, unbekanntes Verfahren ersetzt, von dem firmenintern niemand garantieren kann, dass der Übergang problemlos funktioniert und die Produktion dadurch tatsächlich verbessert wird.

Ein wichtiger Faktor zur Erhöhung der Akzeptanz in Unternehmungen ist, dass Schlüsselpersonen über ausreichendes Know-how verfügen, um einen betriebswirtschaftlich optimalen Entscheid treffen zu können. Als Monitoring-Faktor ist dieser Aspekt weniger geeignet, da die Erfassung des firmeninternen Know-hows schwierig ist. Allenfalls könnte in Unternehmensbefragungen die generelle Marktakzeptanz erfragt werden, die Aussagekraft dürfte jedoch sehr gering sein.

Forschung

In der EU, den USA und Japan befassen sich zahlreiche Universitäts- und Hochschulinstitute mit der Entwicklung der Membrantechnologie und informieren umfassend über ihre Aktivitäten auf dem Internet. Bzgl der Forschungsaktivitäten in der Schweiz waren die Aussagen der Interviewpartner widersprüchlich: Einige Personen waren der Ansicht, dass die Forschung in der Schweiz auf Sparflamme laufe und wenig Aktivitäten und Forschungsprojekte durchgeführt werden. Sie fügten auch an, dass die Ingenieurbildung in der Schweiz dieser Technologie eher wenig Aufmerksamkeit schenke und im Vergleich zu Ländern wie Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, den Niederlanden oder den USA ein Forschungsrückstand bestehe. Auf den Websites der schweizerischen Hochschulen und Universitäten sind wenig konkrete Informationen zum Thema Membrantechnik und Forschungs- resp. Lehraktivitäten in diesem Bereich zu finden. Einige der interviewten Unternehmer betonten aber, dass im Bereich der Membrantechnik in der Schweiz aktiv an der Entwicklung und der weiteren Verbreitung der Technologie gearbeitet werde. Eine Studie aus dem Jahr 1992 kam zum Schluss, dass die Forschungsintensität in der Schweiz im Bereich Membrantechnik intensiv sei [University of Calabria 1992].

Die Entwicklung der Forschungsaktivitäten, insbesondere mit Beteiligung der Privatwirtschaft, ist ein geeigneter Indikator für das Entwicklungs- und Einsatzpotenzial einer Technologie. Für eine Beurteilung der Schweizer Forschungslandschaft sind weitere Recherchen notwendig. In einem zukünftigen Monitoring könnte die Beobachtung der Forschungsaktivitäten als Indikator dienen. Die umfassende Erhebung der laufenden Projekte ist jedoch erschwert durch die starke Geheimhaltung der Forschung.

Zusatznutzen

In der vorliegenden Arbeit wird der energetische Nutzen als Hauptnutzen bezeichnet, alle übrigen Vorteile der Membrantechnik werden als Zusatznutzen definiert. Einer der bereits genannten Zusatznutzen ist die verbesserte Produktqualität. Als häufigsten Grund für den Einsatz der Membrantechnik nannten in der bereits erwähnten österreichischen Studie die befragten Unternehmer die Verminderung der Umweltbelastung, Ressourceneinsparungen, bessere Produktqualität und geringere Entsorgungskosten. Energieeinsparungen folgten erst an achter Stelle von elf Entscheidungskriterien.

Für die in Frage kommenden Anwendungen in der Schweiz, ist der energetische Nutzen meist nicht das Hauptkriterium beim Investitionsentscheid sondern die übrigen identifizierten Vorteile. Die ausschlaggebenden Kriterien sind die Verminderung der Umweltbelastung und verbesserte Produkte. Für ein Monitoring ist der Aspekt der Zusatznutzen interessant, insbesondere ob sich die Einschätzung der Energierelevanz über die Zeit verändern würde.

6.5.4 Wirtschaftlichkeit

Die Kosten der Membranmodule und Anlagen werden durch folgende Aspekte bestimmt:

- Preis der Membranen
- Lebensdauer der Membranen
- Planungs- und Installationskosten (inkl. Testphase) der Anlage
- Betriebskosten (Energieverbrauch, Handling, Unterhaltsmaterial, Abwasserentsorgung)
- Prozessbeherrschung (Ausschuss, Standzeiten)
- Unterhalts- und Wartungskosten (Ersatzteile, Reparaturen)

Der Preis für grossindustriell eingesetzte Membranen liegt zwischen US\$ 30/m² und US\$ 150/m². Spezielle Membranen für Nischenanwendungen kosten bis zu US\$ 1000/m², je nach Einsatzgebiet und Material. Allgemein gilt, dass Polymermembranen (z.B. für Umkehrosmose) ca. 10-20% und keramische Membranen über 20% der Investitionskosten einer Membrantrennanlage ausmachen [Sotoudeh et al. 2000].

Die Planungsphase für bereits erprobte Anwendungen kann bis zu drei Monaten dauern und Kosten verursachen in Höhe von 10-15% der Gesamtkosten einer Anlage. Die Installation vor Ort dauert zwischen zwei und drei Wochen. Standardisierte Verfahren können durch Vorbereitung des Feedstroms mit Vorreinigungsstufen oder durch Optimierung der Prozessbedingungen übertragen werden. Allerdings sind selbst für Anlagen zur Aufbereitung von Öl/Wasser-Emulsionen, die standardisiert eingesetzt werden, längere Testphasen nötig, um die Permeatleistung zu optimieren [Sotoudeh et al. 2000].

Die Betriebskosten setzen sich vor allem aus Energiekosten, Personalkosten, Unterhaltsmaterial und Kosten der Abwasserentsorgung zusammen und betragen im Durchschnitt pro Jahr 2-10% der Investitionskosten der Anlage.

Betriebswirtschaftliche Einsparungen sind möglich durch [Sotoudeh et al. 2000]:

- geringerer Einsatz von Chemikalien
- geringere Abwasser-Entsorgungskosten
- geringere Energiekosten
- geringere Transportkosten durch das Eindicken von Produkten
- Zeitersparnis
- höhere Produktqualität

Aufgrund der stark unterschiedlichen Anwendungen und Anlagen lässt sich nicht allgemein festlegen, welcher Aspekt das grösste betriebswirtschaftliche Sparpotenzial aufweist.

Neue Technologien haben vor allem dann gute Chancen sich rasch durchzusetzen, wenn sie eine Senkung der Produktionskosten erlauben. Als wichtigste Faktoren bei Membrananlagen stehen die Preise der Membranen und die Planungs- und Installationskosten im Vordergrund. Ein quantitatives Monitoring dieser Aspekte dürfte aus Gründen der Datenverfügbarkeit schwierig sein. Die höhere Produktqualität ist ebenfalls wichtig und könnte allenfalls qualitativ beobachtet werden.

6.6 Fazit

Die druckgetriebenen Verfahren der Membrantechnik sowie die Dampfpermeation / Pervaporation für kommerzielle Anwendungen sind am weitesten entwickelt und können teilweise standardisiert eingesetzt werden. In der Wasseraufbereitung werden einzelne Verfahren der Membrantechnik seit bald dreissig Jahren angewendet. Die Anwendungen der Membrantechnik sind äusserst vielfältig und erlauben eine Verbesserung der Prozesse und die Einführung gänzlich neuer Verfahrensschritte. In den letzten zehn Jahren wurden die Verfahren von erprobten Anwendungen auf neue Anwendungen transferiert, was technisch nicht einfach ist, da die behandelten Substanzen in ganz unterschiedlicher Weise auf die Membranen wirken. Inzwischen existieren mehrere Anwendungen, die technisch weit fortgeschritten sind.

Folgende Aspekte begrenzen in der Schweiz die Bedeutung des Potenzials der Membrantechnik für Energieeinsparungen und eine Reduktion der CO₂-Emissionen:

- In der Schweiz werden, im Vergleich zu Anlagen der Grundstoff- und Petrochemie oder Meerwasserentsalzungsanlagen im Ausland, relativ kleine Mengen von Stoffgemischen verarbeitet. Dadurch ist die Energieeinsparung durch Membrantechnik, die herkömmliche thermische Trennprozesse ersetzt im Vergleich zum gesamten Energieverbrauch der Industrie bescheiden.
- Spezialisierte Prozesse mit häufig wechselnden Gemischen stellen hohe Anforderungen an die Flexibilität der Anlagen. Membranen reagieren sensibel auf Veränderungen der Zusammensetzung der Stoffgemische, was eine Herausforderung für die Betreiber einer Membrananlage darstellt. In den Interviews wurde mehrmals das ungenügende Know-how in den Unternehmen als Hemmnis für den Einsatz von Membrananlagen genannt. Ob dies tatsächlich so ist, liess sich in dieser Untersuchung nicht feststellen.

Folgende Punkte sprechen für die Relevanz der Membrantechnik:

- Bei Kleinanlagen, wie sie in der Schweiz zum Einsatz kommen, sind Energieeinsparungen meist nicht ausschlaggebend für den Entscheid, herkömmliche Verfahren durch Membranverfahren zu ersetzen. Eine Chance bietet die Membrantechnik für Nischenprodukte mit Spezialanforderungen und anspruchsvollen Serviceleistungen, wo nicht der energetische Nutzen sondern die verbesserte Produkt- und Prozessqualität sowie die Reduktion der Umweltbelastung im Vordergrund steht. Dennoch sind in verschiedenen industriellen Anwendungen im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren deutliche Energieeinsparungen möglich.
- Weltweit gesehen kann die Membrantechnik einen bedeutenden Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen und der Umweltbelastung leisten. Für grossindustrielle Prozesse der Grundstoff- und Petrochemie sowie in der Wasseraufbereitung und Meerwasserentsalzung, die international Bedeutung haben, sind die Energieeinsparungen durch den Ersatz energieintensiver Verfahren und die Verarbeitung grösster Mengen markant.

Konsequenzen für die Energiepolitik

Die vorliegende Untersuchung zeigt auf, dass heute und in näherer Zukunft die Membrantechnik aus energetischer Sicht für die Schweiz wenig relevant ist. Die wenigen Schweizer Technologie-Anbieter und energetisch relevante Anwendungen ausschliesslich für Nischen- oder Spezialprodukte mit kleinen Mengen relativieren das bedeutende spezifische Energiesparpotenzial der Technologie. Dadurch ergibt sich für die schweizerische Energiepolitik ein sehr beschränkter Handlungsbedarf, da das Energiesparpotenzial in der Schweiz im Vergleich zu anderen Technologien klein ist. Umso bedeutender ist diese Technologie jedoch aus wirtschaftlicher Perspektive. Mit rasch aufeinander folgenden Innovationen und intensiver Forschung in diesem Bereich wird die Membrantechnik in Zukunft in verschiedensten Bereichen, insbesondere in der Biotechnologie, an Bedeutung gewinnen. Die Entwicklung der Biotechnologie verläuft dynamisch und es ist heute schwer abzuschätzen, welche

Lebensbereiche diese Technologie in fernerer Zukunft beeinflussen und durchdringen wird. Es ist denkbar, dass gänzlich neue Verfahren und Anwendungen direkt oder indirekt zur Energieeffizienz beitragen werden.

7 Kunststoffleichtbau im Automobilbau

7.1 Ausgangslage und Ziele der Untersuchung

Die vorliegende Untersuchung zeigt die möglichen Einsparungen im Leichtbau durch Einsatz von Kunststoffen auf. Im Zentrum stehen die faserverstärkten Kunststoffe, deren Einsatz im Autobau zu bedeutenden Gewichtseinsparungen führt, da sie den schwereren Stahl ersetzen können. Es werden die existierenden Materialien und Verfahren vorgestellt und die Einschätzungen von Experten zur Weiterentwicklung der Technologie präsentiert.

Die Entwicklung im Automobilbau führt in Europa seit Jahren zu stetig zunehmenden Fahrzeuggewichten. Ursachen sind generell zunehmende mittlere Fahrzeuggrößen, enorme Verbesserungen bei der technischen Ausstattung der Fahrzeuge, stark gestiegene Komfortbedürfnisse (Klimatisierung, elektronische und elektrische Ausrüstung), Massnahmen zur Fahrzeug- und Fahrsicherheit (wie ABS, Air Bags etc.) sowie Massnahmen zur Schalldämmung. Die zunehmenden Fahrzeuggewichte sind dafür verantwortlich, dass die Effizienzgewinne beim Antrieb nicht zu grösseren Reduktionen beim mittleren Treibstoffverbrauch führten.

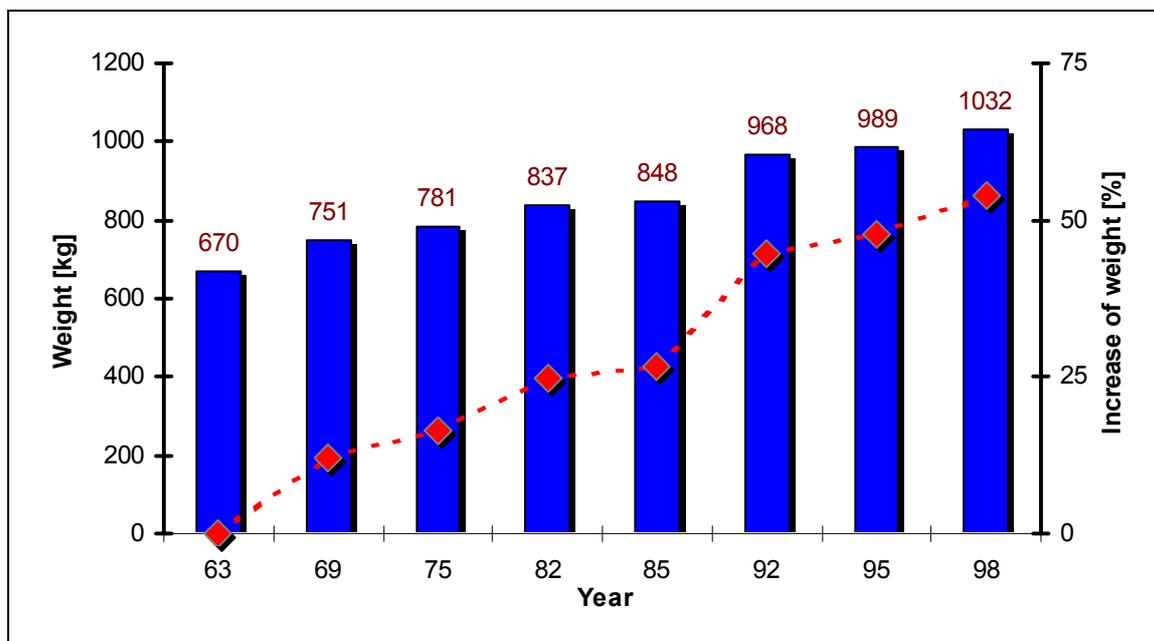


Bild 30. Historische Entwicklung des Fahrzeuggewichtes: Beispiel Opel Kadett/Astra [Quelle Symalit 2003]

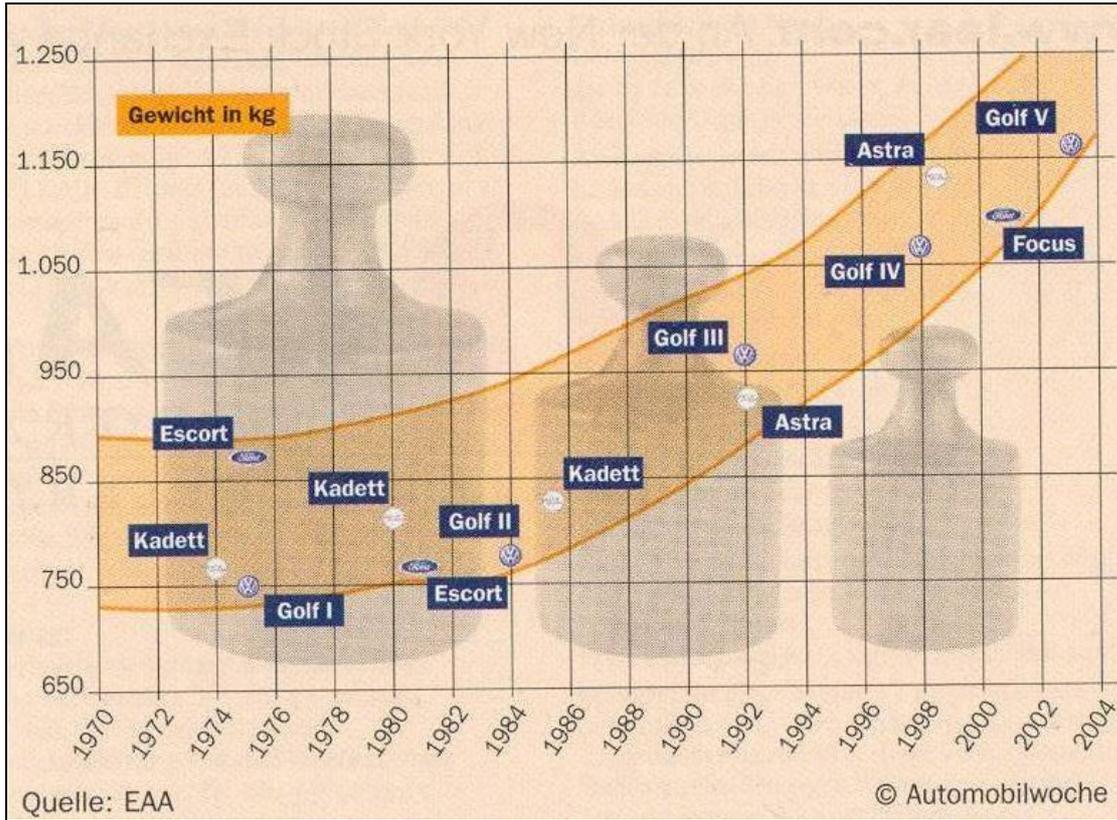


Bild 31. Steigende Leergewichte in der Kompaktklasse [Quelle: Referat A. Friedrich, UBA Deutschland]

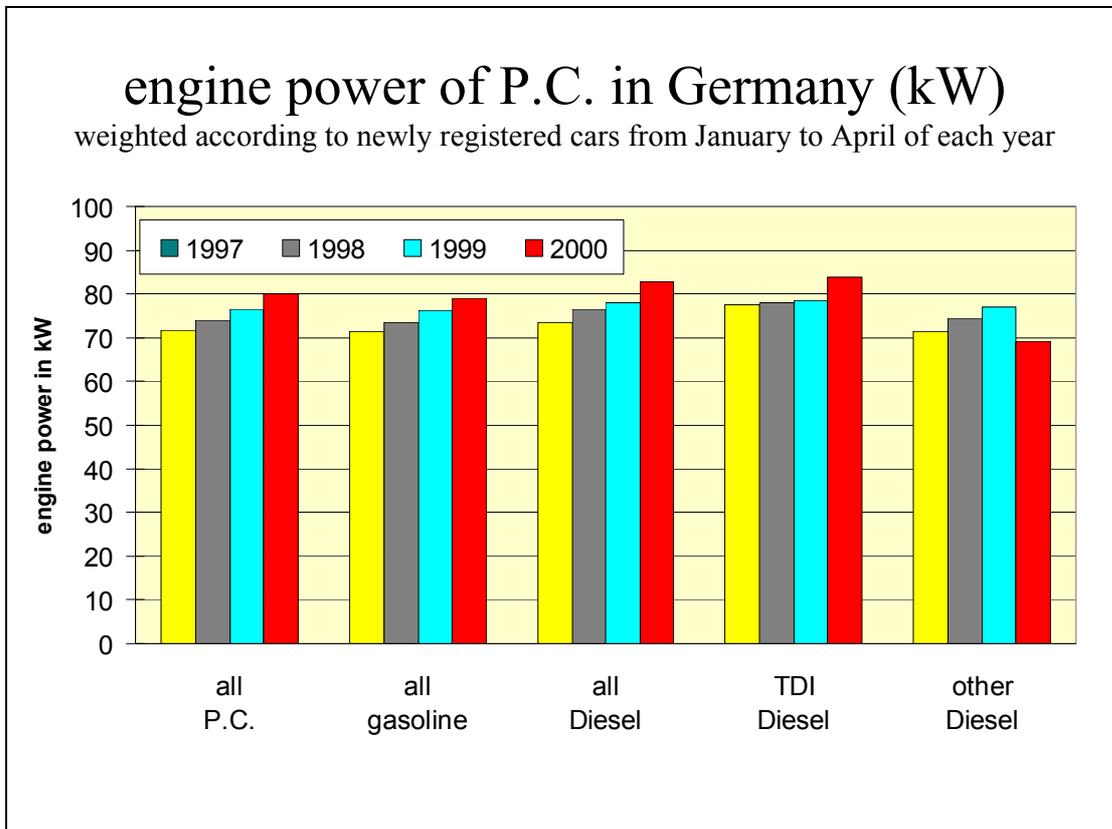


Bild 32. Entwicklung der durchschnittlichen Motorenkraft 1997-2000 in Deutschland [Quelle: Referat A. Friedrich, UBA Deutschland]

Seit 1995 werden in der Schweiz im Rahmen der vom BFE mitgeförderten Projekte Modultec I von der Firma Horlacher und ab 1999 gemeinsam mit der Firma Rieter bei Modultec II selbsttragende leichte Karosserien aus mit Fasern verstärkten Kunststoffen entwickelt. Modultec I und II erbrachten den Nachweis, dass sich mit dem Einsatz neuartiger Kunststoffe das Fahrzeuggewicht um etwa 30% senken lässt. Horlacher/Rieter senkten mit dem Leichtbau von Boden- und Dachmodul das Leergewicht eines Serien-PW von 1'250 auf 1'100 kg. Gemeinsam mit dabei zusätzlich erreichten aerodynamischen Verbesserungen konnte der Treibstoffverbrauch um 1,3 l Benzin gesenkt werden [-3 kg CO₂ /100 km; Horlacher et al. 2003]. Neben Voll-Kunststofflösungen werden auch Kombinationen wie modularer Leichtbau aus Kunststoff mit einem Aluminium Space-Frame entwickelt.

Die Automobilindustrie setzt seit einigen Jahren in zunehmendem Masse Kunststoffe ein. Neben der Senkung des Gewichtes haben sie in der Regel weitere Vorteile wie gute mechanische Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit, aerodynamisches Verhalten, Unfallschutz, Ersatz von PVC-Beschichtungen, vereinfachter Einfärbung, grössere funktionelle Integrationsmöglichkeiten (Reduktion von Teilen, Reduktion Montageschritte), grössere Gestaltungsmöglichkeiten beim Design etc.

Andere Ansätze (unter anderem auch im LKW-Bereich) basieren auf der Weiterentwicklung der Aluminium-Werkstoffe zu geschäumten Aluminium-Profilen, Paneelen und Aluminium-Wabenkonstruktionen, die eine Gewichtsreduktion erlauben und gleichzeitig den hohen Anforderungen an die entsprechenden Fahrzeugteile gerecht werden.

7.2 Materialien und Verfahrenstechnik

Für Kunststoffteile im Automobilbau werden heute zahlreiche verschiedene Materialien und Faserverbundwerkstoffe eingesetzt. Im Folgenden wird eine Übersicht gegeben über die wichtigsten Materialien resp. Verfahren zur Verarbeitung von Verbundwerkstoffen. Es werden Duromere (engl. Thermosets) und Thermoplaste unterschieden, die beide zur Gruppe der synthetischen Polymere gehören. Die beiden Gruppen verfügen über unterschiedliche Bearbeitungseigenschaften: Thermoplaste lassen sich wiederholt durch Erwärmen weich und formbar machen und wieder in die einzelnen Komponenten zerlegen während sich die Bestandteile von Duromeren aufgrund einer chemischen Reaktion fest miteinander verbinden und sich durch Erhitzen nicht mehr verformen oder trennen lassen. Das Recycling von faserverstärkten Thermoplasten ist technisch relativ unproblematisch, da sich Fasern und Matrix durch Erhitzen trennen lassen. Bei den Duromeren hingegen, die hohe thermische Stabilität aufweisen, werden im Produktionsprozess Matrix und Fasern vernetzt, wodurch eine nachträgliche Trennung dieser Komponenten nicht mehr möglich ist. Dies ist für das Recycling von Duromeren ein Nachteil; das Material kann zwar zerkleinert und als Granulat oder Pulver weiterverwendet werden, aber nicht mehr in der Qualität des Ursprungmaterials.

Duromere	Thermoplaste
SMC sheet moulding composite	LFT long fibres reinforced thermoplastics
BMC bulk moulding compound	GMT glass mat reinforced thermoplastics
RTM resin transfer moulding	Schaumharzverfahren
RRIM reinforced reaction injection moulding	
SRIM structural reaction injection moulding	
LCM liquid composite molding	

Tabelle 21 Übersicht der wichtigsten Faserverbundwerkstoffe im Automobil-Leichtbau
[www.autocomposites.org, www.smc-alliance.com]

Faserverstärkte Kunststoffe bestehen aus einer duroplastischen oder thermoplastischen Matrix, die mit Fasern (meist Glas- oder Kohlefasern) verstärkt wird. Die Fasern können gerichtet eingebracht werden wodurch die Belastbarkeit erhöht wird oder es können ungerichtete, kurze (15-50 mm) Fasern mit der Matrix verbunden werden. Letztere Verarbeitung ist einfacher, jedoch weniger belastbar und steif. Bei den Begriffen wird nicht strikt unterschieden zwischen Verfahren und Materialien, so kann beispielsweise mit "SMC" sowohl der Faserverbundstoff selber, als auch das Verfahren zur Herstellung des faserverstärkten Kunststoffes gemeint sein.

Die gebräuchlichsten Verfahren zur Herstellung der Verbundwerkstoffe sind das Spritzgussverfahren und Pressen mit Druck und Hitze oder Vakuum und Hitze. Die Guss- und Pressformen können aus verschiedenen Materialien gefertigt werden. Für Prototypen oder für Teile, die bei Raumtemperatur aushärten, können Formen aus Fiberglas, Kunststoff oder sogar Holz/Gips-Mischungen verwendet werden. Je höher jedoch die Ansprüche an Präzision und Verfahrenstechnik sowie die produzierten Stückzahlen werden, desto teurer werden auch die Formen. Für die Serienproduktion bestehen sie meistens aus Stahl, können aber auch aus andern Materialien gefertigt werden (Kohlefaser/Epoxy, Graphit, Keramik). Die Ausdehnung der Form durch thermische Einwirkung ist auf das zu produzierende Teil anzupassen.

7.2.1 Duromere

Die Gruppe der Duromere, oft auch als Duroplaste bezeichnet, beinhaltet Kunststoffe, die durch chemische Reaktion erstarren. Sie reagieren meist mit einer Polykondensation und vernetzen zu einem räumlich engmaschigen Gitter aus Makromolekülen, das dem Duroplast seine hohe mechanische Festigkeit verleiht. Dieses Aushärten mittels Strukturveränderung des Moleküls ist nicht umkehrbar. Im Gegensatz zu den Thermoplasten lassen sich Duroplaste nicht aufschmelzen, denn sie sind bis zur Zersetzungstemperatur starr. Zu den Duroplasten gehören z.B. Phenolharze, Melaminharze, Polyurethane und Oberflächenlacke für Kunststoffteile. Duroplaste kennen keinen Erweichungsbereich, der Werkstoff behält auch bei hohen Temperaturen seine Festigkeit und verfügt über eine hohe Wärmeformbeständigkeit. Duroplaste zeichnen sich durch ihre Härte und Steifigkeit aus. Der geringe Ausdehnungskoeffizient bringt eine hohe Massstabilität. Auch das Brandverhalten von Duroplasten ist vorteilhaft [www.kern-gmbh.de/index_glossar.html].

SMC und BMC

SMC (Sheet Moulding Compound) ist eine Formmasse, die aus einer glasfaserverstärkten duroplastischen Matrix besteht. Bei der Verarbeitung wird das Halbzeug in zu Paketen gestapelten Zuschnitten in die Form gelegt und durch den Schließvorgang des Presswerkzeugs zum Fließen gebracht. Es vernetzt bei Temperaturen zwischen 130 und 170°C. Durch die Eigenschaften:

- hohe Steifigkeit und Festigkeit
- Designfreiheit im Vergleich zur Blechumformung
- niedriger Längenausdehnungskoeffizient

ist der Werkstoff für den Einsatz im Aussenhautbereich des Automobilbaus prädestiniert. Insbesondere der niedrige Längenausdehnungskoeffizient im Bereich der metallischen Werkstoffe kommt der Bauteilauslegung und der Fugengestaltung sehr entgegen. Anwendungen des Verbundwerkstoffes finden sich auch in der Elektroindustrie (Schaltschränke, Kabelverteiler), im Verkehrswesen (Hochgeschwindigkeitszüge) und im Bauwesen [Maier et al. 2004].

Das untenstehende Foto zeigt ein virtuelles Auto, dessen Kühlerhaube, Frontend, Dach, Tür, Heckklappe, Spoiler und Räder aus SMC gefertigt wurden:



Bild 33. Virtuelles Modell, gezeigt am 4. Auto-Seminar der European SMC Alliance 2004
[Quelle: www.smc-alliance.com]

Nach Angabe der SMC-Alliance sind SMC und BMC, zwei verwandte Verfahren, die häufigsten und "ältesten" in der Autoindustrie angewandten Leichtbau-Kunststoffe. SMC und BMC sind faserverstärkte Verbundwerkstoffe, die in Rollen mit einer gebräuchlichen Dicke von 4 mm und einer Breite von 1,5 m produziert werden. Zu 99% werden heute zur Verstärkung Glasfasern eingesetzt (bei SMC mit Längen von 25-50 mm, bei BMC mit Längen von 6-12 mm), die einen Gewichtsanteil von 20-60% ausmachen. Je höher der Glasfaseranteil, desto stabiler, aber auch schwerer wird der Kunststoff. Gleichzeitig reduziert ein erhöhter Glasfaseranteil auch die Glätte der Oberfläche, was für Lackteile problematisch ist. Vorteil von SMC/BMC ist die geringe Beeinflussung durch thermische Veränderungen. In einem Bereich von 50°C bis 200°C verhält sich das Material gleich wie Stahl [Composites World 2004]. Möglich ist auch eine Verstärkung mit Kohlefasern, was heute aber serienmässig noch nicht angewendet wird.

Die European Alliance for SMC präsentierte 1999 einen Kofferraumdeckel des DaimlerChrysler Modells CI Coupé aus SMC, was das Interesse der Autoindustrie an diesem Werkstoff weckte. Einer der Gründe, weshalb DaimlerChrysler dieses Material wählte, war, dass die Antenne in das Bauteil integriert werden konnte. In der Folge wurden zahlreiche andere Teile wie Heckklappen, Kühlerhaube, Frontend, Spoiler, Nummernschildpanels, Kotflügel, Dach oder Türen aus SMC gefertigt.

Beim Renault-Modell Avantage des Jahres 2001 wurden alle diese Teile aus SMC gefertigt. Möglich wurde dies, weil die produzierende Firma Matra dieses Know-how während der Produktion dreier Generationen des Renault Espace aufgebaut hatte. Beim Espace wurde ursprünglich die ganze Karosserie, basierend auf einem Spaceframe aus Stahl, aus SMC gefertigt. Nach der Übernahme der Produktion durch Renault selber, stieg man allerdings aufgrund fehlendem Know-how wieder auf die Stahlbauweise um. Ebenfalls im Jahr 2001 wurde der Citroën Berlingo lanciert mit einem Dach aus SMC. Es besteht aus einem 2-Schalen Konzept und wiegt total 42 kg. Produziert wird das Dach durch Matra Venture Composite mit einer täglichen Stückzahl von 125 [Harbers, 2002].

BMC (Bulk Moulding Compound) ist ein Material mit ähnlichen Eigenschaften, jedoch wird es im Spritzgussverfahren verarbeitet. Statt in vorgefertigten Matten wird es in flüssiger, gemixter Form in die Form gespritzt. BMC weist kürzere Glasfasern und einen höheren "Filler"-Anteil aus, wodurch es hitzeresistenter wird als SMC und auch die Oberfläche feiner und besser lackierbar wird.

RTM, RRIM und SRIM

Das resin transfer moulding Verfahren RTM²⁵, das in der Umgangssprache auch Vakuum- und/oder Injektionsverfahren genannt wird, ermöglicht die Automatisierung des Produktionsprozesses. Zu Beginn wird in die Pressform aus Stahl oder Kunststoff eine vorgefertigte Form aus Verstärkungsfasern ("Mumie") gelegt. Daneben werden Kunstharz, Katalysator und weitere Substanzen gemischt und anschliessend mit tiefem Druck in die Form gepumpt. Die Masse ist extrem dünnflüssig, damit sie alle Teile der Form erreicht, bevor der Härtungsprozess einsetzt. Das RTM-Verfahren zeichnet sich durch folgende Vorteile aus [Composites World 2004, www.em-fiberglas.dk]:

- Trockene Vorformen aus Glasfasern sind billiger als bereits vorgefertigte Faserplatten.
- Lagerung ist bei Raumtemperatur möglich.
- Es ermöglicht Produktion genau dimensionierter Teile mit glatter Oberfläche auf beiden Seiten.
- Die Taktzeiten können deutlich verkürzt werden.
- Werkzeugkosten sind erheblich niedriger als bei SMC.

Horlacher fertigte im Rahmen von Modultec aus diesem Material Stossstangen, Stuhlschalen, Seitenmodule und eine Bodengruppe für Tests. Die Formen hierfür wurden von der Firma Horlacher hergestellt. Das Hauptziel der Arbeiten mit RTM war die Senkung der Taktzeit. Von der Industrie gefordert sind zehn Minuten für ein Bauteil. Dies konnte zwar erreicht werden, aber die Vorbereitungszeit von 20 bis 30 Minuten für die Mumie war noch deutlich zu lang. Deshalb wurde bei der Weiterführung des Projekts auf die Anwendung dieses Verfahrens verzichtet [Horlacher 2003].

Die Recherchen ergaben, dass das RTM-Verfahren aber in der Praxis bereits in Kleinserien eingesetzt wird. So fertigt BMW beim Modell M3 CSL - einem Sportauto der Luxusklasse - das Dach aus CFP (carbon-fibre reinforced plastics), das im RTM Verfahren hergestellt wird. Die Firma Alcan in Neuhausen produziert für Porsche einen Spoiler aus Glasfaserverstärktem Epoxy mit einer Stückzahl von 5000 pro Jahr. Das RTM-Verfahren kann auch für Thermoplaste eingesetzt werden. Das Verfahren wird auch erprobt für die Verarbeitung von thermoplastischen Werkstoffen.

Bei den verwandten Verfahren reaction injection moulding RIM und structural reaction injection moulding SRIM werden die Stoffe separat in die Form eingespritzt und direkt in der Form gemischt. Dies erlaubt eine Verkürzung der Vorbereitungszeit. Eine weitere neue Variante ist das Einbringen der Masse mittels Vakuum, was ohne Druck oder Wärme möglich ist und es erlaubt, grosse und komplexe Teile in einem Guss mit günstigen Werkzeugen zu produzieren [Composites World 2004].

7.2.2 Thermoplaste

Die Gruppe der Thermoplaste zeichnet sich dadurch aus, dass diese Kunststoffe bei Erhöhung der Temperatur nach Überschreiten des Erweichungspunktes schmelzen, sich warmverformen lassen und nach der Abkühlung wieder erstarren. Der Vorgang ist beliebig oft wiederholbar. Im Gegensatz zu Duromeren erfolgt keinerlei chemische Reaktion beim Verarbeiten. Wichtige Thermoplaste sind z.B. die Polyamide, Polystyrole und Polyethylene [www.kern-gmbh.de/index_glossar.html].

Untenstehende Grafik zeigt die verschiedenen Verfahren zur Herstellung faserverstärkter Thermoplaste nach den Kriterien "mechanische Festigkeitswerte" und "Kosten":

²⁵ In Englisch auch "liquid moulding"

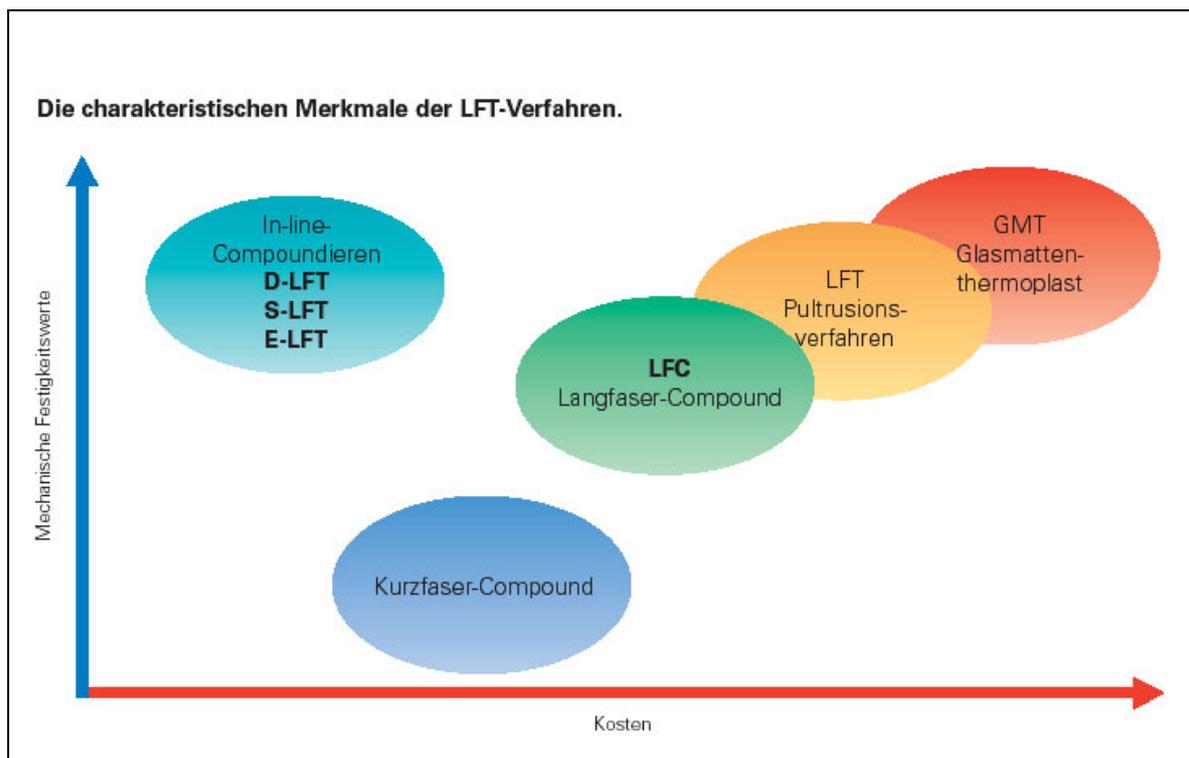


Bild 34. **Kosten und Festigkeitsvergleich der verschiedenen LFT- und des GMT-Verfahrens**
[Quelle: www.waeschle.de]

LFT und GMT

Wie obenstehende Abbildung zeigt, existieren verschiedene Verfahren zur Verarbeitung von Long fibre reinforced thermoplastics LFT. Die Fasern können gerichtet oder nicht gerichtet, d.h. ungeordnet mit dem Kunststoff verbunden werden. Heute werden meistens Glasfasern verwendet, möglich ist aber auch der Einsatz von Kohlefasern oder Aramid. Das gerichtete Einbringen der Fasern ist aufwändiger und teurer, ergibt jedoch bessere Resultate bzgl. Festigkeit und Steifigkeit. Insbesondere für Bauteile, die zug- oder druckbelastet werden bringt die gerichtete Anordnung der Fasern bessere Resultate [http://www.slb.tu-chemnitz.de/pdf/Kap2_script_oH.pdf].

In den Tests von Modultec durch Horlacher erschienen die LFT und GMT besonders viel versprechend. Die GMT lassen sich gut mit anderen Materialien kombinieren und sind leicht zu gestalten. Allerdings erfordern sie teures Stahlwerkzeug für die Fertigung und haben eine leicht narbige Oberfläche. Ein weiterer Nachteil waren bei Projektbeginn die Taktzeiten im Stundenbereich. Diese konnten jedoch auf die von der Industrie vorgegebenen zehn Minuten gesenkt werden. Anfänglich wurden GMT nur für Verschaltungen verwendet. Ihre mechanischen Eigenschaften konnten im Projekt Modultec jedoch soweit verbessert werden, dass sich daraus auch dauernd belastete Teile, beispielsweise ein Querlenker, fertigen lassen. LFT sind etwas kostengünstiger in der Herstellung, sind aber auch weniger strukturell belastbar. Für den Bau des Modultec II Autos wurden GMT und LFT eingesetzt [Horlacher et al. 2003].

Schaumharzverfahren

Die Fertigungseinrichtung ist ähnlich derjenigen für das Spritzgussverfahren aufgebaut, jedoch wird das reaktionsfähige und zusätzlich mit einem Schaummittel versetzte Harz in die offene Form eingebracht. Danach wird die Form geschlossen und mit Vakuum zugehalten. Auch der Formgebungsraum wird unter Vakuum gesetzt. Nach einiger Zeit beginnt das Harz aufzuschäumen und füllt den Formhohlraum aus [<http://www.korropol.com/schaumharz.html>].

Das Projekt Modultec zeigte, dass mit dem Schaumharzverfahren, das in der Industrie bereits Ende der 90er Jahre für die Produktion von Elementen in grossen Stückzahlen eingesetzt wurde, im Vergleich zum RTM-Verfahren sehr leichte Bauteile hergestellt werden konnten, welche gute mechanische Eigenschaften ergaben. Als nachteilig erwies sich die sehr schlechte Oberflächenqualität. Dies lässt sich jedoch mit tief gezogenen Thermoplast-Bauteilen kaschieren, was gleichzeitig die Lackierung ersetzt. Für die industrielle Fertigung eignet sich das Schaumharzverfahren jedoch nicht, da die Herstellung zu langsam ist [Horlacher et al. 2003].

7.2.3 Intelligenter Materialmix

In der Autoindustrie herrscht ein grosser Wettbewerb zwischen den Materialien. In allen Bereichen ist die Gewichtsreduktion ein Kernpunkt der Forschung und Entwicklung. Nach Angabe eines Vertreters von Audi werden bei der Entwicklung eines neuen Modells für jedes Bauteil die technischen, qualitativen und preislichen Vorgaben festgelegt. Aufgrund dieser Vorgaben wird dann das beste Material ausgewählt. Ob dies nun Stahl, Alu oder Kunststoff ist hängt davon ab, welches Material für die jeweilige Anwendung die besten Resultate erzielt. Dieses Vorgehen spricht für die Zukunft des Materialmix im Auto. Neue Fügetechniken, wie beispielsweise Klebetechniken, ermöglichen den problemlosen Verbund verschiedener Werkstoffe. Wahrscheinlicher als der vollständige Wechsel zu Kunststoff ist der Einsatz eines vielfältigen Materialmix, der die Vorteile der einzelnen Werkstoffe ausnutzt und im besten Fall sogar Synergien schafft. Dabei spielen Werkstoffeigenschaften, Prozesssicherheit und Kosten die Hauptrollen [Köth 2004].

Der zunehmende Wettbewerb bei den Metallen und die aktive Forschung im Bereich Metall-Leichtbau machen es für den Kunststoff nicht einfach, sich mit grossen Wachstumsraten im Automobilbau zu etablieren. So wies beispielsweise der Direktor Produktentwicklung und Konstruktion von Opel an einer VDI-Tagung im Jahr 2002 darauf hin, dass Materialsubstitution heute vorwiegend innerhalb der Werkstoffgruppen erfolge, also dass weniger Metall durch Kunststoff ersetzt, sondern häufig die eine Kunststoffsorte durch eine andere substituiert werde. Ein Beispiel für die schwindende Dynamik des Kunststoffeinsatzes sei der Opel Vectra, dessen Kunststoffanteil beim neusten Modell nun 16 Gewichtsprozent ausmacht (rund 220 kg), lediglich 2% mehr als beim Vorgängermodell. Gleichzeitig hätten aber auch Alu und Magnesium ihren Anteil beim neusten Vectra-Modell auf 13 Gewichtsprozent ausbauen können. Sowohl die Alu- als auch die Stahlindustrie arbeite intensiv an der Entwicklung neuer Leichtbaukonzepte [Müller-Wondorf 2002].

So wird z.B. auch bei VW auf eine Kombination aus neuartigen Werkstoffen und Bauweisen gesetzt. Dazu gehören neben Kunststoffen auch Alu, Magnesium und Spezialstahl. Ein Beispiel dafür ist der Prototyp eines 1-Liter-Autos, der allerdings für die Serienproduktion viel zu teuer ist. Erfahrungen aus solchen Entwicklungsprojekten des Karosserieleichtbaus und der Fügetechnik fliessen bei Serienprodukten, wie beispielsweise dem Golf V ein; dort besteht das Getriebegehäuse aus Magnesium und ist 25% leichter als die ebenfalls schon leichte Aluvariante. Bei VW werden in Zukunft vor allem Nischenprodukte von der Leichtbauweise profitieren [Jungmann 2004a].

Nach Aussagen von Spezialisten von BMW gibt es keine universale Patentlösung für konstruktiv und wirtschaftlich sinnvollen Leichtbau. Daher untersuchen und entwickeln sie für jedes Fahrzeug zielgerichtet das passende Materialkonzept, wobei die Gewichts- und damit verbundene Energieeinsparpotenziale im Mittelpunkt stehen. BMW bezieht bei der Entwicklung dieser Materialkonzepte die klassische Ökobilanzierung der Werkstoffe mit ein. Magnesium beispielsweise ist um 33% leichter als Alu und gar um 77% leichter als Stahl. Die neuste Entwicklung ist ein Verbundkurbelgehäuse aus Magnesium und Aluminium, das rund 10 kg weniger wiegt als ein Gehäuse aus Aluminium [Jungmann 2004a].

Auch so genannte Sandwichkonstruktionen können die Steifigkeit von Verbundbauteilen erhöhen. Dabei werden zwei Deckschichten aus Faserverbunden durch einen Kernwerkstoff in einem vorgegebenen Abstand gehalten. Als Kernwerkstoffe können Hölzer (Balsa), Schaumstoffe, Wabenstrukturen, Profile u.a. dienen. Neben drastischen Masseinsparungen lassen sich auf diese

Weise meist auch die Werkstoffkosten senken. Nebeneffekte sind oft ein günstigeres Schall- und Wärmedämmverhalten [Composites World 2004 und <http://www.korropol.com/verfahren.html>]. Oft nachteilig wirkt sich diese Verarbeitung aus auf die Recyclingfähigkeit, da die Trennung der Materialien sehr aufwändig oder gar nicht mehr sortenrein möglich ist.

Die Fortschritte bei der Stahltechnologie, wo mit hochfestem Stahl deutliche Gewichtsreduktionen erzielt werden können und auch der Einsatz von Aluminium dämpften die teilweise hohen Wachstumserwartungen im Kunststoffsektor. Der Zuwachs des Kunststoffanteils beträgt aber von einer Autogeneration zur nächsten noch immer rund 2% [Müller-Wondorf 2002].

Ein wichtiger Aspekt bei Kombinationen verschiedener Materialien ist die Fügetechnik. Statt schweißen, nieten und stanzen kommen immer häufiger Klebstoffe zum Einsatz. Die Klebnähte versteifen die Karosserie zusätzlich.

7.2.4 Recycling

Heute wird vor allem der Stahlanteil der Autos stofflich wiederverwertet, der bis zu 75% des Fahrzeuggewichts ausmacht. Der Grossteil der restlichen Materialien wird energetisch verwertet (Verbrennung) oder deponiert²⁶. Geht man davon aus, dass nach heutigen Schätzungen der Gewichtsanteil des Kunststoffs in der bestehenden Autoflotte bei ca. 12% liegt [Friedl 2000] und in der Schweiz jährlich ca. 225'000 Autos mit einem Durchschnittsgewicht von rund 1200 kg entsorgt werden [www.stiftung-autorecycling.ch und ECMT 2003], so ergibt dies eine jährliche Kunststoffmenge von über 30'000 Tonnen, die grösstenteils nicht stofflich wieder verwertet wird. Experten schätzen, dass in Zukunft der Kunststoffanteil auf über 20% steigen wird, was auch die Kunststoff-Abfallmenge deutlich erhöhen wird. Soll die Zunahme des Leichtbau-Kunststoffes nicht gebremst werden, so muss eine Lösung für das Recyclingproblem gefunden werden.

EU-Altauto-Richtlinie

In der EU gelten ab 1.1.2006 neue Vorschriften zur Wiederverwertung von Autoschrott: Die neue Altauto-Richtlinie [EU-Altauto-Richtlinie] schreibt vor, dass mindestens 85% eines Altautos wiederverwertet werden müssen, ab 2015 ist sogar eine Quote von 95% vorgeschrieben. Ausserdem müssen Neufahrzeuge ab 2004 zu mindestens 95% wieder verwendbar oder verwertbar sein. Allerdings lässt die EU-Richtlinie der Industrie einen Spielraum in der Frage, welche Verwertung - werkstofflich, rohstofflich oder thermisch - in der Praxis welche Rolle spielen wird. Die tatsächliche Auswirkung der neuen Richtlinie ist zurzeit also noch nicht definitiv abzuschätzen [Friedl 2000].

Welche Auswirkungen die Vorgaben der Richtlinie haben werden, hängt davon ab, ob ein wirtschaftliches Recycling des Kunststoffes möglich ist. Es werden grundsätzlich drei verschiedene Verfahren unterschieden: Das Bauteilrecycling ist der recycling-technische Idealfall, bei dem die Teile unverändert weiter verwendet werden, das Werkstoffrecycling verändert den physikalischen Zustand des Stoffes (Aggregatzustand, Anordnung des Materials) beispielsweise durch Einschmelzen, wodurch neue Bauteile geschaffen werden können. Beim Recycling durch Abbauprozesse (in der EU-Richtlinie als Rohstoffrecycling und thermisches Recycling bezeichnet) werden die Moleküle der Werkstoffe zerlegt und damit neue Materialien geschaffen resp. thermisch verwertet [Zogg 1996]. Ein Beispiel für die rohstoffliche Wiederverwertung ist der Einsatz in der Eisenproduktion. Die Kohlenstoffatome der Kunststoffe können isoliert und für den Reduktionsprozess im Hochofen verwendet werden.

²⁶ In der Schweiz gilt ein Deponieverbot. Daher wird der so genannte Resh, der die nichtmetallischen Reststoffe eines Autos beinhaltet, thermisch entsorgt oder mit Spezialbewilligung ins Ausland zur Deponierung in Untertagedeponien exportiert.

Auch beim Einsatz von Kunststoffen im Automobilbau sollte der Grundsatz "vermeiden - verwerten - entsorgen" berücksichtigt werden. So besteht die Grundforderung nach abfallarmen Herstellungsverfahren (möglichst wenig Produktionsabfälle und wenig Ausschussbauteile). Weiter sollen für die einzelnen Elemente recyclinggerechte Werkstoffe eingesetzt werden. Innerhalb einer Baugruppe sollten nur recyclingtechnisch verträgliche Werkstoffe eingesetzt werden. Wichtig ist auch die Kennzeichnung der verwendeten Materialien. Wo immer möglich sind Rezyklate einzusetzen.

Dabei stellen sich allerdings verschiedenen Herausforderungen, die in der Praxis noch ungelöst sind. Es wurden zwar verschiedene Pilotversuche durchgeführt, serienmässig wird Kunststoff jedoch praktisch nicht wiederverwertet, was in erster Linie auf die schlechte Wirtschaftlichkeit des Recyclings zurück zu führen ist. Die Trennung der Materialien ist zeitlich und technisch aufwändig und die gewonnenen Reststoffe sind von geringem wirtschaftlichen Wert [Schaub 2002]. So kann SMC aufgemahlen werden und als Füllstoff für andere Werkstoffe dienen. Dies ist jedoch nicht wirtschaftlich, da die Herstellung dieses SMC-Füllstoffs im Verhältnis zu den üblichen Füllstoffen zu teuer ist. Polyurethan, ein unverstärkter Duromer-Kunststoff und mengenmässig der zweithäufigste Kunststoff beim Auto, wird bereits heute rezykliert indem das Material zerkleinert und als Flockenverbund gepresst für Schallschutzzwecke im Auto eingesetzt wird. Thermoplaste sind an sich technisch relativ einfach wieder zu verwerten, da sie eingeschmolzen werden können. Faserverstärkte Thermoplaste können im Schmelzprozess von den Verstärkungsfasern getrennt werden. Allerdings ist auch hier die Wirtschaftlichkeit der Verfahren oft nicht gegeben. In einem durchschnittlichen Auto können bis zu 2000 unterschiedliche Kunststoffbauteile und 150 Kunststofftypen enthalten sein. Die wenigsten davon sind aus homogenem, leicht rezyklierbarem Material, sondern sind beschichtet, faserverstärkt oder bestehen aus unterschiedlichen, untrennbar miteinander verbundenen Kunststoffsorten. Ein weiteres Hemmnis im Recycling von Kunststoff sind die häufig wechselnden Werkstoffe im Autobau, was einen Wiedereinsatz von Rezyklaten für dasselbe Bauteil erschwert.

Nach Ansicht des deutschen Verbands der Kunststoffherzeugenden Industrie VKE ist bis heute ein werkstoffliches Recycling nur bei wenigen Teilen wie Stossstangen oder Radkappen sinnvoll, wo Altkunststoffe möglichst sauber und sortenrein erfasst werden können. Der VKE plädiert daher dafür, die Mehrzahl der Kunststoffteile im Auto zu belassen und mit der Schredderleichtfraktion via thermische oder rohstoffliche Verwertung zu entsorgen [Friedl 2000].

Die Recyclingexperten der Autoindustrie schätzen es als schwierig bis unwahrscheinlich ein, dass wirtschaftliche und serienmässig einsetzbare Recyclingverfahren für Kunststoffe im Auto entwickelt werden können. Dadurch bestehe die Gefahr, dass die Anwendung von Kunststoffen in der Autoindustrie gebremst werde. Von Seiten der Autoindustrie wird befürchtet, dass die neue Direktive den vermehrten Einsatz von Stahl zulasten von Kunststoff begünstigen könnte.

In den USA und auch in Europa laufen verschiedene Forschungs- und Pilotprojekte zum Thema Recycling von Kunststoffen. In den USA sind verschiedene Forschungsinstitute in Zusammenarbeit mit der Autoindustrie daran, neue Recyclingverfahren zu entwickeln und zu testen. Bisher wurde noch kein Durchbruch erzielt, jedoch sind die Resultate viel versprechend [Kost 2003].

7.3 Bisherige Entwicklung und aktueller Kunststoffeinsatz im Automobil-Leichtbau

7.3.1 Marktanteile der verschiedenen Materialien Kunststoffanteile in Autos

Nach Angaben der European Alliance for SMC werden auf dem europäischen Markt jährlich 1,3 Millionen Tonnen faserverstärkte Kunststoffe umgesetzt. SMC und BMC sind mit rund 270'000 Tonnen das grösste Einzelsegment in diesem Markt, wovon wiederum 40% im Transportbereich eingesetzt werden [European Alliance for SMC 2001].

Nach Schätzungen von Industrievertretern haben die Duomere lediglich einen Anteil von 5-10% am gesamten Kunststoffeinsatz (verstärkte und unverstärkte Kunststoffe), die übrigen Materialien gehören zur Gruppe der Thermoplaste. Der prozentuale Anteil der faserverstärkten Kunststoffe (Duomere und Thermoplaste) an der Gesamtmenge Kunststoff im Auto ist nach Aussage der befragten Personen sehr klein. Bei den faserverstärkten Kunststoffen kommen heute mehrheitlich Duomere (SMC) zum Einsatz. Langfaserverstärkte Thermoplaste sind neuere Materialien, deren Anwendung, insbesondere in Grossserien, noch weniger verbreitet ist, in Zukunft aber für strukturtragende Teile an Bedeutung gewinnen werden. Kurzfaserverstärkte Kunststoffe, in erster Linie Duomere wie SMC und BMC, werden bereits länger verarbeitet und sind auch in günstigeren Autos, die in Grossserien hergestellt werden, zu finden.

Der durchschnittliche Kunststoffanteil der heutigen Fahrzeugflotte ist jedoch wenig aussagekräftig. Sinnvoll ist eine Einteilung der Fahrzeuge in drei Gruppen: Zur ersten Kategorie gehören neue Fahrzeugkonzepte, wie beispielsweise Modultec, Hypercar oder das 1-Liter-Auto von VW (vgl. Kapitel 7.3.3) mit einem Maximum an Leichtbauteilen. Sie werden meist als Prototyp mit wenig automatisierten Produktionsprozessen hergestellt und zeigen das technische Potenzial der faserverstärkten Kunststoffe auf. Der Preis dieser Fahrzeuge ist allerdings sehr hoch. Die zweite Kategorie, so genannte Premium Cars wie der Audi A6 oder der BMW M3 CSL, weisen einen hohen Anteil an strukturtragenden Leichtbauteilen auf und werden in Kleinserien - entsprechend kostspielig - hergestellt (vgl. Kapitel 7.3.4). Die dritte, mengenmässig grösste Kategorie, sind die in Grossserien produzierten Autos, wo der Kostendruck besonders gross ist. In dieser Gruppe ist der Leichtbau-Anteil am kleinsten, bei tragenden Strukturteilen liegt er nahe bei Null, kurzfaserverstärkte Leichtbauteile werden etwas häufiger eingesetzt (vgl. Kapitel 7.3.5).

Für die Marktentwicklung im Segment Kunststoffspritzguss stellt der Bereich Werkzeuge und Formen einen wichtigen Indikator dar. Nach Angaben des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) hat sich dieser Markt in Deutschland seit 2000 mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 9,2% in der Branche Kunststoff- und Gummimaschinenbau überproportional positiv entwickelt [High Tech Plastics 2003]. Diese Zahlen beziehen sich jedoch auf den gesamten Markt und nicht nur auf die Autobranche. Nach Prognosen der ACA (Automotive Composites Alliance, USA) hat sich der Verbrauch von Kompositwerkstoffen in der Automobilbranche im letzten Jahrzehnt verdoppelt. Bei den neuen 2005er Modellen stagniert der Einsatz von SMC, dennoch nahm die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen zu, was auf den vermehrten Gebrauch von anderen Duomeren und Thermoplasten zurückzuführen ist [Composites World 2004].

An der VDI-Tagung "Kunststoffe im Automobilbau" im Jahre 2002 sah der Leiter Versuch Rohkarosserie von Audi die weitere kontinuierliche Zunahme des Kunststoffanteils am Gesamtfahrzeug gefährdet. Eine Steigerung der Kunststoffanteile über den aktuellen Stand der Technik in der Serie hinaus sei durch die begrenzte Duktilität (Dehnbarkeit/Verformbarkeit) hochfester Kunststoffe, die hohen Materialpreise und Lackierkosten problematisch. Er betonte aber auch, dass der Polymeranteil bei den aktuellen Audi-Modellen mit 17,4-22,5% bereits heute deutlich über den Prognosen der Kunststoffindustrie liegt, die für 2008 einen Anteil von 18% schätzte. Nach seiner Ansicht haben zusätzliche gewichtsreduzierende Massnahmen nur eine Chance, wenn Integrationsmöglichkeiten vorhanden sind, die zu Einzelkosten- und Investitionseinsparungen führen.

Dies sei beispielsweise dann der Fall, wenn die hohe Designfreiheit des Kunststoffs Formen möglich mache, die mit Stahlblech nicht machbar seien. Grundsätzlich seien heute flächige Polymerteile an der Aussenhaut für Grossserienfahrzeuge im Vergleich zu Alu bei reiner Materialsubstitution nicht wettbewerbsfähig. Zwar lasse sich das Spritzgussteil kostengünstig herstellen, aber die Kosten für Lackierung, Transport und Verpackung betragen mehr als die Hälfte der Gesamtkosten [Müller-Wöndorf 2002].

An der AVK-TV Jahrestagung im Jahr 2000 wurde folgende Prognose abgegeben zur Absatzentwicklung von GMT/LFT im Automobilbau:

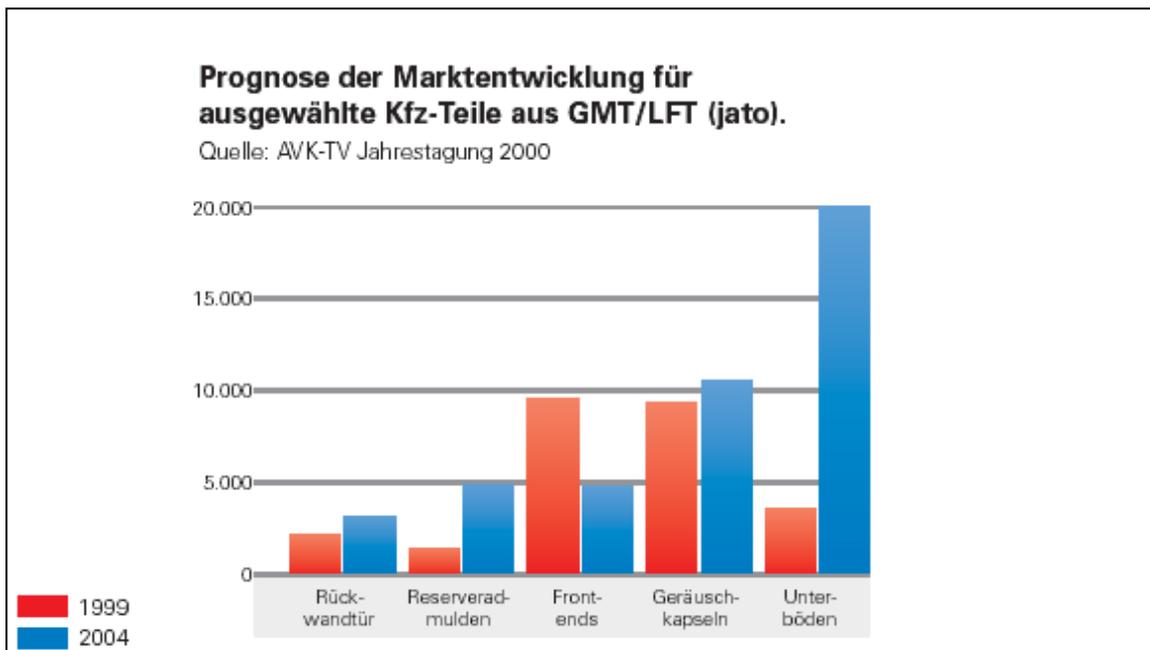


Bild 35. Marktentwicklung für Kfz-Teile aus GMT/LFT: Umsatzprognose in Tonnen pro Jahr [www.waeschle.de]

Nach Angaben des Industrievertreters, der diese Zahlen präsentierte, wurden die prognostizierten Umsatzzahlen erreicht.

7.3.2 Übersicht der möglichen Bauteile aus faserverstärktem Kunststoff

Ein Beispiel von serientauglichen Bauteilen aus SMC wurde bereits mit dem "Virtuellen" SMC-Auto im Kapitel 6.2.1 vorgestellt.

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen, welche Teile aus faserverstärkten Kunststoffen hergestellt werden können. Faserverstärkte Kunststoffe in diesem Umfang werden heute in Grossserien nicht eingesetzt, bei Premium Cars wie beispielsweise die 6er Reihe von Audi ist der Anteil der faserverstärkten Kunststoffe deutlich höher. Es werden aber nicht alle Teile, die möglich wären aus Kunststoff gemacht, sondern es wird auch Aluminium und Magnesium sowie Leichtbau-Stahl eingesetzt. Bis heute existieren lediglich einige Concept Cars, die einen höchstmöglichen Kunststoffanteil aufweisen.

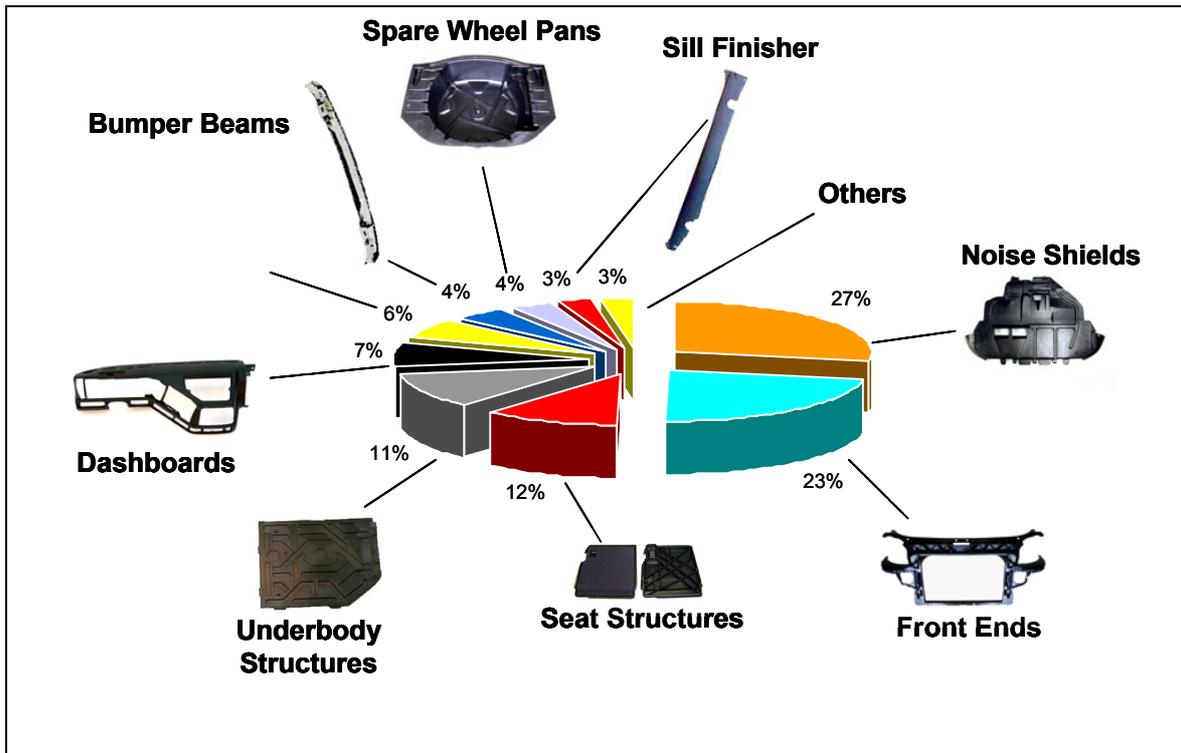


Bild 36. Einsatz glasfaserverstärkter Kunststoffe (GMT: Glass Mat reinforced Thermoplastics) an einem modernen PW [Syalit 2003]

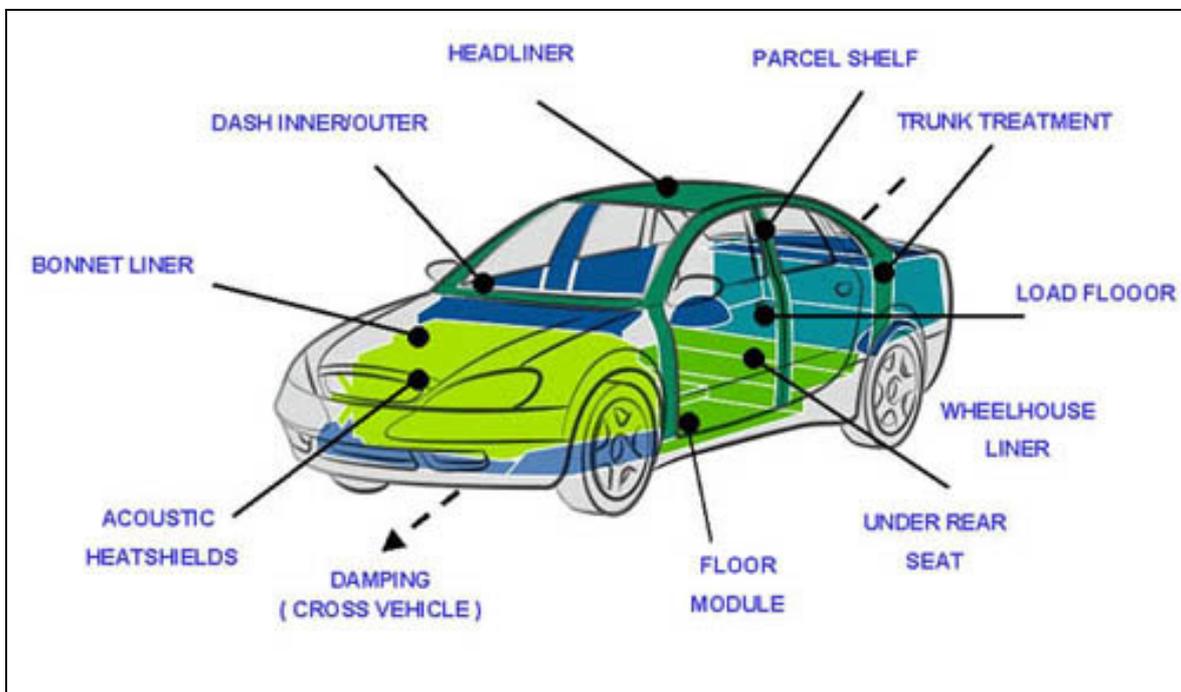


Bild 37. Umfassender Leichtbau-Ansatz mit möglichen Teilen aus Kunststoff [www.rieter.ch]

7.3.3 Concept Cars

Im Folgenden werden exemplarisch einige der zahlreichen innovativen Fahrzeugkonzepte beschrieben, die neben der Leichtbauweise meist auch neue Antriebskonzepte einsetzen. Es wurde mit diesen Fahrzeugen bewiesen, dass aus technischer Sicht eine vollständige, tragende Kunststoffkarosserie machbar ist, die geltenden Sicherheitsstandards genügt. Diese Autos werden nicht in Serie gefertigt, sondern meist als Prototypen mit viel Handarbeit und teuren Materialien. Ein zentraler Punkt der Forschung ist, die Serienproduktion dieser Fahrzeuge zu ermöglichen.

Das 1-Liter Auto von VW

Wichtige Ziele der Entwicklung waren die Minimierung aller Fahrwiderstände durch Leichtbau, exzellente Aerodynamik und Entwicklung neuer Reifen. Die Fahrwerksteile sollten ergonomisch sein und aktuelle Sicherheitsstandards sowie vertraute Bedienungsmöglichkeiten berücksichtigen. Das kleine 2-plätzig Fahrzeug mit einem Gesamtgewicht von 290 kg besteht aus einem Space-Frame aus Magnesium und einer Aussenhülle aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK). Durch den Einsatz von Magnesium statt Aluminium konnten zusätzlich rund 13 kg eingespart werden. Auch bei Innenausstattung, Motor, Rädern etc. wurden konsequent Leichtbaumaterialien eingesetzt. Die Herausforderung, ein Auto zu konzipieren, das auf 100 km nicht mehr als einen Liter Treibstoff verbraucht, bedeutete, herkömmliche Denkweisen zu verlassen. Im extrem schmalen Fahrzeug von nur 1,25 Metern Breite sitzen FahrerIn und BeifahrerIn hintereinander, der Einstieg erfolgt durch seitliches Öffnen des Dachs und der Motor liegt quer vor der Hinterachse. Das Fahrzeug wird mit einem speziellen, neu entwickelten Dieselmotor betrieben. Die Silhouette des Fahrzeugs wurde aerodynamisch optimiert. So verfügt das Auto statt über Aussenspiegel über eine integrierte Kamera auf der Rückseite des Fahrzeugs und einen kleinen Monitor im Armaturenbrett, der das Geschehen hinter dem Auto zeigt [www.germancarfans.com / www.volkswagen-umwelt.de].

Das Projekt "Modultec I und II"

Mit Unterstützung des Bundesamts für Energie haben Schweizer Unternehmen ein Forschungsprojekt im Bereich Kunststoffleichtbau im Automobilbau durchgeführt. In der ersten Projektphase (Modultec I) von 1995 bis 1998 lag das Schwergewicht des Projekts auf der Umsetzung, Entwicklung und Herstellung einer selbsttragenden, möglichst leichten, faserverstärkten Karosserie in Modulbautechnik. Die neue Konzeption musste die gängigen Sicherheitsstandards erfüllen und wichtige Aspekte wie Stabilität, Taktzeiten und Rezyklierbarkeit der Materialien berücksichtigen. Die Firma Horlacher entwickelte in Zusammenarbeit mit der Firma Esoro ein Fahrzeugkonzept, das 200 kg leichter (550 statt 750 kg) ist als das Pendant aus Stahlblech. Das Kunststoffauto schnitt auch bei Crashtests sehr gut ab und senkt den Treibstoffverbrauch im Vergleich zur Stahlversion deutlich. Modultec II (1999 bis 2002) stellte einen ersten Schritt zur industriellen Umsetzung der Erkenntnisse von Modultec I dar. Bei einem Serienfahrzeug wurden die Bodengruppe und das Dach entfernt und durch Module aus Kunststoff ersetzt. Für dieses Projekt arbeitete die Firma Horlacher mit der Firma Rieter, der grösste Schweizer Zulieferer der Autoindustrie, und der Firma Quadrant zusammen.

Die beiden Teilprojekte zeigten, dass sich das Fahrzeuggewicht unter Einsatz neuer Werkstoffe um 30% reduzieren lässt, ohne die Sicherheit dadurch einzuschränken. Der Ersatz von Boden und Dach durch ein Kunststoffmodul senkte das Leergewicht des verwendeten Serienfahrzeugs um 150 kg auf 1100 kg. Da Boden und Dach die komplexesten Bauteile darstellen, sollten auch die übrigen Teile der Fahrgastzelle in Modulbauweise aus faserverstärkten Kunststoffen herstellbar sein. Eine Übergangsphase von herkömmlicher Stahlbauweise zum Modulbau in Kunststoff kann die Kombination des modularen Kunststoffleichtbaus mit einer Rahmenkonstruktion aus Aluminium darstellen. Es ist geplant, in einem Folgeprojekt die Serienproduktion im Modulbau weiterzuentwickeln [Horlacher et al. 2003].

Das "Hypercar"-Konzept

Am Rocky Mountains Institute (RMI) in Colorado, USA wird seit 1991 das "Hypercar"-Konzept entwickelt und umgesetzt. Unter "Hypercars" werden neuartige Fahrzeuge verstanden, die einen umfassenden Ansatz zur Erhöhung der Energieeffizienz verwirklichen. Neben neuen Antriebskonzepten wie Hybridantrieben, optimierter Aerodynamik, reduziertem Rollwiderstand und effizienterer Auslegung weiterer Betriebskomponenten ist die Leichtbauweise ein zentraler Aspekt der "Hypercars". Modellierungen des RMI zeigen, dass ein durchschnittlich grosser "Hypercar" mit 2,6 lt./100 km auskommt, in Zukunft sollen es sogar nur 1,2 lt./100 km sein. Die elektronische Simulation ist ein wichtiges Instrument für die Entwicklung neuer Fahrzeugkonzepte. So wurde der Concept-Car "Revolution" im Jahr 2000 zuerst theoretisch entworfen und die Fahrzeugmasse des 5-Plätzers um über 50% von 1800 kg auf 856 kg reduziert. Die Anzahl der Bauteile für die gesamte Karosserie konnte von herkömmlichen 250 Teilen auf 14 Hauptteile gesenkt werden. Das Auto wurde mit einem Hybridantrieb mit Brennstoffzelle gebaut und weist einen Energieverbrauch auf, der äquivalent ist zu 2,38 Liter Benzin pro 100 km. Innerhalb neun Monaten entwickelte ein Team von mehr als 45 IngenieurInnen dieses luxuriöse Auto. Das Entwicklungsteam schätzte den Produktionspreis als wettbewerbsfähig ein, vergleichbar mit den Preisen von Modellen wie der Lexus RX 300, Mercedes M320 oder der BMW X5 3.0. Ob dies mit dem erwähnten Brennstoffzellenantrieb tatsächlich in absehbarer Zeit erreicht werden kann, muss allerdings kritisch beurteilt werden.

7.3.4 Einsatz faserverstärkter Kunststoffe im Hochpreissegment

Im Hochpreissegment sind die produzierten Stückzahlen deutlich kleiner als bei den Modellen des Massenmarktes. Es kommen faserverstärkte Kunststoffbauteile zum Einsatz, die in Kleinserien hergestellt werden können. Oft ist der Anteil der manuellen Arbeitsschritte an der Produktion dieser Teile bedeutend. Wettbewerbsfähig sind Verfahren mit - im Vergleich zur Stahlproduktion - tiefen Werkzeugkosten. Die Gewichtseinsparung ist im Hochpreissegment ein wichtiger Faktor, da in die so genannten "Premium Cars" immer mehr Komfortfunktionen integriert werden, die das Fahrzeuggewicht der meist grossen und schweren Wagen erhöhen. Durch Einsatz von Leichtbauteilen, meist aus Kunststoff und Aluminium, wird die Gewichtszunahme in Grenzen gehalten. Im Vordergrund des Leichtbaueinsatzes in diesem Sektor steht jedoch nicht die Verbrauchseinsparung, sondern die Erhaltung der Agilität und leichten Bedienbarkeit des Fahrzeugs.

Die Beispiele solcher Fahrzeuge der gehobenen Klasse sind zahlreich. Es sollen nur einige beispielhaft genannt werden. So gehört der Audi A8 mit 1800 kg zu den schweren Personenwagen, obwohl er einen bedeutenden Anteil an Leichtbauteilen in Aluminium und – in kleinerem Ausmass - Kunststoff aufweist. Dass dieses Gewicht nicht noch höher ist, verdankt das Fahrzeug dem Space Frame, einer Rahmenstruktur aus Aluminium, die 40% leichter als vergleichbare Stahlkonstruktionen ist. Die Zusammenfassung von Bauteilen in Module reduziert die Anzahl Einzelteile des Fahrzeugs und verbessert die Steifigkeit der aus Blech-, Profil- und Gusselementen bestehenden Struktur [Tschachtli 2002]. Audi berücksichtigt bei Entwicklungen alle Werkstoffe und wählt diese entsprechend dem Anforderungsprofil des Bauteils aus. Beispiele von Bauteilen aus faserverstärktem Kunststoff sind die Kotflügel und der Heckspoiler beim A2, die Heckklappe des Audi Cabriolets oder das Hardtop des TT-Roadster. Weiter werden bei allen Modellen die Stossfänger aus faserverstärktem Kunststoff hergestellt. Audi beurteilt die Konkurrenz der Werkstoffe bei der Bauteilentwicklung als sehr gross.

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK), die auch bei Formel 1 Wagen eingesetzt werden, weisen eine spezifische Steifigkeit auf, die rund dreimal höher ist als jene von Stahl – bei der Hälfte des Gewichts. Zudem ist das Material ermüdungsbeständig und sehr elastisch. Diesen positiven Eigenschaften steht der hohe Preis gegenüber, der bisher den Einsatz bei Serienautos unmöglich machte. Neu hat BMW das Dach und Teile der Karosserie des BMW M3 CSL aus CFK gefertigt und damit gegenüber dem BMW M3 110 kg Gewicht eingespart. Das Dach wird im weltweit ersten hoch automatisierten Fertigungsprozess für CFK-Karosseriebauteile im BMW-Werk Landshut produziert. Die Heckklappe und weitere Bauteile bestehen aus SMC und auch endlosfaserverstärkte Thermoplaste wurden eingesetzt. Allerdings ist der BMW M3 CSL nicht etwa ein ökologisches Vorzeigemodell mit wenig

Spritverbrauch, sondern ein Supersportwagen, der eher für die Rennstrecke als für die Strasse geeignet ist. Erklärtes Ziel von BMW ist die Erreichung der Serientauglichkeit des Karosseriebaus oder Teilen davon in CFK [www.classicdriver.de und Jungmann 2004b].

Ein weiteres Beispiel von BMW aus der 6er-Reihe ist der Bau des Kotflügels aus faserverstärktem Kunststoff. Eingesetzt wurde ein Hochleistungspolymer, "Noryl GTX", der niederländischen Firma GE Advanced Materials. BMW entschied sich für dieses Material wegen der umfassenden Chemikalienbeständigkeit, Steifigkeit, Schlagzähigkeit und hoher Leistungsfähigkeit bei erhöhten Temperaturen. Neben der Gewichtseinsparung von 40% gegenüber Stahlblech eröffnet der Kunststoff einen deutlich höheren Konstruktionspielraum und erfüllt hohe Ansprüche an die Wärmebeständigkeit beim Lackieren [Jungmann 2004c].

Opel brachte mit dem Modell Speedster einen Kleinserien-Sportwagen auf den Markt mit einem Chassis aus Aluminium und einer Karosserie aus Kunststoff. Der Rahmen aus miteinander verklebten Aluminiumprofilen ist mit einer Aussenhaut aus glasfaserverstärkten Kunststoffteilen verbunden. Diese Bauweise kombiniert niedriges Gewicht mit grosser Steifigkeit und qualitativ hochwertigem Finish. Die neue Klebtechnik bietet den Vorteil, dass sich das Werkstück beim Zusammenfügen nicht verzieht oder eine Strukturschwächung erleidet durch Überhitzung. Die Karosserie des Zweiplätzers besteht aus nur 25 Teilen aus SMC. Die Einzelteile werden nicht von Hand, sondern maschinell im so genannten "closed mould Verfahren" hergestellt. Mit einem Hochdruck-Spritzgussverfahren wird eine ausgezeichnete Oberflächenqualität erzielt, die ohne Nachbearbeitung lackiert werden kann. Neben der Gewichtseinsparung hat diese Kunststoffkarosserie den Vorteil der geringen Investitionskosten. Faserverstärkte Kunststoffe sind vor allem in Kleinserien wettbewerbsfähig, da die Herstellkosten für die Werkzeuge tiefer liegen als bei Stahl- oder Aluminiumbauteilen. Im Bereich der kleinen Stückzahl von rund 3000 Fahrzeugen pro Jahr wirken sich die tieferen Werkzeugkosten besonders positiv aus [www.sportwagen-hp.de].

7.3.5 Einsatz faserverstärkter Kunststoffe in Grosserien

Der Einsatz von Kunststoff im Autobau begann bereits in den 50er-Jahren in Europa und in den USA. In den 70er-Jahren wurden erste Massenprodukte wie z.B. die Stossdämpfer beim Renault 5 aus faserverstärktem Kunststoff gebaut. Heute werden mehr und mehr Teile, vor allem solche mit wenig struktureller Belastung, aus Kunststoff eingesetzt. Die Hauptkriterien für den Einsatz von neuen Materialien sind neben den technischen Qualitäten, die Herstellungskosten und die leichte Integration ins Produktionssystem.

Der Trend hin zu immer grösseren Autos mit immer mehr Komfortfunktionen treibt das Gewicht der Autos immer weiter in die Höhe. Leichtbau heute macht Autos nicht absolut leichter, sondern ermöglicht den Einbau von Zusatzfunktionen und Komfort für schwere Wagen der oberen Preisklassen. Beispiele von Kleinwagen aus Grosserien, wo Leichtbau in grösserem Umfang angewendet wird, sind schwer zu finden.

Eine britische Expertengruppe, die 2002 Firmen in der Schweiz und in Deutschland besuchte, stellte fest, dass sich viele Entwicklungsprojekte mit Kunststoffleichtbau befassen, der Fokus aber bis jetzt mehr auf Design und Qualität der Produkte als bei der Serientauglichkeit der Prozesse liegt. Bis heute sind grössere und/oder strukturtragende Leichtbauteile mehrheitlich ein Nischenmarkt für Modelle mit bis zu 5000 Stück pro Jahr. Alcan in Neuhausen produziert für Porsche einen Spoiler im RTM-Verfahren mit 5000 Stück jährlich. Für Grosserien mit bis zu 500'000 Fahrzeugen jährlich sind die aufwendigen und langen Produktionszyklen der langfaserverstärkten Kunststoffe mehrheitlich noch ungeeignet [Faraday Advance 2003].

Ein Beispiel eines Autos, dessen Herstellung in grösserer Stückzahl geplant war, ist das Modell Avantime von Renault. Insgesamt umfasste das Auto 14 Teile der Verschalung und zwei strukturtragende Teile aus SMC. Der Avantime war das Folgemodell des Renault Espace, dessen Aussenhaut ebenfalls aus SMC bestand [Soufflet et al. 2001]. Das Leergewicht des Fahrzeugs wurde

durch 90 kg SMC um 15% gesenkt. Die Resultate in Crashtests waren sehr gut und entsprachen den geltenden Sicherheitsstandards. Die geplanten Absatzzahlen konnten jedoch nicht erreicht werden und die Produktion des Modells wurde nach einiger Zeit eingestellt.

An einer Tagung der SMC-Alliance in Bad Nauheim im Jahr 2001 zeigte eine Liste die in heutigen Serienfahrzeugen verwendeten Teile aus SMC. In verschiedenen Fahrzeugen werden unterschiedliche Teile aus SMC eingesetzt. Würde ein Auto gebaut, das alle diese möglichen Teile in sich vereint, so ergäbe sich ein deutlich höherer Anteil an SMC als bei den einzelnen existierenden Modellen.²⁷

²⁷ Ein virtuelles Auto, das aus diesen möglichen Teile besteht, wurde an der vierten SMC-Tagung gezeigt (vgl. Foto in Kapitel 7.2.1).

European Alliance for SMC



ASHLAND · ASTAR · BYK CHEMIE · AVK-TV · DSM COMPOSITE RESINS LEHMANN & VOSS · LONZAGROUP · MENZOLIT-FIBRON · MITRAS · NOBEL COMPOSITES OWENS CORNING · PPG · REICHHOLD · SKLOPLAST · VENTURE SAINT-GOBAIN VETROTEX · WIENTJES

The Total Plastics Car Body From FRP Die ganzheitliche Kunststoff-Karosserie aus GFK

Exhibit	Weight	Material	Molding Method	Manufacturer
Mosaic Front Structure Renault	42.4 kg	UPS	Compression	DSM
Headlamps FIAT Bravo/Brava	0.3 kg	GFUP (BMC)	Injection	AUTOMOTIVE LIGHTING (LONZA COMPOUNDS)
Grill Opening Panel Ford Transit	12 kg	SMC	Compression	MITRAS Automotive UK
Top Kit Ferrari F360	8 kg	UP (SMC)	Compression	TGS (ASHLAND)
Noise Cup DC W 203	1.2 kg	GFUP (SMC)	Compression	RÜTTGERS (LONZA COMPOUNDS)
Brake Disc Various Cars	6.4 kg*	C/C-SIC Ceramic Advanced SMC	Compression	MENZOLIT-FIBRON CERAMTEC CHEMETALL
Valve Cover Ford Explorer	1.1 kg	GFUP (TMC)	Injection	REINZ (LONZA COMPOUNDS)
Filter Housing 3er BMW	4.7 kg	GFUP (SMC)	Compression	MITRAS Automotive
Fender & Quarter Panel Renault Avantime	2.2/5.5 kg	SMC	Compression	MatraVentureComposites (VENTURE PEGUFORM)
Space Frame VW Golf	13.2 kg	HPC C40/R20	Compression	MENZOLIT-FIBRON
Side Door Panel Renault Avantime	5.2 kg	SMC	Compression	MatraVentureComposites (VENTURE PEGUFORM)
Roof Module Citroën Berlingo	42 kg	SMC	Compression	MatraVentureComposites (VENTURE PEGUFORM)
Roof Spoiler BMW X5	3.8 kg	SMC	Compression	MENZOLIT-FIBRON
Decklid Mercedes CL 500	15 kg	GFUP (SMC) Painted	Compression	MITRAS Automotive
Rims Various Cars	8 kg	GFVE (SMC)	Compression	BTE (LONZA COMPOUNDS)
Bumper 3er BMW	3.3 kg	GFUP (SMC)	Compression	MITRAS Automotive

* Metal parts included

Bild 38. Übersicht von Teilen aus SMC, die in heutigen Modellen gefertigt werden. [Quelle: Tagung SMC-Alliance in Bad Nauheim, 2001]

7.4 Potenzial und zukünftige Entwicklung im Automobil-Leichtbau

7.4.1 Fragestellung

Die zentralen Fragen zur Beschreibung des Potenzials und Abschätzung der weiteren Entwicklung im Kunststoff-Leichtbau im Autobau lauten:

Potenzial heute: Könnte unter den heutigen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen der Leichtbauanteil im Automobilbau grösser sein? Dabei interessieren sowohl die bereits grossserienmässig eingesetzten kurzfaserverstärkten als auch die relativ neuen langfaserverstärkten Kunststoffe, die für strukturtragende Autoteile eingesetzt werden können.

Entwicklung in Zukunft: In welchem Umfang wird sich der Kunststoff-Leichtbau in Zukunft durchsetzen? Werden strukturtragende Teile auch in Grossserien angewendet werden? Welche Materialien werden sich durchsetzen? Wird der Modulbau in grossem Stil kommen und die Produktionsweise der OEM und Zulieferer dadurch verändert werden?

Hemmnisse und Erfolgsfaktoren: Von welchen Faktoren hängt es ab, ob sich der Leichtbau auch in Grossserien durchsetzt (vgl. Kap. 7.5)? Dabei werden betriebliche/wirtschaftliche und technische Faktoren sowie externe Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Die Durchsetzung des Kunststoff-Leichtbaus hängt neben technischen und wirtschaftlichen Faktoren auch von der Entwicklung der Marktstrukturen ab, die gekennzeichnet ist durch die Verlagerung der Produktion ganzer Bauteile und Module von den OEM²⁸ zu den Zulieferern. Die Einschätzung des Potenzials beruht auf einer Kombination der spezifischen Einsparungen bei einzelnen Bauteilen und Materialien und der Einschätzung der Marktentwicklung. Die Beantwortung der Fragen erfolgt in erster Linie qualitativ aufgrund der Experteninterviews sowie der Ergebnisse der Literaturrecherche. Quantitative Beispiele einzelner Modelle, Bauteile oder Materialien werden zur Erläuterung und Untermauerung der Expertenmeinungen präsentiert.

Im Mittelpunkt der Überlegungen steht die Wirtschaftlichkeit der Anwendungen, die neben der technischen Qualität, die als Grundvoraussetzung gegeben sein muss, das Hauptkriterium für die Anwendung von Kunststoff im Automobilbau ist. Die Wirtschaftlichkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Rohmaterial- oder Halbfabrikatepreis
- Vorbereitungs- und Fertigungszeit (Taktzeiten)
- Systemintegration
- Werkzeugkosten
- Prozesssicherheit (Ausfälle, Ausschuss)
- Produktionsabfälle
- Oberflächenqualität/Lackierbarkeit

Externe Faktoren wie Marktakzeptanz, Risikoverhalten, Rahmenbedingungen etc. interessieren vor allem, wenn das Potenzial nicht ausgeschöpft wird, obwohl die technischen Eigenschaften des Materials gut sind und die wirtschaftliche Produktion an sich gegeben wäre. Auf diese Faktoren wird ausführlich im Kapitel 7.5 eingegangen. Technologie, Wirtschaftlichkeit der Produktion und exogene Faktoren stehen in einem Wechselspiel zueinander. Die Wirtschaftlichkeit ist sowohl abhängig von

²⁸

OEM = Original equipment manufacturers; gebräuchliche Bezeichnung für Autohersteller

den technischen Gegebenheiten als auch von externen Faktoren wie beispielsweise Rahmenbedingungen oder Marktakzeptanz.

7.4.2 Entwicklung der Markt- und Anbieterstrukturen

Heute sind die europäischen OEM auf einem hohen Niveau und im weltweiten Markt stark vertreten. Von den 22 grössten Autoproduzenten weltweit sind zehn europäischer Herkunft. Die Marktöffnung mit dem Abbau von Handelsschranken und die damit verbundene Zunahme des Wettbewerbsdrucks sowie neue technologische Möglichkeiten und Erfordernisse führen zu folgenden tief greifenden Veränderungen der Marktstrukturen [EU-Projekt ATLAS]:

- Immer mehr Teile und immer komplexere Teile werden direkt von der Zulieferindustrie gefertigt - sei es nun aus Kunststoff oder aus Metall. Die OEM werden vermehrt mit vorgefertigten Bauteilen und Modulen von der Zulieferindustrie beliefert. Prognosen nennen einen Zuwachs der Wertschöpfung bei den Autozulieferern in den nächsten Jahren um über 40% [Paschek 2004a].
- Dies stärkt auch die Bedeutung der Zulieferer als Entwickler neuer Technologien und Konzepte, verlangt aber gleichzeitig auch höheres Know-how und finanzielle Kapazität. Dies wird die Tendenz für Fusionen und Übernahmen verstärken und die Zahl der direkten Zulieferer der OEM reduzieren.
- Die Kunststofftechnologie ermöglicht aber auch neuen, kleineren Unternehmen in diesen Markt einzusteigen, da die Anfangsinvestitionen, im Vergleich zur Stahlindustrie, relativ tief sind.

Der Fahrzeugmarkt ist hoch kompetitiv. Wenn die OEM sich einen Marktvorteil erhoffen durch das Angebot von energieeffizienteren Fahrzeugen, so werden sie diese Chance ergreifen. Die heutige unsichere Entwicklung der Benzin- und Dieselpreise sowie die Klimaerwärmung und Umweltprobleme führen dazu, dass von Konsumentenseite verbrauchsarme Fahrzeuge gefordert werden. Mindestens ebenso wichtig ist, dass durch die Leichtbauweise die Integration von Komfortfunktionen kompensiert wird, die das Fahrzeug schwerer machen.

Die Auto-Zulieferindustrie der Schweiz ist mit schätzungsweise 15'000 Arbeitsplätzen und ca. 6.5 Milliarden Franken Umsatz wirtschaftlich bedeutend [http://www.auto-schweiz.ch/basic_d/d_conNews3.htm]. Es existieren mehrere Unternehmen, die auch in der Forschung und Entwicklung eine aktive und innovative Rolle spielen. Ein Beispiel, das in dieser Arbeit erläutert wird, ist das vom Bund unterstützte Projekt Modultec (vgl. Kapitel 7.3.3). International ist die Kunststoff-Zulieferindustrie ein sehr grosser Industriezweig mit zahlreichen Unternehmungen und Grosskonzernen. Die OEM betreiben zwar alle eigene Forschungsabteilungen, können jedoch auch auf Zulieferer zurückgreifen, die eigene Entwicklungsabteilungen haben und innovative Ideen entwickeln und umsetzen.

Die Zusammenarbeit zwischen OEM und Zulieferern ist intensiv und der Austausch von Ideen und Know-how findet statt. Insgesamt sind die Marktstrukturen im Kunststoff-Leichtbau im Automobilbau intakt und sehr vielfältig, der Wettbewerb ist gross, wodurch der Entwicklungs- und Kostendruck zunehmend steigt.

7.4.3 Spezifisches Einsparpotenzial durch Gewichtsreduktion

Aus untenstehender Abbildung ist ersichtlich, dass herkömmliches SMC schwerer ist als Aluminium. Werden jedoch neue Verfahren wie Advanced SMC oder Leicht-SMC angewendet, kann auch hier das Gewicht zusätzlich reduziert und die Produktionszyklen massgeblich verbessert werden. Nicht nur bei Stahl- und Aluminiumbauweise, sondern auch bei den Leichtbaukunststoffen wird intensiv nach leichteren Materialien und Bauteilen geforscht. Als Beispiel für den Fortschritt bei thermoplastischen Werkstoffen kann das Unterboden-Modul von Rieter genannt werden, wo neu statt PVC Polypropylen

eingesetzt wird. Dieses Material ist nicht nur 15-20% leichter als PVC, sondern kann auch besser recycelt werden, was für die Einhaltung der EU-Altauto-Richtlinie relevant ist [Wulf 2004]. Bei Advanced SMC werden statt Glasfasern so genannte "low-cost" Kohlenstofffasern eingesetzt, die unidirektional eingebracht werden. Vorteile dieses Materials sind die abfallfreie Verarbeitung und geringere Wandstärken (was zu zusätzlichen Gewichtseinsparungen führt). DaimlerChrysler entwickelt je eine Variante für Struktur- und Oberflächenanwendungen [Schuh, 2004]. Untenstehende Grafik vergleicht das Gewicht eines Bauteils bei Anwendung verschiedener Materialien.

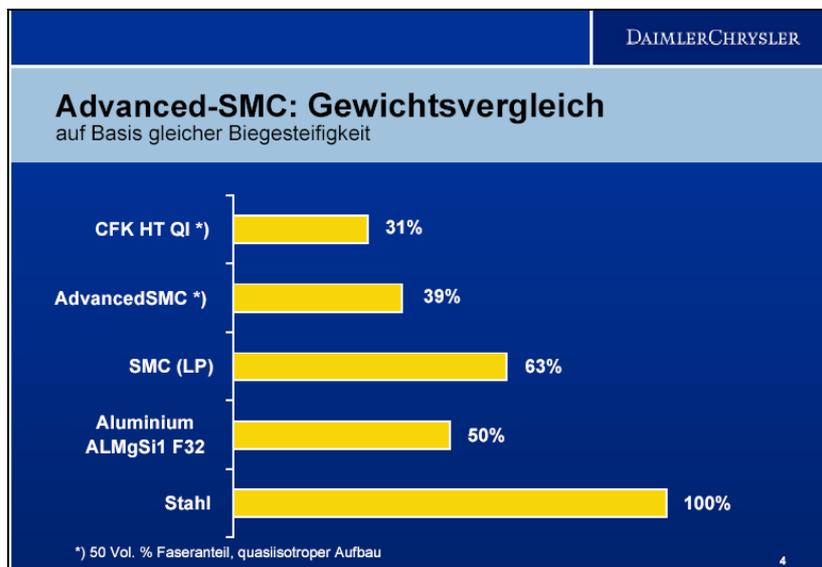


Bild 39. Gewichtsvergleich verschiedener Materialien im Automobilbau [Schuh 2004]

Eine Ökoeffizienzstudie im Auftrag der European Alliance for SMC verglich Heckdeckel aus Stahl, Aluminium und SMC. Die umfassende Analyse berücksichtigte Rohstoff- und Energie-Verbrauch, Umweltbelastung (Emissionen, Toxizität, Risiko) und Gesamtkosten (Rohstoff, Produktion, Nutzung, Entsorgung) und kam zu folgenden Resultaten [Schmidt et al. 2004]:

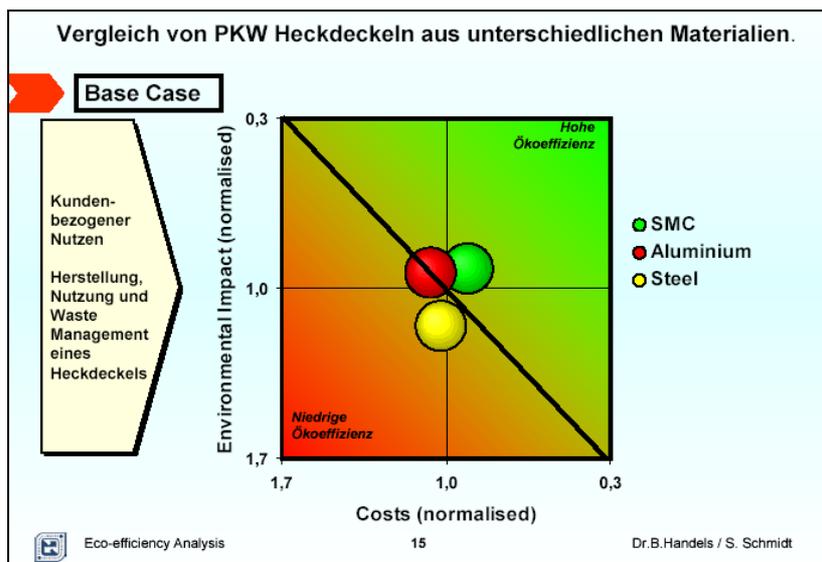


Bild 40. Resultat der Ökoeffizienzstudie im Auftrag der European Alliance for SMC, Basisszenario - Stand heute [Schmidt et al. 2004]

Einschränkend muss angemerkt werden, dass die Studie das Waste Management nicht berücksichtigte, weil die Autoren davon ausgingen, dass alle Stoffe zu mind. 90% recycelt werden können und die Kosten dafür gleich sind. Die Erläuterungen zum Thema Recycling (vgl. Kap.6.3.3) zeigen jedoch, dass Duomere nur mit grossem Aufwand und oft nicht in zufrieden stellender Qualität wiederverwertet werden können.

Die Resultate der Ökoeffizienzanalyse zeigten dass:

- Unter den gewählten Bedingungen der Heckdeckel aus SMC die ökoeffizienteste Alternative darstellt, obwohl Aluminiumbauteile leichter sind als SMC-Teile.
- Bezogen auf die Kosten unterscheiden sich die Varianten nur geringfügig: Die Produktionskosten von SMC und Stahl sind gleich und günstiger als die Kosten der Aluminium-Alternative. Die höheren Produktionskosten von Aluminium werden durch die geringeren Kosten der Nutzenphase (Treibstoffbedarf) relativiert.
- Stahl stellt die Alternative mit der geringsten Ökoeffizienz dar. Dies ist zurückzuführen auf den hohen Treibstoffbedarf der Nutzenphase und die dadurch bedingten Emissionen.
- Aluminium hat zwar den geringsten Treibstoffbedarf der Nutzenphase, diese Vorteile werden allerdings durch den hohen Energieaufwand der Materialherstellung relativiert.

Das spezifische Gewicht von SMC ($1,9\text{g/cm}^3$) ist zwar tiefer als jenes von Aluminium ($2,7\text{g/cm}^3$), durch die Dicke des Materials ist das Bauteil aus SMC aber rund 60% schwerer als Aluminium. Der hohe Energieverbrauch der Aluminiumherstellung macht jedoch die grossen Einsparungen beim Treibstoffverbrauch wieder zunichte. In der Ökoeffizienzanalyse zeigte die Sensitivitätsanalyse, dass mit besserem resp. leichterem SMC-Material die SMC Variante rasch deutlich besser wird. Der Heckdeckel aus Stahl ist und bleibt auch in den verschiedenen Szenarien die schlechteste Variante bzgl. Ökoeffizienz.

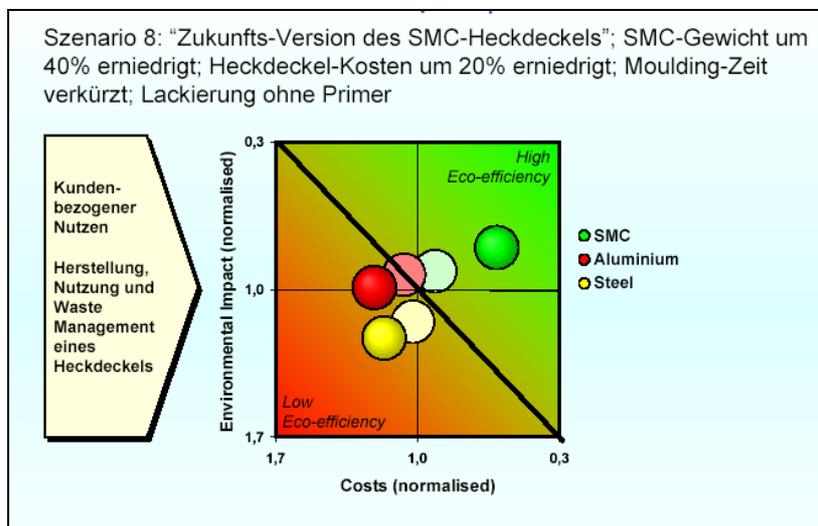


Bild 41. **Resultat der Ökoeffizienzstudie im Auftrag der European Alliance for SMC: Szenario Zukunfts-Version [Schmidt et al. 2004]**

Neben Gewichtseinsparungen können aerodynamisch optimierte Module durch den verringerten Luftwiderstand Treibstoffeinsparungen bewirken. Die Designfreiheit ermöglicht die Konstruktion von komplexen Teilen mit weniger Angriffsfläche. So werden beispielsweise beim Unterboden-Modul der Firma Rieter die Luftbewegungen unter dem Fahrzeug minimiert, was neben dem Spareffekt durch Gewichtsreduktion zu einer zusätzlichen Verbrauchsreduktion führt, die 60 kg Gewichtseinsparung entspricht [Wulf 2004].

Zusammenhang Gewicht - Verbrauch

Der Zusammenhang Gewichtsreduktion - Verbrauchsreduktion wird von mehreren Faktoren beeinflusst. In Untersuchungen werden gleichzeitig mehrere Parameter modifiziert, resp. Messungen bei unterschiedlichen Fahrzeugen vorgenommen, die neben der Gewichtsdivergenz auch Unterschiede beim Fahrzeugdesign und den technischen Kennwerten aufweisen. Relevante Faktoren sind Fahrzeugmasse, Rollwiderstand, Luftwiderstand und Antriebswirkungsgrad. Gewichtsreduktionen sind allerdings zentral, da sie die Optimierung der anderen Grössen erst ermöglichen [Paschek 2004b]. Untersuchungen der EMPA zeigen deutlich, dass mit der Zunahme des Gewichts auch eine Zunahme des Treibstoffverbrauchs verbunden ist. Abbildung 40 zeigt die Messresultate der EMPA von 18 Personenwagen mit Benzinmotor. Der Fahrzyklus "L2 I" misst die Emissionen im Stadtverkehr. "L2 II" entspricht der Situation ausserorts und "L2 III" zeigt die Emissionen bei Fahrten auf der Autobahn.

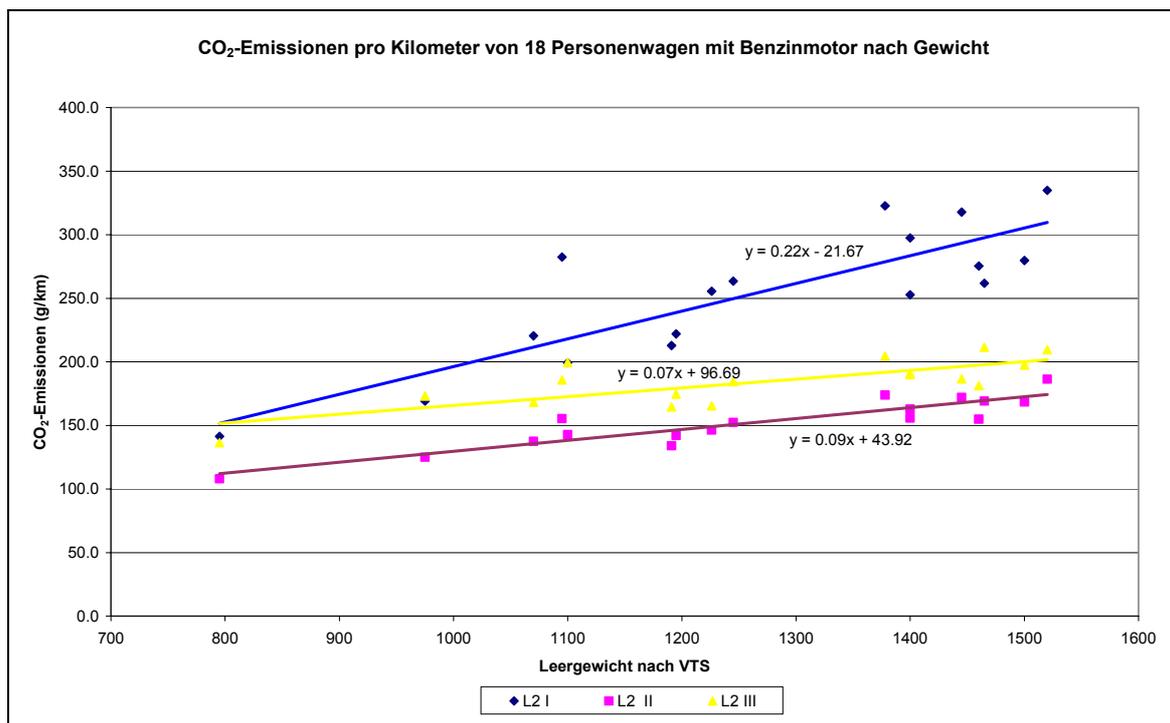


Bild 42. Messresultate der EMPA nach der Methode "L2": CO₂-Emissionen pro Fahrzeugkilometer von 18 Personenwagen mit unterschiedlichem Gewicht ("L2 I" = Stadtverkehr, "L2 II" = ausserorts, "L2 III" = Autobahn)

Erfolgt die Auswertung der Daten nach CO₂ Emissionen pro Kilogramm Fahrzeugmasse, so schwächt sich der Zusammenhang zwischen Gewicht und Verbrauch deutlich ab oder wird sogar negativ (vgl. Abbildung 41). Im Stadtverkehr ist der Zusammenhang zwischen Gewicht und Energieverbrauch noch leicht positiv. Dies deshalb, weil der Energieverbrauch bei wiederholtem Beschleunigen gross ist und wesentlich von der Masse des Fahrzeugs abhängt. Aber auch ausserorts oder im Autobahnverkehr hat das Gewicht grossen Einfluss auf den Verbrauch, da der Rollwiderstand proportional ist zum Gewicht des Autos [Austin et al. 1999]. Dennoch wird der Zusammenhang Gesamtgewicht - Verbrauch negativ wenn die CO₂ Emissionen pro Kilogramm dargestellt werden. Dass schwere Fahrzeuge pro Kilogramm ihres Gewichts weniger CO₂ ausstossen als leichte Fahrzeuge, ist zurückzuführen auf die Tatsache dass das höhere Gewicht durch effizientere Auslegung der übrigen Einflussfaktoren wie beispielsweise Aerodynamik oder Wirkungsgrad des Motors (über-)kompensiert wird.

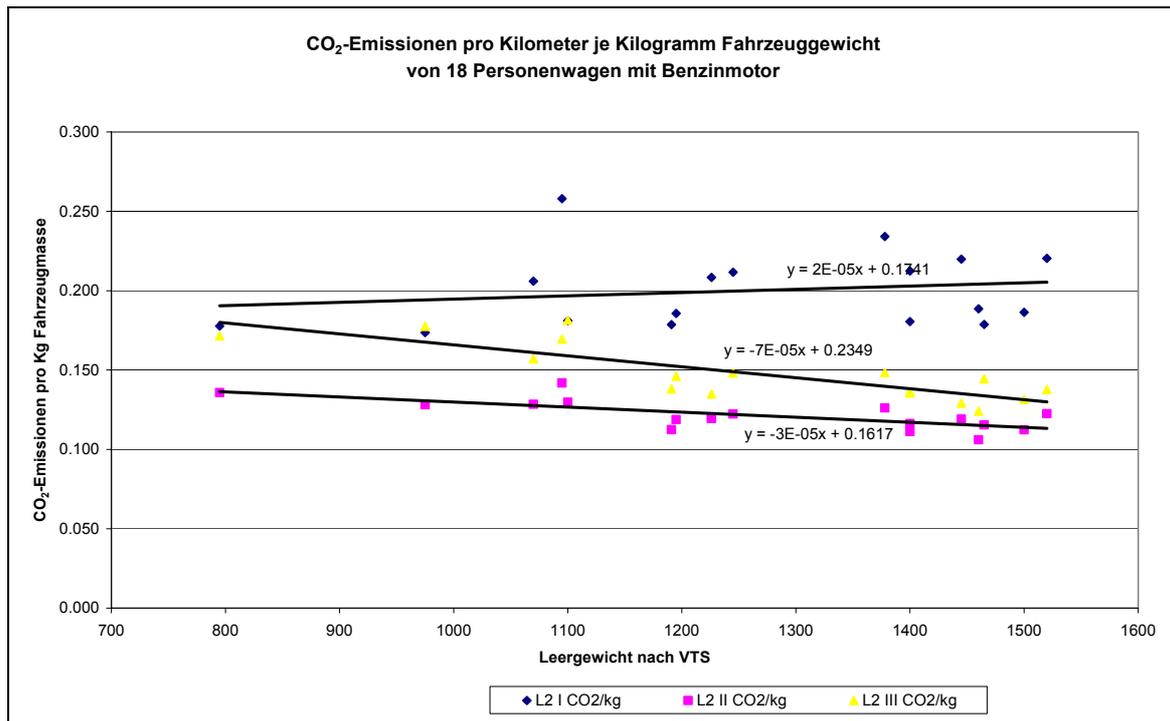


Bild 43. Messresultate der EMPA nach der Methode "L2": CO₂-Emissionen pro Kilometer und Kilogramm Fahrzeuggewicht und von 18 Personenwagen mit unterschiedlichem Gewicht ("L2 I" = Stadtverkehr, "L2 II" = ausserorts, "L2 III" = Autobahn)

Da bei den Daten der EMPA Unterschiede der gemessenen Fahrzeuge bei anderen Parametern wie Motorenstärke etc. nicht isoliert wurden, wird für die Abschätzung des Sparpotenzials durch Gewichtsreduktion auf die Ergebnisse einer Studie aus den USA zurückgegriffen, die ähnliche Resultate ausweist. Die Studie ermittelte, dass ohne Anpassung anderer Faktoren eine Gewichtsreduktion von 10% des Fahrzeuggewichts eine Treibstoffeinsparung von 5% bewirkt. Berücksichtigt man, dass die Gewichtsreduktion auch die effizientere Auslegung anderer Teile (beispielsweise Verwendung eines kleineren und damit sparsameren Motors) ermöglicht, so sind Einsparungen bis zu 8% möglich [Austin et al. 1999].

7.4.4 Heutiges Leichtbaupotenzial mit konventionellen Fahrzeugkonzepten

Heute beträgt nach Schätzungen von Experten der durchschnittliche Kunststoffanteil bei Neuwagen aus Grossserien (ohne Premium Cars) ca. 16%. Der Anteil der faserverstärkten Kunststoffe wird auf rund 5% geschätzt, wobei der Anteil der langfaserverstärkten Thermoplaste nahe bei Null liegt. Genaue Zahlen zum Anteil der faserverstärkten Kunststoffe am gesamten verwendeten Kunststoff sind nicht erhältlich. SMC ist in der heutigen Fahrzeugflotte von Grossserienautos der am häufigsten verwendete faserverstärkte Kunststoff, der Einsatz von LFT/GMT nimmt jedoch stark zu. Für die Einschätzung des Leichtbau-Potenzials ist in erster Linie der Anteil der faserverstärkten Kunststoffe massgebend, da unverstärkte Kunststoffe keine schweren Metalle ersetzen.

Die Abschätzung des heutigen, vom material- und produktionstechnischen Gesichtspunkt aus kurzfristig realisierbaren Potenzials lässt Aspekte wie z.B. Veränderung der Marktakzeptanz, Strategien der Autoindustrie oder Fahrzeugdesign ausser acht. Es wird zugrunde gelegt, dass Kunststoff dort eingesetzt wird, wo heute technisch ausgereifte und wirtschaftlich wettbewerbsfähige Verfahren existieren. In den Interviews mit den Vertretern der Autoindustrie zeigte sich jedoch deutlich, dass beim Konzipieren eines neuen Automodells der Gewichtsaspekt nur ein Faktor unter vielen und bei der Materialwahl nicht immer das entscheidende Kriterium ist (vgl. Kapitel 7.2.3). Insofern erfolgt die Abschätzung des Potenzials unter einer eingeschränkten Sichtweise. Ein

Interviewpartner der Autoindustrie drückte dies so aus: "Wenn wirklich ein Potenzial existiert, so schöpfen wir dies auch aus. Für die Autoindustrie ist nur die umfassende Sichtweise mit Einbezug aller Entscheidungskriterien relevant."

Die Schätzung ist mit Unsicherheiten behaftet; so konnten auch Experten nur sehr ungenaue Angaben machen über den heutigen Anteil der faserverstärkten Kunststoffe. Die mögliche Gewichtseinsparung durch Ersatz von Stahl durch faserverstärkte Kunststoffe ist je nach Bauteil und verwendetem Kunststoff unterschiedlich. Zudem können auch die Bauteile aus Stahl sehr unterschiedliche Ausgangsgewichte aufweisen, je nach verwendeter Stahlsorte. Das durchschnittliche Gewicht der Neufahrzeuge betrug 2001 rund 1'200 kg, 1995 lag dieser Wert noch bei 1'100 kg [ECMT 2003]. In der 8. Berichterstattung von auto-schweiz wurde das Durchschnittsgewicht neuer Personenwagen bereits mit mehr als 1400 kg angegeben [Blessing et al. 2004]. Dieser Wert wird als Basis für die Schätzungen verwendet, da das Potenzial nur bei Neufahrzeugen ausgeschöpft werden kann.

Der Einsatz der faserverstärkten Kunststoffe liesse sich auf schätzungsweise 18% des Gesamtgewichts erhöhen, wie Beispiele einzelner Automodelle und Expertenschätzungen zeigen. Das Potenzial von LFT/GMT wurde an einer EATC-Tagung bereits im März 2000 auf rund 5% des Fahrzeuggewichts geschätzt [van Asselt et al. 2000]. Die Übersicht in Abbildung 36 für SMC/BMC ergibt ein Gesamtgewicht der Teile von rund 180 kg, was einem Anteil von rund 13% am Gesamtgewicht eines heutigen Neuwagens entspricht.

Aufgrund der vorliegenden Daten kann nur sehr grob ein quantifiziertes Sparpotenzial für den Treibstoffverbrauch des schweizerischen Autobestandes vorgenommen werden. Folgende Annahmen liegen der Grobschätzung zugrunde:

Durchschnittliches Gewicht neue Personenwagen [Blessing et al. 2004]	1400 kg
Durchschnittlicher Treibstoffverbrauch neue Schweizer Personenwagen pro 100 km [Blessing et al. 2004]	7.99 l
Durchschnittliche spezifische Gewichtseinsparung durch Einsatz von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen (vgl. Abbildung 37)	50%
Tatsächlicher Gewichtsanteil faserverstärkte Kunststoffe heute (Schätzung)	5% / 70 kg
Potenzial Anteil faserverstärkte Kunststoffe heute (Schätzung)	18% / 250 kg
Einsparung Treibstoff pro 10% Gewichtsreduktion (tieferer Zahl: reine Gewichtsreduktion, höhere Zahl: zusätzlich Berücksichtigung der ermöglichten Optimierungen von Motor etc. durch das tiefere Gewicht) [Austin et al. 1999]	5-8%

Tabelle 22 Annahmen zur Schätzung des heutigen Treibstoff-Sparpotenzials faserverstärkter Kunststoffe im Automobil-Leichtbau

Könnte entsprechend der Schätzungen der heutige verstärkte Kunststoffanteil von 5% am Gesamtgewicht des Fahrzeugs um 13% auf 18% erhöht werden, so würde dies einer Netto-Gewichtseinsparung von ca. 180 kg resp. 13% des Gesamtgewichts entsprechen (mit 180 kg mehr Kunststoff kann das Gewicht des Stahls um das Doppelte reduziert werden. Dies hätte - eine Treibstoffeinsparung von 6.5-10.4% zur Folge. Die kleinere Zahl bezieht sich auf eine reine Gewichtsreduktion, die höhere Zahl bezieht Optimierungen am Fahrzeug, die durch das reduzierte Gewicht möglich werden, mit ein. Damit würde sich der durchschnittliche Verbrauch von Neuwagen in der Schweiz pro 100 km von 7.99 l auf 7.5-7.2 l reduzieren.

Ein wichtiger Punkt ist die Lösung des Recycling-Problems, das sich insbesondere bei den Duromeren ergibt. Ein Anteil von 20% verstärkter Kunststoffe im Fahrzeug bedingt das umfassende Recycling der Kunststoffe, da sonst die vorgeschriebene Recyclingquote der EU-Altauto-Richtlinie von 85% resp. 95% ab 2015 nicht erreicht werden kann.

7.4.5 Zukünftiges Leichtbaupotenzial mit konventionellen Fahrzeugkonzepten

Die Automotive Composite Alliance ACA ist eine US-amerikanische Vereinigung von 18 Unternehmungen der kunststoffverarbeitenden Industrie für den Automobilbau [www.autocomposites.org]. Nach deren Berechnungen hat der Einsatz von Duromeren im Automobilbau in den letzten fünf Jahren um 27% zugenommen. Die Vereinigung prognostiziert auch für die nächsten Jahre ein kräftiges Wachstum der faserverstärkten Kunststoffe im Automobilbau. Nach ihrer Einschätzung beruht dieses Wachstum auf der zunehmenden Akzeptanz der Automobilproduzenten gegenüber diesen Werkstoffen, andererseits werden durch technologische Weiterentwicklung und Verbesserung der Produkteigenschaften die Einsatzmöglichkeiten laufend erweitert und die Kosten gesenkt. Neben der Gewichtseinsparung sind die Gestaltungsfreiheit der Automobilhersteller und die kostengünstige Möglichkeit, Änderungen im Design vorzunehmen bedeutende Vorteile der Duromere.

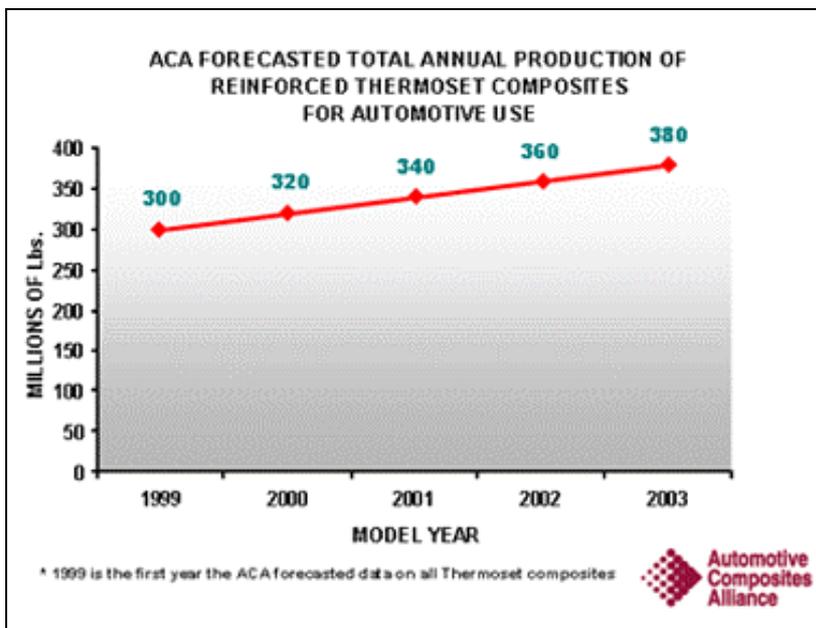


Bild 44. Prognose der Automotive Composites Alliance zur Entwicklung des Einsatzes von Duromer-Kunststoffen im Automobilbau in Mio. Pfund [www.autocomposites.org]

Ebenso positiv sieht die European Alliance of SMC, das europäische Pendant der ACA in den USA, die Wachstumschancen für den Einsatz von SMC und BMC, den beiden heute am meisten eingesetzten Duromeren im Automobilbau.

Das EU-Projekt ATLAS erhob in den Jahren 1996/97 Daten, unter anderem zu Stand, Einschätzung des Entwicklungsstands und des Potenzials des Leichtbaus im Automobilbau. Das Potenzial für den Einsatz von neuen Materialien und Designs wurde im Projekt ATLAS quantifiziert und als bedeutend eingeschätzt, wie folgende Tabelle zeigt:

Fahrzeug	Potenzieller Einsatz neuer Materialien und Designs 2010	Einsatz neuer Materialien und Designs 1995
Pkw Benzin	80 Mio. Fahrzeuge	2,7 Mio. Fahrzeuge
Pkw Diesel	12 Mio. Fahrzeuge	0,4 Mio. Fahrzeuge

Tabelle 23 Schätzung zur Entwicklung des Einsatzes neuer Leichtbau-Materialien im gesamten Fahrzeugbestand der EU [www.europa.eu.int]

In einem Referat an einer Kunststofftagung bezeichnete ein Vertreter von DaimlerChrysler die Zukunftsperspektiven von SMC als sehr gut, insbesondere bei den neuen SMC-Materialien, den so genannten Advanced SMC und Leicht-SMC mit verbesserten Eigenschaften. Advanced SMC ist deutlich leichter als herkömmliches SMC und Alu, die zukünftige Entwicklung der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von der Entwicklung der Produktionsprozesse ist allerdings noch unklar. Leicht-SMC ist leichter und wirtschaftlicher als herkömmliches SMC, jedoch immer noch etwas schwerer als Aluminium [Schuh 2004]. Untenstehende Grafik zeigt die Einschätzung des Leichtbaupotenzials und der Entwicklung der Wirtschaftlichkeit der SMC-Verfahren im Vergleich zu Aluminium und Stahl.

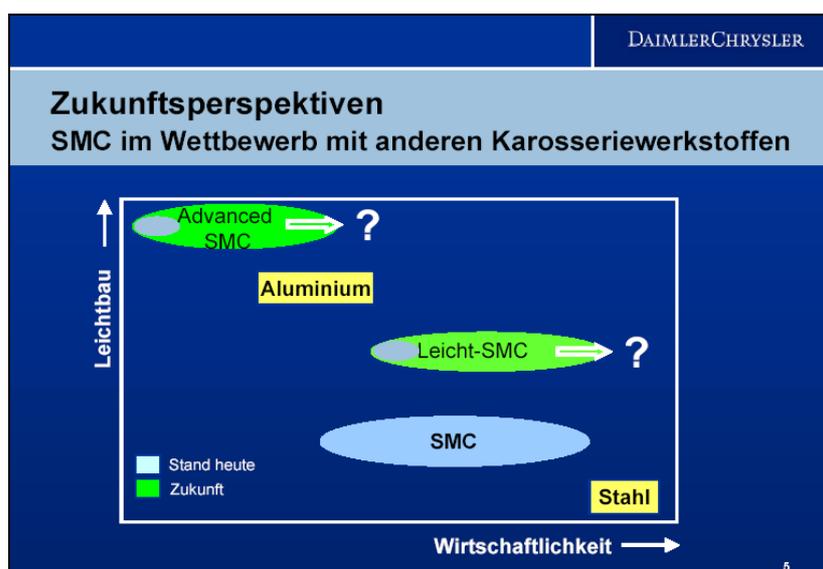


Bild 45. Zukunftsperspektiven von SMC nach Einschätzung eines DaimlerChrysler Vertreters [Schuh 2004]

Für LFT/GMT gehen Kunststoffexperten davon aus, dass sich die Anwendung in Grossserien in Zukunft deutlich erhöhen wird. Die relativ neuen Verfahren werden heute vorwiegend für Teile eingesetzt, die nicht im Aussenbereich liegen und lackiert werden müssen. Unter der Annahme, dass Prozesse und insbesondere die Oberflächenqualität verbessert werden, können diese Materialien weit häufiger eingesetzt werden als dies heute der Fall ist. Bereits heute werden in fast 10% der europäischen Personenwagen wesentliche Teile eines Unterbodenmoduls aus GMT oder LFT realisiert. Während die Automobilbranche weltweit mit Überkapazitäten zu kämpfen hat, weist das UF-Modul Zuwachsraten von jährlich 10-15% auf [Wulf 2004]. Nach Einschätzungen der European Alliance for Thermoplastic Composites (EATC) wird eine jährliche Zuwachsrate der langfaserverstärkten Thermoplaste im Automobil-Leichtbau von 10% bis ins Jahr 2010 als realistisch angesehen.

An der EATC-Tagung im Jahr 2003 wurden Überlegungen vorgestellt zum Auto im Jahr 2010; bis dahin soll das Durchschnittsgewicht von Neuwagen von 1400 kg auf 1150 kg sinken, was einer Gewichtseinsparung von 18% des heutigen Durchschnittsgewichts von Neuwagen entspricht. Dieses Ziel soll durch die Erhöhung des Kunststoffanteils und die Reduktion der verwendeten Stahlmenge erreicht werden [EATC News 2003]. Diese Gewichtsreduktion von 18% entspricht einer Treibstoffeinsparung von 9-14,4%.

7.4.6 Zukünftiges Leichtbaupotenzial mit neuen Fahrzeugkonzepten

Ob sich neue Fahrzeugkonzepte wie die Modulbauweise in Zukunft auf breiter Ebene und in der Serienproduktion durchsetzen, ist zum heutigen Zeitpunkt schwer abschätzbar. Einer der wichtigsten Faktoren neben der Bewältigung der material- und produktionstechnischen Herausforderungen ist die Akzeptanz der Autoindustrie für neue Konzepte. Die Hemmnisse und Erfolgsfaktoren für die erfolgreiche Marktdurchdringung der Leichtbau- und Modulbautechnologie werden in Kapitel 7.5

dargelegt. Das folgende Kapitel konzentriert sich auf die Darlegung des Sparpotenzials unter Berücksichtigung der heutigen Anwendungen und der aktuellen Forschung.

Bereits heute hat der Modulbau einen wichtigen Stellenwert im Automobilbau. In fast allen Autos werden in unterschiedlichem Ausmass vorgefertigte Teile eingesetzt, sowohl aus Metall als auch aus Kunststoff. Nach Aussage zahlreicher Experten aus der Zulieferindustrie und aus den OEM wird der Trend zur Modularisierung in den nächsten Jahren noch zunehmen. Mit funktionsintegrierten, aus mehreren Komponenten bestehenden Bauteilen, die in komplexen Spritzgussprozessen hergestellt werden, können Montagevorgänge reduziert und Toleranzen kompensiert werden. Dies führt zu spürbaren Kosteneinsparungen [High Tech Plastics 2003 und weitere].

Dennoch hat die Automobilindustrie ihre Produktionsweise sowie die Fahrzeugkonzepte noch nicht grundlegend erneuert. Dies hat auch Konsequenzen für den faserverstärkten Kunststoffeinsatz und die Anwendung des Modulbaus. Mit herkömmlicher Fertigungsweise und gängigen Fahrzeugkonzepten können sowohl Kunststoff als auch Modulbauweise nur begrenzt eingesetzt werden. Es existieren zwar einzelne Beispiele, die den Modulbau weit vorangetrieben haben, so zum Beispiel das Smart-Werk in Hambach (Frankreich) oder die VW-Fabrik in Resende (Brasilien). In Hambach fertigen Systempartner für den Smart u.a. Cockpit, Frontend, Heckklappe, Tür sowie Body-Panels in separaten Produktionsanlagen, die sich direkt auf dem Werkgelände befinden. An der eigentlichen Produktionslinie werden diese Teile nur noch an den Grundrahmen "angeclipst" [Köth 2004].

Ein Beispiel für ein Modul aus faserverstärktem Kunststoff, das bereits heute einen Marktanteil in Grossserien aufweist ist das UF-Modul (Unterboden) von Rieter. Der grosse Vorteil von UF-Modulen liegt bei der Integration mehrerer Funktionen in ein einziges Bauteil. So werden beispielsweise Motoren- und Getriebekapseln in den Unterboden integriert. Mit geringeren Produktionskosten werden Verbesserungen in der Akustik, Gewichtsreduktion und Montageoptimierungen mit Reduktion der Anzahl Teile erzielt [Wulf 2004].

Ein Repräsentant von BMW ist der Ansicht, dass für die Ausweitung der Modularisierung nicht unbedingt ein Space-Frame notwendig sei, sondern auch die heute gebräuchliche selbsttragende Blechschalenstruktur eingesetzt werden könne. Dies ist also ein Hinweis darauf, dass die zunehmende Modularisierung nicht automatisch zu einem höheren Kunststoffeinsatz führt, sondern bis zu einem gewissen Grad auch mit Metall möglich ist [Köth 2004]. Allerdings ist die Designfreiheit beim Kunststoff ein entscheidender Vorteil, wenn es um die Konstruktion komplexer Teile mit integrierten Funktionen geht. Die Möglichkeiten zur Reduktion der Anzahl der Bauteile sind mit Kunststoff deutlich grösser als mit Stahl oder Aluminium.

Bis zur Serienproduktion von Modul-Autos aus wenigen Teilen, wie es z.B. im Projekt Modultec gebaut wurde, ist es noch ein weiter Weg. Nach Ansicht einiger Experten ist das Haupthindernis nicht die technische Machbarkeit, sondern die fehlende Bereitschaft der Autoindustrie, komplett neue Konzepte umzusetzen [Wenz 2004, Horlacher et al. 2003]. So spielte zwar Mercedes-Benz vor einigen Jahren bereits mit dem Gedanken, ein Modul-Auto aus vier Teilen herzustellen, der so genannte "Mocar" (Modular Car) ist allerdings bis heute nicht auf den Markt gekommen. VW gibt an, dass um 2010 erste Modulbau-Fahrzeuge für den Massenmarkt mit einer vollen Kunststoffkarosserie produziert werden könnten. Den Anfang werden wohl Nischenmodelle im Kleinwagen-Segment machen mit maximal 300 Stück pro Tag. Bis dahin müssen jedoch die Taktzeiten, die heute noch bis zu fünf Minuten betragen, reduziert werden. Gelingt dies, so könnten bis zu 800 Fahrzeuge pro Tag gefertigt werden [Köth 2004].

Die grosse Gewichtsreduktion von Personenwagen in Modulbauweise mit hohem Kunststoffanteil wurde bei mehreren Leichtbau-Konzeptautos demonstriert. So konnte die Firma Horlacher beim Projekt Modultec das Fahrzeuggewicht, verglichen mit einer herkömmlichen Konstruktionsweise aus Metall, um 200 kg resp. 27% (550 kg statt 750 kg) senken. In der Fortsetzung des Projekts (Modultec II) war das Ziel, der industriellen Fertigung möglichst nahe zu kommen. Mit den beiden Projekten konnte gezeigt werden, dass Gewichtseinsparungen von 30% möglich sind unter Einhaltung der

Sicherheitsanforderungen. Nach Schätzungen der Firma Rieter sind mit neuer Leichtbauweise sogar Gewichtseinsparungen von bis zu 60% möglich [Horlacher et al. 2003].

Eine Untersuchung des "American Council for an Energy-Efficient Economy" geht von Gewichtsreduktionen von bis zu 40% durch Leichtbauweise aus, allerdings nicht nur durch Einsatz von Kunststoff sondern auch Leicht-Stahl, Magnesium und Aluminium. Diese Gewichtsreduktion wurde bei Concept Cars von Chrysler, Ford und General Motors erreicht [De Cicco 2000]. Das Fahrzeug "Revolution", gebaut von der Hypercar Inc. in den USA war 56% leichter als eine herkömmliche Konstruktion aus Stahl [www.hypercar.com].

Gewichtsreduktionen von 50% bewirken Treibstoffeinsparungen von 25-40%. Neue Fahrzeugkonzepte weisen nicht nur eine geringere Fahrzeugmasse auf, sondern auch verbesserte Aerodynamik, geringerer Rollwiderstand sowie effizientere Antriebe und lassen sich daher nicht direkt mit herkömmlichen Fahrzeugen vergleichen. Zur Treibstoffeinsparung kommen bedeutende Einsparungen durch die beschriebenen Komponenten hinzu. So konnte beispielsweise VW vor einiger Zeit das "1-Liter-Auto" präsentieren, das in Leichtbauweise gebaut wurde, allerdings von einer Serienproduktion noch weit entfernt ist.

7.5 Monitoringfaktoren: Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

7.5.1 Übersicht der identifizierten Hemmnisse und Erfolgsfaktoren

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen identifizierten Monitoringfaktoren erläutert und ihre Eignung für ein zukünftiges Monitoring begründet.

Folgende Tabelle zeigt in der Übersicht die Hemmnisse und Erfolgsfaktoren des Kunststoff-Leichtbaus im Automobilbau und die Empfehlung zur Verwendung als Monitoringfaktoren:

Monitoringfaktor	Empfehlung für ein zukünftiges Monitoring		
	Weiterverfolgen	Evt. berücksichtigen	Nicht berücksichtigen
Taktzeiten	X		
Designfreiheit		X	
Recycling	X		
Beschichtungstechnologien	X		
Fügetechnik			X
Crashsicherheit	X		
Produktionsprozesse	X		
Vernetzung und Information			X
Marktakzeptanz			X
Know-how			X
Forschung	X		
Gesetzliche Rahmenbedingungen	X		
Wirtschaftlichkeit	X		

Tabelle 24 Übersicht der identifizierten Monitoringfaktoren des Kunststoff-Leichtbaus im Automobilbau und ihre Berücksichtigung bei einem zukünftigen Monitoring

7.5.2 Technische Faktoren

Taktzeiten

Die Taktzeiten sind heute beim faserverstärkten Kunststoff teilweise noch deutlich länger als bei der Produktion von Stahl- oder Alubauteilen [www.smc-alliance.com]. Bis jetzt werden faserverstärkte Kunststoffe im grösseren Ausmass mit wenigen Ausnahmen nur bei teuren Autos eingesetzt. Bei günstigen Autos werden nur wenig belastete und kleinere Teile, meist günstige Thermoplaste, die nicht im Lackbereich sind, eingesetzt [Sommer 2003]. In der Produktion von SMC/BMC Bauteilen sind die Taktzeiten auch für Grossserien wettbewerbsfähig. Ihre strukturtragenden Eigenschaften sind jedoch beschränkt, da die Verstärkungsfasern relativ kurz sind und ungerichtet in die Matrix eingebracht werden. Verfahren mit Langfaserverstärkung und gerichteter Auslegung der Fasern müssen bzgl. Taktzeiten noch verbessert werden. Es existieren jedoch bereits Anlagen mit automatisierter Produktion bestimmter Teile aus langfaserverstärkten Thermoplasten mit Taktzeiten von 22 Sekunden, was den Forderungen der Industrie entspricht [www.waesche.de]. Strukturtragende Teile können an den stark belasteten Stellen speziell mit zusätzlichen Schichten verstärkt werden. Der Einbau dieser Verstärkungen ist heute noch zeitintensiv und wenig automatisiert.

Das Problem der Taktzeiten ist heute erst für einfachere und wenig belastete Teile gelöst. Die Produktion strukturtragender, stark belasteter Teile in Langfasertechnologie ist meist mit relativ langen Taktzeiten verbunden, die den Anforderungen der seriellen Massenproduktion noch nicht genügen. Die Verkürzung der Taktzeiten ist ein wichtiger Punkt für die Durchsetzung der Technologie und daher eine zentrale Aktivität in Forschung und Entwicklung. Die Entwicklung der Taktzeiten sollte bei einer weiteren Beobachtung der Technologie als Monitoringfaktor dienen.

Designfreiheit

Mit Kunststoff sind den Formen der Bauteile fast keine Grenzen gesetzt. Im Gegensatz zu Stahl oder Aluminium, wo die Radien der Bauteile begrenzt sind, kann mit Kunststoff praktisch jede gewünschte Form hergestellt werden. Dies ist ein ganz zentraler Vorteil von Kunststoff gegenüber herkömmlichen Bauweisen. Die Anzahl der Prozessschritte und Bauteile kann stark reduziert werden, da komplexe Formen aus einem Teil gegossen werden können. Es sind weniger Schraub-, Schweiß-, Niet- und Klebverbindungen nötig. Dies führt zu deutlichen Kostenreduktionen.

Kenntnis der Materialeigenschaften und Vertrautheit mit den Verfahren ist eine Grundvoraussetzung für gutes Produkt Design. Nicht jedes Material ist für alle Teile geeignet und durch die Wahl des richtigen Verfahrens können Kunststoffbauteile und -module wettbewerbsfähig sein. Zentral ist das Verhältnis von Verstärkungsfasern und Matrix. Günstige Bauteile, die wenig belastet werden, können mit nur 20% Faseranteil hergestellt werden, während gewisse hochbelastete Teile bis zu 70% Faseranteil aufweisen. Für advanced composite ist ein Verhältnis von 60:40 (Faser:Matrix) üblich. Ein weiterer Faktor ist die richtige Auslegung der Fasern, je nach Anforderung des Bauteils [Composites world 2003]. Ein höherer Faseranteil erhöht die Kosten und das Gewicht des Bauteils. Mit elektronischer Simulation können Ausschuss und Abfälle reduziert und Zeit eingespart werden. In Zukunft wird dieses Vorgehen bei der Entwicklung neuer Verfahren an Bedeutung zunehmen.

Die Designfreiheit ist neben der Gewichtsreduktion der Hauptgrund für den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe im Automobilbau. Sie ermöglicht die Konstruktion multifunktionaler Einheiten und kommt dem Trend zur Modularisierung und Dezentralisierung der Produktion entgegen. Als Monitoringfaktor ist die Designfreiheit weniger relevant, da sie heute schon eine Tatsache ist und wenig weiterentwickelt werden kann/muss. Allenfalls wäre die Weiterentwicklung der Gestaltungsmöglichkeiten der Konkurrenzmaterialien ein Monitoringfaktor.

Recycling

Bisher wurden Recyclingquoten mit dem Recycling der Metalle erreicht und die nichtmetallischen Reststoffe entweder thermisch verwertet oder (ausserhalb der Schweiz) deponiert. Kunststoffe wurden bis anhin nicht rezykliert, weil die Verfahren dazu nicht wettbewerbsfähig sind. Die Prozesse dazu sind aufwändig und die erhaltenen Rezyklate meist minderwertig und können nicht mehr für qualitativ hochstehende Produkte eingesetzt werden. Zudem sind die Erdölprodukte, die im Produktionsprozess eingesetzt werden kostengünstig und der Anreiz Rezyklate einzusetzen daher klein.

Soll die Zunahme des Kunststoff-Leichtbaus nicht gebremst werden, so muss eine Lösung für das Recyclingproblem gefunden werden. Die neue EU-Altauto-Richtlinie schreibt Recyclingquoten von 85% resp. 95% ab 2015 vor. Allerdings lässt sie gewissen Spielraum offen, wie diese Vorgabe zu erfüllen ist, möglich ist auch die thermische Verwertung. Es ist in Forschung und Entwicklung ein Schwerpunkt zu legen auf die Möglichkeiten des Recyclings. Die Ergebnisse der Untersuchung lassen darauf schliessen, dass die Aktivitäten in diesem Bereich bisher nicht sehr gross waren. Die Lösung des Recyclingproblems ist zentral für die Zukunft des "Kunststoff-Autos" und sollte daher bei einem Monitoring weiterverfolgt werden.

Neue Beschichtungstechnologien

Eine teilweise noch ungelöste Herausforderung auf dem Weg zur Modularisierung ist die Farbgebung. Wenn mehrere Produzenten Teile produzieren, die bereits eingefärbt ins Werk kommen, wo sie dann zu einem Auto zusammengesetzt werden, so kann sich das so genannte Colourmatching zum Problem entwickeln [Wenz 2004]. Beim Smart wurde dieses Problem durch eine mehrfarbige Karosserie in Kontrastfarben geschickt umgangen.

Heute rechnen die Autohersteller mit Lackierkosten von 500 bis 1000 Euro pro Neuwagen, wovon die Materialkosten lediglich 10% ausmachen. Der Lackierbereich einer neuen Autofabrik beansprucht rund 25-35% der gesamten Investitionskosten. Neuartige Kunststofffolien, die vergleichbar sind mit einer hochqualitativen Lackierung, sowie weitere technische Neuerungen sollen die herkömmliche Lackierung des Autos überflüssig machen. Sie können sowohl auf Metallteile, als auch auf Kunststoffteile aufgebracht werden. Dies würde allerdings eine Abkehr der Autoindustrie von Jahrzehnte alten, erprobten Strukturen und Prozessen erforderlich machen. Ideal wäre ein Fahrzeugkonzept mit Stahl- oder Alu-Space-Frame und einer Karosserie aus Kunststoff, die ebenfalls nicht mehr lackiert werden muss, da sie direkt eingefärbt wird. Ein BMW-Sprecher gibt an, dass Space-Frame-Konzepte in absehbarer Zeit Serienstandard sein werden, allerdings nur für geeignete Fahrzeuge und in eher geringer Stückzahl. Zudem sei nach wie vor eine Lackierung nötig für Teile des Space-Frames, die sich an der Oberfläche befinden [Wenz 2004].

Ein Hauptgrund, der die Einführung der neuen Lacktechnologie verhindert, sind die massiven Überkapazitäten in den westlichen Autofabriken und damit die fehlende Auslastung der teuren Lackierereien. Die Anbieter der neuartigen Folie sehen daher bessere Chancen in Regionen, wo sich die Autoindustrie erst neu ansiedelt, z.B. China oder Osteuropa [Wenz 2004].

Die Lackierung ist heute, insbesondere bei thermoplastischen Werkstoffen, noch schwierig. Die Forschung und Entwicklung beschäftigt sich jedoch intensiv mit dieser Frage. Die neuen Produktionsverfahren bieten eine Chance für die Einführung gänzlich neuer Lackiersysteme, mit denen die Lackierkosten deutlich gesenkt werden können. Bestehende Lackierkapazitäten in den OEM hemmen jedoch den Einsatz dieser neuen Systeme. Die Durchsetzung dieser neuen Beschichtungstechnologien würde die Einsatzmöglichkeiten von faserverstärkten Kunststoffen verbessern und sollte daher im weiteren Monitoring berücksichtigt werden.

Fügetechnik

Neue Fügetechniken mit Kunststoffklebern ersetzen herkömmliche Vorgänge wie schweißen, nieten und schrauben. Es herrscht ein offener Wettbewerb der Techniken und zurzeit lässt sich nicht sagen, welche sich durchsetzen werden. Die neuen Techniken sind gefragt für die Verbindung von gut umformbaren Werkstoffen wie Stahl oder Alu mit Kunststoffen. Probleme können dabei die stark unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Metallen und Kunststoffen bereiten [Vollrath 2004]. Kunststoffkleber versteifen die zusammengefügte Teile zusätzlich und bieten Vorteil bzgl. Korrosionsfestigkeit.

Für den Einsatz der faserverstärkten Kunststoffe sind die neuen Fügetechniken, die in Zukunft stark zunehmen werden, sehr geeignet. Sie erleichtern Kombinationen von Metall und Kunststoffen und erhöhen bei Kunststoffkarosserien die Steifigkeit. Es werden sicher auch in Zukunft Verbesserungen in der Fügetechnik erzielt werden, allerdings ist sie bereits heute auf einem relativ hohen Entwicklungsstand. Daher steht diese Anwendung nicht im Zentrum für das weitere Monitoring.

Crashsicherheit

Nach Einschätzung verschiedener Experten werden sich Stahl und Aluminium nicht vollständig durch Kunststoff ersetzen lassen [Köth 2004]. Die Resultate von Crash-Tests die im Rahmen von Modultec II durchgeführt wurden, ergaben jedoch gute Resultate [Horlacher 2003]. Hier bestehen noch grosse Diskrepanzen zwischen Concept Cars, mit sehr guten Testresultaten und konventionellen Konzepten, die für Kunststoff nur begrenzten Einsatz sehen. Dementsprechend unterschiedlich fiel auch die Einschätzung der Forscher und Entwickler von neuen Fahrzeugkonzepten und Vertretern der Autoindustrie aus, weil von unterschiedlichen Voraussetzungen ausgegangen wurde.

Die Sicherheitsanforderungen haben sich in den letzten Jahren stetig erhöht. Nicht nur für die Fahrzeuginsassen wurden Verbesserungen erzielt, sondern auch der Fussgängerschutz hat an Bedeutung gewonnen. Gerade in diesem Bereich bietet der Kunststoff Vorteile. Als Monitoringfaktor sollte man Resultate von Crashtests berücksichtigen.

7.5.3 Übrige Faktoren

Produktionsprozesse und Flexibilisierung der Produktion

Dass die bestehenden Produktionsstrukturen und das firmeninterne Know-how eine wichtige Rolle spielen, zeigte sich bei der Produktion des Renault Espace. Als dieser noch durch die Firma Matra, die auf Kunststoffe im Automobilbau spezialisiert ist, gebaut wurde, wies das Fahrzeug einen Space Frame aus Stahl und eine Kunststoffverschalung (SMC) auf. Als Renault die Produktion dieses Modells wieder selber übernahm, wurde der grösste Teil der Aussenhaut wieder aus Stahlblech gefertigt. Nach Aussage eines Interviewpartners ist dies auch auf die Produktionsstruktur bei Renault zurückzuführen, die nicht auf SMC ausgerichtet ist. Auch im Projekt Modultec (vgl. Kapitel 7.3.3) wurde die Erfahrung gemacht, dass die teilweise Jahrzehnte alte Fahrzeugphilosophie der einzelnen Automobilkonzerne ein grosses Hindernis für die Einführung neuer Konzepte darstellen kann [Horlacher et al. 2003].

In bestehenden Produktionsstrukturen ist viel Kapital gebunden, das nur langfristig amortisiert werden kann. Neue Produktionsprozesse haben es daher schwer, umgesetzt zu werden. Der Kunststoff-Leichtbau, der den Trend zur Modularisierung aufnimmt und verstärkt, ist darauf angewiesen, dass bestehende Strukturen durchbrochen werden, wenn sein Anteil am gesamten Auto deutlich erhöht werden soll. Dies beginnt bereits in den Entwicklungsabteilungen der OEM, die bis anhin weitgehend nach einzelnen Bauteilen und nicht nach funktionsintegrierten Modulen organisiert sind. Auch die Produktionsprozesse müssen an die neue Modulbauweise angepasst werden. In zahlreichen Artikeln

und in den geführten Interviews wurde der Trend zur Verlagerung der Produktion von den OEM zu den Zulieferern betont. Dies begünstigt den Modulbau, da die externe Produktion im Extremfall dazu führt, dass die Einzelteile, oder eben Module, bei den OEM angeliefert werden und das Auto werksintern zusammengesetzt wird.

Angesichts der wachsenden Modellvielfalt und der immer kürzeren Entwicklungszeiten in der Branche sind die Entwicklungsabteilungen bei den Automobilherstellern und Zulieferern bis an die Grenzen gefordert. Mit immer neuen Komfortfunktionen und technischen Innovationen in den Fahrzeugen wagen die Automobilhersteller einen schwierigen Spagat zwischen Markendifferenzierung und den hohen Erwartungen ihrer Kunden nach einer dauerhaften Zuverlässigkeit der Produkte. Die wachsende technische und organisatorische Komplexität entpuppt sich hierbei als eine der größten Hürden, wie eine grossangelegte Studie aus Deutschland zeigt. „Das optimale Management aller beteiligten Partner in der komplexen Entwicklungsprozesskette zählt zu einer der größten Herausforderungen, der sich die Unternehmen der Branche heute gegenüber sehen“, verdeutlicht ein Mitglied der Geschäftsleitung bei PROMIND und Mitautor der Studie, die schwierige Situation. So wundert es nicht, dass sowohl Automobilhersteller wie auch Zulieferer den dringendsten Handlungsbedarf in Themenkomplexen sehen wie Projektmanagement oder den Prozessabläufen in der Automobilentwicklung. Aber auch Themen wie Mitarbeiter-Orientierung und der Umgang mit Wissen sowie Kooperation und Kommunikation haben hohen Handlungsbedarf, nachdem die Unternehmen immer enger in Netzwerken zusammen arbeiten [Bullinger et al. 2004].

Der Kunststoff-Leichtbau bietet durch die grosse Designfreiheit viele Möglichkeiten für individualisierte Automodelle. So lassen sich beispielsweise mit kleinen Anpassungen bei den Werkzeugen kostengünstig mehrere Varianten des gleichen Bauteils produzieren. Auch die Wettbewerbsfähigkeit bei kleinen Stückzahlen ist ein Vorteil.

Die heutigen Produktionsprozesse in der Autoindustrie können den Modulbau und damit den Kunststoff-Leichtbau nur begrenzt integrieren, da die Produktionsabläufe stark segmentiert sind und ein Auto aus unzähligen Einzelteilen zusammengebaut wird. Der Trend zur Modularisierung ist jedoch stark. Es ist damit zu rechnen, allerdings in einem langfristigen Prozess, dass die Zahl der Bauteile pro Auto deutlich reduziert und die Produktionsprozesse schrittweise angepasst werden. Die Modularisierung ist zentral für die Durchsetzung des Kunststoff-Leichtbaus im umfassenden Ausmass und sollte daher weiter unter Beobachtung stehen.

Information und Vernetzung der Akteure

Es bestehen zahlreiche Verbände und Organisationen der Kunststoffindustrie, deren Kerngeschäft Kunststoff-Leichtbau, faserverstärkte Kunststoffe und Automobil-Leichtbau ist. Die Fachverbände sind national und international organisiert und werden getragen von den zahlreichen Unternehmungen der Kunststoffbranche und der Autoindustrie. Der Zugang zu technischen Informationen ist auf breiter Ebene gewährleistet durch Handbücher und technische Beschriebe. Alle grösseren Organisationen führen regelmässig Tagungen und Konferenzen durch, die sich mit praktischen Anwendungen im Kunststoff-Leichtbau im Automobilbau beschäftigen. Verschiedene Forschungsinstitute an Universitäten und technischen Hochschulen (auch an der ETHZ) beschäftigen sich mit Leichtbau und führen Lehrveranstaltungen durch. Nach Einschätzung der EU sind die Forschungsergebnisse der letzten Jahre für alle interessierten Kreise verfügbar und es besteht kein Informationsdefizit [EU-Projekt ATLAS]. Auf Ebene der konkreten Entwicklungen neuer Verfahren, Anwendungen und Fahrzeugmodelle und konzepte werden die Informationen von den einzelnen Unternehmungen jedoch bestens gehütet. Dies zeigte sich auch bei den Interviews mit den Vertretern der Autoindustrie, wo es oft schwierig war, auch auf allgemein gehaltene Fragen Auskunft zu bekommen.

Der hohe Organisationsgrad der Akteure und der intensive Informationsaustausch sind wichtig für die Diffusion einer neuen Technologie. Das grosse Interesse der Industrie am Automobil-Leichtbau in Kunststoff lässt auf ein hohes Einsatzpotenzial und einen bereits fortgeschrittenen Stand der Technologie schliessen. Die allgemeinen Informationen zu Anwendungen sind leicht erhältlich, detaillierte Forschungsergebnisse sind jedoch meist firmenspezifisch und daher streng geheim. Als Monitoringfaktor ist die Vernetzung der Akteure wenig relevant, weil die Strukturen gefestigt sind und die Durchsetzung der Technologie bereits unterstützen. In Zukunft wird sich daran wohl nichts Entscheidendes ändern.

Marktakzeptanz

In den Interviews und in der Literatur tauchte immer wieder das Argument der mangelnden Akzeptanz von energieeffizienten Fahrzeugkonzepten seitens der KonsumentInnen auf [z.B. EU-Projekt ATLAS]. Konkrete Nachweise, dass Kundinnen und Kunden solchen Neuerungen kritisch gegenüber stehen, sind jedoch schwer zu finden. Eher scheint dies eine Befürchtung der Autoindustrie zu sein, die das Risiko scheut, unter hohen Kosten etwas Neues anzubieten. Es ist schwer abzuschätzen, ob neue Fahrzeugkonzepte von den KonsumentInnen akzeptiert werden, bevor sie tatsächlich auf dem Markt sind. Allerdings kann der Kunststoffanteil auch mit bestehenden Konzepten, die der Kundschaft bereits bekannt sind, noch erhöht werden.

Die Frage der Marktakzeptanz von neuen Fahrzeugkonzepten seitens der AutofahrerInnen kann durch diese Untersuchung nicht schlüssig beantwortet werden. Dazu wären weitere Untersuchungen notwendig.

Know-how

Die Forschung im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe ist in der Auto- und Kunststoffindustrie intensiv und auch universitäre Einrichtungen beteiligen sich daran. Ein breiter Kreis von Anwendern und Entwicklern ist auf dem neusten Stand der Forschung. Dennoch sind nicht alle OEM und Kunststoffhersteller im gleichen Ausmass aktiv in der Entwicklung neuer Materialien und Verfahren und insbesondere die Anwendung im Autobau ist sehr unterschiedlich. Ein kritischer Punkt im Anschluss an den Entwicklungsprozess in den Labors ist die Umsetzung der Neuerungen im Produktionsprozess. Neben den hohen Kosten der Neuinvestitionen in Anlagen, die bereits erwähnt wurden, kann das auf Stahlbau und herkömmliche Produktionsstrassen ausgerichtete Know-how ein Hemmnis für den Schritt vom Labor in die Produktion sein. Dazu kommt, dass die Alltagsbedingungen im Produktionsprozess nicht die gleichen sind wie jene in der Entwicklungsabteilung, wo neue Verfahren in elektronischer Simulation oder in Pilotanlagen getestet wurden.

Die Verbreitung der Technologie in den letzten Jahren wurde von einem breiten Kreis mit fundiertem Know-how begleitet. Die Wissens-Diffusion war kein Problem, das die Entwicklung der Technologie verhinderte. Sicher wird sich der Stand der Technik weiterentwickeln und das Know-how entsprechend vergrössern. Der Stand der Technik kann jedoch besser anhand der technischen Faktoren beobachtet werden. Zudem ist die Erfassung des Know-hows schwierig und nicht isoliert beobachtbar. Daher eignet sich dieser Punkt weniger für ein Monitoring.

Forschung

Es wird intensiv am Einsatz von faserverstärktem Kunststoff im Automobilbau geforscht und nach Aussagen der befragten Fachleute aus der Autoindustrie und der Autozulieferindustrie werden in den nächsten Jahren bedeutende Fortschritte im Bereich Prozesssicherheit, Automatisierung und Crashesicherheit gemacht werden. Allerdings wird Kunststoff auch in Zukunft in starker Konkurrenz zu anderen Werkstoffen stehen. Neben High-tech Materialien wie Magnesium gehören dazu auch Aluminium und nach wie vor Stahl. So könnte beispielsweise der Stahltank im Zusammenhang mit dem Einsatz von Kohlenwasserstoffen eine Renaissance erleben, da dieser bzgl. Gasdurchlässigkeit dem Kunststofftank weit überlegen ist. Die Forschung im Bereich Stahl konzentriert sich auch auf die Gewichtsreduktion. So gelang es einem Forschungsteam in Deutschland, einen Edeltank herzustellen, der 20% leichter ist als ein Kunststofftank [von Hohental 2004].

Der Wettbewerb der Materialien ist intensiv und Fortschritte in einem Bereich werden rasch relativiert, wenn der Wettbewerbsvorteil "dahinschmilzt", weil die Konkurrenz dieselbe Fragestellung auch gelöst hat - nur mit einem anderen Material und womöglich noch günstiger. So schätzen beispielsweise Aluminiumproduzenten, dass Alu-Bauteile 50% leichter sein müssen als Stahlteile, um in einer Life-Cycle-Betrachtung wirtschaftlich zu sein. Wenn nun bei Stahlanwendungen Gewichtsreduktionen möglich werden, muss die Aluindustrie entweder den Gewichtsvorteil wieder wettmachen oder ihre Kosten deutlich senken.

Die Rolle der Automobilindustrie als Technologietreiberin wird von Industrievertretern unterschiedlich beurteilt. Mehrmals wurde die Wichtigkeit der Flugzeugindustrie in der Entwicklung neuer Materialien betont: die meisten faserverstärkten Kunststoffe stammen ursprünglich aus diesem Bereich. Ein Unternehmen aus der Kunststoffindustrie nannte aber auch die Autoindustrie als Treiber technologischer Entwicklungen, insbesondere wenn es an die Anpassung teurer High-tech-Verfahren an die industrielle Grossserienfertigung geht [High Tech Plastics 2003]. Unbestritten ist die Wichtigkeit der Kunststoffindustrie und der Zulieferer der Autoindustrie. Auf der offiziellen Website der EU wird diese als führend in der Entwicklung neuer Materialien bezeichnet. Die grossen Materialanbieter verfügen über eigene Forschungsinstitutionen und pflegen eine intensive Zusammenarbeit mit Universitäten. Teilweise werden diese Forschungsk Kooperationen auch durch die Autoindustrie finanziell und materiell unterstützt [EU-Projekt ATLAS].

Die Forschung ist ein zentraler Aspekt zur Durchsetzung einer Technologie. Zentral werden in den nächsten Jahren Forschungsarbeiten in den Bereichen Prozesssicherheit, industrielle Fertigung in Grossserien und Recycling sein. Diese Arbeiten sollten weiter verfolgt werden, falls das Monitoring fortgesetzt wird.

Gesetzliche Rahmenbedingungen und Normen

Durch gesetzliche Rahmenbedingungen können Technologien gefördert oder ihr Einsatz behindert werden. In der EU - und in der Schweiz - bestehen keine gesetzlichen Rahmenbedingungen, die den Leichtbau im Automobilbau explizit unterstützen. In Vereinbarungen wurden zwar freiwillige Ziele zur Erhöhung der Energieeffizienz in der EU und in der Schweiz festgelegt, auf welche Weise diese Ziele erreicht werden sollen, wurde jedoch offen gelassen [EU-Projekt ATLAS, Blessing et al. 2003]. Die EU-Altauto-Richtlinie wurde verschiedentlich als Hemmnis für den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe im Automobilbau bezeichnet (vgl. 7.2.4).

Die Vorschriften zur Verwendung bestimmter Kunststoffe (z.B. PVC) scheinen kein bedeutendes Hemmnis zu sein, da die Palette der Kunststoffe sehr umfangreich ist, und auf relativ unbedenkliche Stoffe ausgewichen werden kann. Allerdings konnte in dieser Untersuchung kein umfassendes Bild gewonnen werden über das enorm grosse Feld der Kunststoffsorten und ihrer Umweltwirkungen. Verschiedentlich tauchte der Hinweis auf, dass auch aus Umweltsicht problematische Kunststoffe

eingesetzt werden, deren Verwendung jedoch durch die Umweltgesetzgebung nicht eingeschränkt wird. Problematisch wird dies, wenn der Kunststoffanteil steigt und das Recycling ungenügend ist.

Die Entwicklung der gesetzlichen Rahmenbedingungen (international und in der Schweiz) sollte im Auge behalten werden, insbesondere die evt. mögliche Anpassung der EU-Altauto-Richtlinie.

7.5.4 Wirtschaftlichkeit

Neue Technologien haben vor allem dann gute Chancen sich rasch durchzusetzen, wenn sie eine Senkung der Produktionskosten erlauben. Das Zerlegen der Fahrzeugkarosserie in einzelne Module trägt wesentlich zum Erreichen dieses Ziels bei. Der Einsatz langfaserverstärkter Kunststoffe auch für tragende Elemente erleichtert eine solche modulare Bauweise. Auch die Werkzeugkosten können durch Modulbauweise deutlich gesenkt werden. Kunststoffmodule bieten die Möglichkeit Arbeitsgänge zusammenzufassen, was zu Zeitersparnis führt. Die Teile können einzeln und dezentral produziert und anschliessend "just in time" zusammengesetzt werden. Auch dies kommt den heutigen wirtschaftlichen Anforderungen sehr entgegen.

Heute sind jedoch die Kosten der faserverstärkten Kunststoffe meist noch höher als jene von Konkurrenzmaterialien, was sie vorwiegend im Hochpreissegment wirtschaftlich macht, wo die Designfreiheit und die Reduktion des Gewichts besonders hoch gewichtet werden. In den unteren und mittleren Preisklassen ist der Kostendruck hoch und Gewichtsreduktionen können weniger teuer erkaufte werden.

Die Kosten der faserverstärkten Bauteile und Module werden durch folgende Aspekte bestimmt:

- Rohmaterialpreis
- Vorbereitungszeit
- Fertigungszeit Bauteil
- Einbauzeit (Systemintegration)
- Werkzeuge
- Produktionsabfälle/Ausschuss/Prozessbeherrschung
- Oberflächenqualität/Lackierbarkeit

Der bedeutendste Kostenfaktor ist die Vorbereitungs- und Fertigungszeit der faserverstärkten Kunststoffe. Im hoch automatisierten Produktionsprozess sind Einsparungen im Sekundenbereich relevant. In diesem Punkt können in den nächsten Jahren bedeutende Einsparungen erfolgen. Die Werkzeugkosten sind insbesondere für Nischenprodukte im Vergleich zu den Investitionen im Stahlbau relativ günstig. Auch durch die Verbesserung der Prozessbeherrschung und die Reduktion von Ausschuss-Bauteilen kann ein bedeutendes Kostensparpotenzial erschlossen werden. Bei der Entwicklung des Einsatzes von kohlefaserverstärkten Kunststoffen spielt der Rohstoffpreis eine bedeutende Rolle; heute sind diese qualitativ hoch stehenden Materialien sehr teuer. Sollen sie auf breiter Ebene eingesetzt werden, so müssen die Kosten in diesem Bereich gesenkt werden.

Die oben genannten Faktoren konnten in diesem Projekt für die einzelnen Verfahren und Anwendungen nicht quantifiziert werden. Die Kosten und Aufwendungen variieren je nach Bauteil, Automodell, Material und Verfahren, was eine allgemeingültige Aussage erschwert. Zudem waren von den Herstellern keine Kostendaten erhältlich, was eine direkte Beobachtung der Kosten verunmöglicht. Die Wirtschaftlichkeit von Verfahren und Anwendungen kann indirekt beobachtet werden an der Anzahl Bauteile, die in Grossserien eingesetzt werden.

7.6 Fazit

Es scheint unwahrscheinlich, dass sich der Anteil der faserverstärkten Kunststoffe im Automobilbau kurzfristig, d.h. innert zwei bis drei Jahren, deutlich erhöht. Die Marktdurchdringung braucht ihre Zeit, da die Entwicklungs- und Produktionsprozesse in der Autoindustrie sich nicht kurzfristig verändern lassen. Bestehende Automodelle können nicht von heute auf morgen angepasst werden. Innert fünf bis zehn Jahren, mit genügend Zeit für Anpassungen an den Modellen und für die Umstellung des Produktionsprozesses, sollte sich dieses Potenzial aber realisieren lassen. Dies wird auch durch die Aussagen der Interviewpartner gestützt, die den faserverstärkten Kunststoffen eine wichtige Stellung beimessen. Mit den **bestehenden Fahrzeugkonzepten** sollte die Erreichung eines Anteils der faserverstärkten Kunststoffe am Gesamtgewicht von 20% möglich sein. Ob dieser Marktanteil tatsächlich realisiert werden kann, hängt in erster Linie von der Entwicklung der Kosten der faserverstärkten Kunststoffe, der Akzeptanz der Autoindustrie, der Entwicklung der Konkurrenzmaterialien und der Lösung der Recyclingfrage ab. In der Automobilindustrie haben Verfahren und Materialien nur eine Chance in Grossserien eingesetzt zu werden, wenn sie dem intensiven Kostenwettbewerb standhalten. Folgende Aspekte hemmen den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe:

- Die **Umstellung von Produktionsprozessen** ist teuer, da die Investitionen für Produktionsstrassen sehr hoch sind. Die langen Amortisationszeiten der laufenden Anlagen verhindern eine zügige Umsetzung neuer Konzepte. Die **Akzeptanz der Autoindustrie** für neue Produktionsweisen (beispielsweise neue Lackiersysteme) ist stark abhängig von den Möglichkeiten, diese in die bestehenden Produktionsprozesse zu integrieren.
- Es existieren noch einige **technische Probleme**, die gelöst werden müssen, um eine Serienproduktion für den Massenmarkt zu garantieren. Viele der Verfahren, insbesondere für strukturtragende Elemente, sind zuwenig automatisiert und weisen noch zu lange **Taktzeiten** oder lange Vor- und Nachbereitungszeiten auf. Teilweise ist der Oberflächenfinish ungenügend und das Colour-Matching dezentral produzierter Teile ist schwierig.
- Die **Beherrschung der Produktionsprozesse** ist heute teilweise ungenügend und die Systemintegration muss verbessert werden. Dadurch können Ausschüsse und Produktionsabfälle minimiert werden. Forschungsprojekte, insbesondere zur Entwicklung serientauglicher und systemintegrierter Produkte, haben daher einen wichtigen Stellenwert. Die Forschung welt- und europaweit ist intensiv und die Qualität der Produkte (Lebensdauer, Crashesicherheit), die Systemintegration und Produktionsprozesse werden laufend verbessert. Eine britische Untersuchung stellte fest, dass die Anwendung der neuen Materialien in Deutschland und in der Schweiz um einiges weiter fortgeschritten ist, als in Grossbritannien [vgl. auch Faraday Advance 2003].
- Die **Recyclingfrage** muss gelöst werden. Soll der Kunststoffanteil deutlich erhöht werden, so müssen wirtschaftliche und effiziente Recyclingprozesse entwickelt werden. Andernfalls kann die geforderte Recyclingquote der EU von 85% resp. 95% ab 2015 nicht eingehalten werden.

Zahlreiche Aspekte sprechen jedoch für den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe im Automobil-Leichtbau. Neben der deutlichen Gewichtsreduktion gehören dazu folgende Punkte:

- Die Kunststoffe verfügen über grosse **Designfreiheit**, was die Herstellung komplexer Teile mit engen Radien ermöglicht.
- Es können **Module** produziert werden, die mehrere Funktionen in sich vereinen und dadurch die benötigte Anzahl Bauteile reduzieren. Dadurch verkürzt sich auch die Produktionszeit.
- Es können **mehrere Arbeitsschritte im gleichen Arbeitsgang** erledigt werden, was die Produktionszeit verkürzt.
- Die Werkzeuge sind meist günstiger als in der Stahlproduktion und können relativ einfach angepasst werden und ermöglichen dadurch die **kostengünstige Flexibilisierung** des Produktionsprozesses. Dies kommt dem heutigen Trend zur Individualisierung entgegen.

- Der Lackierprozess ist ein zentraler und kostenintensiver Vorgang im Produktionsprozess. Die Kunststoffindustrie kann durch gänzlich **neue Lackiersysteme** zu Kosteneinsparungen beitragen.
- Crashtests haben gezeigt, dass faserverstärkte Kunststoffe den heutigen **Sicherheitsanforderungen** entsprechen.

Soll der faserverstärkte Kunststoffanteil an Personenwagen auf deutlich mehr als 20% steigen, so müssen **neue Fahrzeugkonzepte** für den Massenmarkt entwickelt und umgesetzt werden. Diese Konzepte werden Leichtbau mit neuen Antriebskonzepten kombinieren. Es bestehen bereits heute einige Konzepte, die eine vollständige Kunststoffkarosserie aufweisen, allerdings sind diese Fahrzeuge noch nicht serienreif. Auch die neuen Konzepte "leiden" noch unter denselben, bereits genannten Problemen wie der Leichtbau in konventionellen Fahrzeugkonzepten. Zusätzlich erschwert jedoch das grosse finanzielle Risiko für die Automobilindustrie die Aufnahme der Serienproduktion eines Kunststoff-Modulbaufahrzeuges. Niemand kann mit Sicherheit voraussagen, ob der Produktionsprozess tatsächlich wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein wird oder ob der Markt ein solches Fahrzeug akzeptieren wird. Die Serienproduktion eines neuen Modulbaukonzepts kann nicht in einer bestehenden Produktionsstrasse abgewickelt werden, sondern bedingt den Aufbau eines gänzlich neuen Produktionskonzepts, was mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Eine Möglichkeit, den Übergang zu neuen Konzepten zu erleichtern, ist die Modulbauweise, die einen Space Frame aus Stahl oder Aluminium einsetzt. Dadurch können bereits bestehende Produktionskapazitäten in den OEM genutzt werden. Die besten Chancen haben neue Modulbaukonzepte bei Unternehmungen, die im Aufbau begriffen sind, wie beispielsweise in Asien oder Osteuropa. Dort muss keine Rücksicht genommen werden auf bestehende Produktions- und Unternehmungsstrukturen.

Die vorliegende Untersuchung zeigt deutlich, dass das Potenzial des Kunststoff-Leichtbaus im Automobilbau sehr gross ist und bedeutende Treibstoffeinsparungen erzielt werden können. Die Entwicklung des faserverstärkten Kunststoffeinsatzes in den letzten Jahren verlief positiv. Es sind zwar noch einige technische Schwierigkeiten zu bewältigen, um die Serienproduktion für den Massenmarkt im grossen Stil zu ermöglichen. Die Forschung zur Verbesserung der Verfahren und Entwicklung neuer Anwendungen läuft jedoch intensiv und sowohl die Kunststoffindustrie als auch die Autoproduzenten wenden grosse Summen dafür auf. Faserverstärkte Kunststoffe werden in grösserem Ausmass heute meist bei teuren Autos eingesetzt. Der Einsatz bei diesen Autos beweist, dass die Materialien eine sehr hohe Qualität aufweisen und in Kleinserien produziert werden können. Im Zentrum der Aktivitäten steht die Perfektionierung der Verfahren für die wettbewerbsfähige Serienproduktion im Massenmarkt. Wenn dies gelingt, kann sich der Leichtbau auf breiter Ebene durchsetzen.

Konsequenzen für die Energiepolitik

Eine weitere Beobachtung der Marktentwicklung der faserverstärkten Kunststoffe im Automobilbau ist sinnvoll, da das Potenzial zur Gewichtsreduktion und damit zur Reduktion der CO₂-Emissionen sehr gross ist. Die umfassende Durchsetzung der Technologie in der Grossserienproduktion, eine zentrale Forderung zur Realisierung des bedeutenden Energiesparpotenzials, scheint aber heute noch nicht gesichert. Statt einer quantitativen Erfassung von Markt- und Technikdaten sollte sich das Monitoring auf die allgemeine Marktentwicklung und die Lösung der technischen Herausforderungen zur automatisierten Serienproduktion konzentrieren. Die hier erarbeiteten Grundlagen können dazu dienen, ein zukünftiges Monitoring auf die zentralen Punkte zu fokussieren.

Die schweizerische Energiepolitik kann die Strategien der ausländischen Autoproduzenten nicht beeinflussen. Allenfalls kann die Förderung von Entwicklungen der schweizerischen Zulieferindustrie den Einsatz neuartiger Materialien und Konzepte im Automobil-Leichtbau indirekt unterstützen. Ein weiteres Monitoring macht nur Sinn, wenn die öffentliche Hand für sich einen Handlungsspielraum zur Beeinflussung der zukünftigen Entwicklung identifizieren kann. Im Automobil-Leichtbau ist eine Förderung der Durchsetzung der Technologie mit folgenden Ansatzpunkten denkbar:

- **Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten** mit Fokus auf den wettbewerbsfähigen, automatisierten Einsatz faserverstärkter Kunststoffe in Grossserien. Hier stehen insbesondere die langfaserverstärkten Kunststoffe im Zentrum des Interesses, die auch für strukturtragende Teile eingesetzt werden können. Dadurch kann das heutige Anwendungsgebiet der Kunststoffe massgeblich erweitert werden. Die eigentliche technische Machbarkeit wurde mit der Herstellung verschiedener Concept Cars bereits bewiesen. Soll sich der faserverstärkte Kunststoff in Grossserien in grösserem Umfang durchsetzen, so müssen wettbewerbsfähige Produktionsprozesse entwickelt werden. Auch für das Recyclingproblem muss eine wettbewerbsfähige Lösung gefunden werden.
- Die **Energieetikette für Personenwagen** unterstützt die vom UVEK mit auto-schweiz unterzeichnete Vereinbarung, welche eine Absenkung des mittleren Treibstoffverbrauchs neuer Personenwagen um durchschnittlich 3% pro Jahr von 8,4 l im Jahre 2000 auf 6,4 l pro 100 km im Jahre 2008 vorsieht. Sie unterteilt die Personenwagen in Gewichtsklassen und beurteilt innerhalb dieser Klassen die Fahrzeuge nach den Effizienzklassen A bis G. A steht für ein energieeffizientes, G für ein vergleichsweise ineffizientes Fahrzeug. Die Energieetikette erhöht beim Kauf eines Personenwagens die Transparenz und erleichtert so die Wahl beim Autokauf. Da das Fahrzeuggewicht in die Formel zur Berechnung der Effizienz eines Fahrzeugs einbezogen wird, wird ein Automodell, das leichter wird und deshalb weniger Treibstoff verbraucht dennoch nicht als effizienter beurteilt. Es sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, wie die Etikette Gewichtsreduktionen honorieren kann. Evt. wäre es möglich, für die Einteilung in Fahrzeugklassen statt des Gewichts die Grösse, den Verwendungszweck, die "Komfortklasse" oder andere relevante Kriterien zu verwenden.
- Der Bund kann seine **Vorbildfunktion** wahrnehmen, indem er bei der Beschaffung bundeseigener Fahrzeuge darauf achtet, dass möglichst leichte und energieeffiziente Fahrzeuge ausgewählt werden.
- Mit **Information und Kommunikation** kann der Vorteil eines geringeren Gewichts den Konsumentinnen und Konsumenten bekannt gemacht werden. Dadurch kann der Nachfragedruck auf die Autoindustrie erhöht werden, das Gewicht der Fahrzeuge zu reduzieren.

8 Konsequenzen für die Energiepolitik

8.1 Übersicht Technologien/Technologiefelder

In Technologie-Monitoring I und II werden die folgenden Technologien bzw. Technologiefelder untersucht:

Technologie-Monitoring I: 4 Einzeltechnologien

- **Motorische Wärmekraftkopplung:** BHKW von 100kW_{el} bzw. 400 kW_{el}, mit Erdgas bzw. Dieselantrieb
- **Brennstoffzellen:** Hochtemperaturzellen SOFC mit 1 kW_{el}, Niedertemperaturzellen PEM mit 4,6 kW_{el}
- **Elektrische Luft/Wasser Wärmepumpen:** Mittlerer Wärmeleistungsbedarf 7,5 kW
- **Hochleistungs-Wärmedämmung (HLWD):** Gegenüber Mineralwolle-Innendämmung

Technologie-Monitoring II: 2 Einzeltechnologien, 2 Technologiefelder

- **Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohnhäuser (Komfortlüftung):** Neubau Mehrfamilienhaus und MFH-Sanierung jeweils mit 8 Wohnungen. Dezentrales Konzept, Aggregat im Korridor, getrennte Zu- und Abluftleitungen, die in Steigzone geführt werden.
Referenz: Gebäude ohne Komfortlüftung, beim Neubau mit Abluftanlage in Küche und Bad.
- **Drehzahlvariable Elektroantriebe:** Pumpenantrieb mit 2, 11 und 55 kW elektrischer Leistung, 3-phasiger Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer, 400 V.
- **Membrantechnik (Technologiefeld):** Markt- und Potenzialstudie, druckgetriebene Verfahren sowie Pervaporation und Dampfpermeation, Anwendungen in der Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie sowie Wasseraufbereitung und -reinigung.
- **Leichtbautechnologie bei Fahrzeugen (Technologiefeld):** Markt- und Potenzialstudie, unverstärkte und faserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau, funktionelle Integration verschiedener Bauteile zu Modulen, Chancen neuer Fahrzeugkonzepte.

Während bei den Einzeltechnologien die Technologieentwicklung und die Kosten- bzw. Preisentwicklung für typische Anwendungsbeispiele verfolgt wird, geht es bei den beiden untersuchten Technologiefeldern um eine Bestandsaufnahme der technologischen Entwicklungstrends in den jeweiligen Technologiefeldern. Die treibenden und hemmenden Faktoren und Voraussetzungen sowie die Perspektiven des jeweiligen Technologiepfades stehen dabei im Zentrum der Untersuchung. Die Definition typischer Fallbeispiele ist bei den untersuchten Technologiefeldern zum Teil nicht machbar oder wenig sinnvoll. Deshalb können auch nicht Kosten- bzw. Preisentwicklungen, Wirkungsgrade oder Lernkurven für bestimmte Anwendungen dargestellt werden. Im Vordergrund steht vielmehr die Analyse der für die Entwicklung relevanten Einflussfaktoren und des Potenzials, das in diesen Technologiefeldern steckt. Bei der vielfältigen Membrantechnik ist ein Vergleich mit konventionellen Trenn- und Konzentrationsverfahren und deren Energieverbrauch grundsätzlich denkbar. Die zahlreichen technologischen Varianten und die stark unterschiedlichen Anwendungsbereiche der Membrantechnik sowie unterschiedlichste Referenzverfahren und Auslegungen von Anlagen verunmöglichen ein Rechnen mit Durchschnittswerten. Dennoch werden exemplarisch Resultate bereits durchgeführter Fallstudien präsentiert. Die Kunststoff-Leichtbautechnologie im Fahrzeugbau ermöglicht neue Fahrzeugkonzepte und neuartige Produktions- und Montageverfahren, die sich nicht direkt mit den herkömmlichen vergleichen lassen. Diese können sehr kostenrelevant sein und gleichzeitig auch noch eine Reduktion des Fahrzeuggewichtes ermöglichen, was hier eigentlich als Voraussetzung für Treibstoffverbrauchssenkungen im Vordergrund steht.

Bei den in Technologie-Monitoring I untersuchten Technologien stand die Erfassung der vergangenen und die Perspektive der künftigen Entwicklung von Investitionskosten, Wartungskosten, Betriebs- und Nebenkosten, Energiegestehungskosten, Nutzungsgraden, Nutzungs- bzw. Lebensdauern im Vordergrund und konnte mit einer einheitlichen Methodik vorgenommen werden. Bei den in Technologie-Monitoring II untersuchten Technologien und Technologiefeldern werden weitere für die Technologie- und Markt- bzw. Absatzentwicklung relevante Faktoren erfasst, wie Transaktionskosten, Rahmenbedingungen, Innovations- und Markthemmnisse sowie Möglichkeiten diese zu vermindern, woraus zum Teil Empfehlungen für die Energiepolitik abgeleitet werden.

8.2 Erkenntnisse für die Energie-, Technologie- und Innovationspolitik

Unterstützung der Technologieentwicklung in der frühen Innovationsphase der Lebenszykluskurve:

Die mehrjährige Förderung der Pioniere von Modultech durch das BFE hat die erfolgsversprechende Entwicklung von Fahrzeug-Leichtbau-Konzepten und Forschungs- und Entwicklungspartnerschaften in der Schweiz unterstützt, welche ein industriepolitisches Potenzial aufweisen und zu Innovationen in der europäischen Automobilindustrie führen können. Das Absatzpotenzial und damit die energetische Wirkung im Fahrzeugbereich sind sehr gross (grosse Serien, grosse Massen). Das gilt aber auch für das Entwicklungsrisiko angesichts der äusserst restriktiven Bedingungen für die Umsetzung von Innovationen im Grossserien-Fahrzeugbau. In Zukunft dürften die Weiterentwicklung potenter Partnerschaften mit Einbezug der Automobilindustrie und der erfolgreiche Zugang als innovative Zulieferanten zu den Entwicklungsabteilungen der Automobilindustrie für den Erfolg der hier aktiven Schweizer Unternehmungen zentral sein. Forschungs- und technologiepolitisch interessant ist die Tatsache, dass es zur Zeit noch unklar ist, welcher Technologiepfad sich im Fahrzeugbau durchsetzen wird und wieweit es faserverstärkte Kunststoff-Module sein werden, welche die Autos der Zukunft prägen werden. Auch die Alternativen mit Stahl, Aluminium, Magnesium oder - am wahrscheinlichsten - mit einem Materialmix werden zur Zeit weiterentwickelt. Dies gibt auch einen Hinweis auf die Risiken der Technologieförderung, der Zuteilung von Forschungsmitteln wie auch der involvierten innovativen Unternehmungen, insbesondere in der Inventions- und Innovationsphase des Technologielebenszyklus, wenn es noch ziemlich unklar ist, welcher Technologiepfad ein nachhaltiges Potenzial und am meisten Erfolgchancen bietet.

Diese Risikoüberlegungen gelten in ähnlichem oder gar noch in verstärktem Ausmass bei der Brennstoffzellentechnologie und bei der Hochleistungswärmedämmung (HLWD), welche am Anfang der Lebenszykluskurve stehen. Bei den Brennstoffzellen, welche in der Schweiz zurzeit primär mit öffentlichen Mitteln (PEM-Zellen am PSI) bzw. mit privaten Mitteln (SOFC-Zellen von Sulzer-Hexis) entwickelt werden, ist noch unklar, welche Zellentypen sich für welche Anwendungen durchsetzen werden. Bei der HLWD bestehen zwar erste Produkte. Ihre (technisch-funktionelle) Lebensdauer ist jedoch noch ungewiss und die Integration in Bau- oder Fassadenelemente, welche für die Vermeidung von Installationsschäden zentral sein dürfte, steht noch aus.

Mit dem Technologie-Monitoring können wertvolle Informationen für die Forschungs- und Industriepolitik zur Entwicklung der jeweiligen Technologiepfade und ihrer konkurrierenden Pfade zur Verfügung gestellt werden. Die Förderung von Basis-Innovationen ist notwendigerweise riskant, das Schicksal des unterstützten Technologiepfades oft relativ ungewiss. Technologie-Monitoring kann das Controlling des Einsatzes von öffentlichen Forschungsmitteln in diesen Bereichen unterstützen und nach einer Klärung konkurrierender Entwicklungspfade das Risiko einer Fehlallokation von Forschungsmitteln verringern und die Entscheidungen zwischen konkurrierenden Projekten erleichtern. Allerdings ist das Technologie-Monitoring in diesen Fällen (insbesondere beim Monitoring von Technologiefeldern) in der Durchführung aufwendiger und weniger standardisierbar als das Monitoring definierter Anwendungen einer Technologie, welche die Phase der Basisinnovationen durchlaufen hat und bei der der Technologiepfad absehbar ist.

Energiepolitische Ziele in der Schweiz und Technologie- bzw. Innovationsförderung

Seit ca. 20 Jahren werden in der Schweiz in grösserem Umfang Mittel für neue Energietechnologien und erneuerbare Energien eingesetzt. Ziel dieses Mitteleinsatzes ist die Reduktion des Verbrauchs endlicher Energieressourcen und die Verringerung der sich dabei ergebende Emission schädlicher Stoffe. Dies wird nur in einem nennenswerten Umfang gelingen, wenn sich solche neuen Technologien und erneuerbare Energien am Markt gegen die konventionellen Versorgungsstrukturen durchsetzen können. Auf breiter Basis wird nur gekauft, was genügend Nutzen stiftet (sei es in Form eines monetären Nutzens oder eines Zusatznutzens für den eine entsprechende Zahlungsbereitschaft besteht) und was von den Planern und Unternehmungen auch aktiv angeboten wird.

Bisher hat kaum eine Diskussion darüber stattgefunden, ob und welche Markterfolge durch die Energiepolitik der letzten 20 Jahre ermöglicht wurden. Zielvorgaben zum angestrebten Einsatz neuer Energietechnologien fehlen weitgehend, weshalb eine Einschätzung der Effektivität der Energieforschung sowie der Energiepolitik schwer fällt. Mit dem Technologie-Monitoring können hier wichtige Grundlagen bereitgestellt werden, indem die Entwicklung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit von neuen Technologien dokumentiert wird.

Bei den hier untersuchten Technologien im Gebäudebereich besteht ein relevantes inländisches Absatz- und Energieeffizienz- bzw. -produktionspotenzial, das allenfalls durch Exporte ausgebaut werden kann. Für die äusserst energierelevante Leichtbautechnologie und die Brennstoffzellen geht es jedoch primär bis ausschliesslich um den europäischen bzw. globalen Absatzmarkt. Die Schweiz hat beispielsweise keine eigene Automobilindustrie, sie hat jedoch gewichtige und innovative Zulieferanten zur europäischen Automobilindustrie. Ihre Innovationen werden in diesem Bereich grösstenteils 'exportiert', haben jedoch bei der Leichtbautechnologie in den importierten Fahrzeugen eine relevante energetische Wirkung auch in der Schweiz (bei der Membrantechnik ist dagegen das schweizerische Energiespar-Potenzial begrenzt). Falls bedeutendere energiepolitische Mittel eingesetzt werden, kann und soll das Technologie-Monitoring Informationen über die energetische Relevanz der eingesetzten Mittel vermitteln, d.h. ob die Mittel primär zur allgemeinen Innovationsförderung dienen, eher zur Exportförderung bzw. zur Standortpolitik oder primär zur Förderung von Energietechnologien mit energetischen Auswirkungen im Inland.

Monitoring von Markt- und Diffusionsdaten zur Ergänzung der wirtschaftlichen und technologischen Monitoringfaktoren

Die Erweiterung des Monitoringspektrums in Technologie-Monitoring II trägt der Tatsache Rechnung, dass für den breiten Technologieeinsatz neben den technisch-wirtschaftlichen Charakteristika einer Technologie oft die Vermarktung bis zum Endabnehmer eine zentrale Rolle spielt. Sie ist von der Entwicklung einer Technologie und den bereits realisierten Lerneffekten abhängig. Stichworte dazu sind: Entwicklung von Technologie-, Kosten-, Installations-, etc. -Standards, Existenz von Richtlinien, Benchmarks, Good Practice-Anleitungen, Qualitätsstandards, Branchenorganisationen, die die Know-how-Diffusion fördern und die Qualitätsentwicklung vorantreiben, etc. Diese Faktoren reduzieren die Komplexität und die Risiken von Technologieentscheiden, senken die Transaktionskosten und tragen mit der Produkteentwicklung sowie mit von Skalen- und Verbundeffekten getriebenen Kostenreduktionen zur Marktentwicklung der jeweiligen Technologien bei.

8.3 Energieforschung und -förderung

Energieforschung und -förderung sind für die einzelnen Technologien unterschiedlich zu gewichten

Neue Energietechnologien und erneuerbare Energien sind am Beginn ihres Entwicklungszyklus zwangsläufig teurer als bereits vorhandene konventionelle Technologien. Das Technologie-Monitoring kann aufgrund der erwarteten künftigen Entwicklung die Mehrkosten bestimmen, die sich bis zum Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle aufkumulieren. Diese Markteintrittskosten hängen im Wesentlichen ab:

- Vom aktuellen Stand der Mehrkosten gegenüber der marktüblichen Technologie
- Von den bisher abgesetzten Stückzahlen
- Von der künftigen Entwicklung der Mehrkosten und der Stückzahlen. Vorausgesetzt die Kosten der marktüblichen Technologie bleiben weitgehend konstant, so wird die künftige Entwicklung von Mehrkosten und Stückzahlen durch den Kostendegressionsfaktor ausreichend beschrieben.

Die Markteintrittskosten einer Technologie können durch die Industrie (z.B. als Vorinvestition in Form von Entwicklungskosten), durch die Endkunden (z.B. als Mehrkosten, welche von Pionierkunden getragen werden) oder durch staatliche Forschungs- und Förderbeiträge finanziert werden. Je geringer die Markteintrittskosten einer Technologie sind, desto grösser ist die Chance, dass diese finanziert werden und der Marktdurchbruch erreicht werden kann.

Für eine bestimmte Technologie sind die aktuellen Mehrkosten und die bisherigen Stückzahlen bekannt. Die künftige Entwicklung hängt damit im Wesentlichen vom Kostendegressionsfaktor ab, welcher in Zukunft erreicht wird. Technologieabhängig können sich somit unterschiedliche Schlussfolgerungen für die Technologie- bzw. die Innovationsförderung ergeben:

- Hohe Kostendegressionseffekte sind in der Regel nur möglich, wenn sich Skaleneffekte (durch eine Erhöhung der Produktionsmengen) und Lerneffekte (durch technologische Fortschritte) ergänzen. So sind bedeutende technologische Fortschritte beispielsweise bei den Brennstoffzellen eine zwingende Voraussetzung, um die Markteintrittskosten auf ein Niveau zu senken, das einen erfolgreichen Markteintritt ermöglicht. Ohne erfolgversprechende Ansätze im Bereich Forschung und Entwicklung und die notwendigen Mittel, um die entsprechenden Potenziale zu erschliessen, erscheint der Marktdurchbruch nicht realistisch. Das Monitoring liefert der Energiepolitik somit wichtige Hinweise dafür, ob für eine bestimmte Technologie primär Forschung und Entwicklung oder Marktförderung sinnvoll ist.
- Bei Technologien mit einem geringen Potenzial für technologische Fortschritte muss es gelingen, die Mehrkosten durch Skaleneffekte zu eliminieren. Dies führt in der Regel nur dann zu vertretbaren Markteintrittskosten, wenn die Mehrkosten und die bisherigen Stückzahlen relativ gering sind. Nur wo dies gegeben ist, erscheint auch eine Technologie-Förderung durch Subventionen oder Know-how-Diffusion erfolgversprechend. Sie ermöglicht es, die Stückzahlen schneller zu erhöhen und somit die Skaleneffekte rascher zu nutzen.
- Hohe Markteintrittskosten können die Möglichkeiten der Schweizerischen Energiepolitik rasch übersteigen. Wo dies der Fall ist, macht eine Schweizerische Technologieförderung nur dann Sinn, wenn auch auf internationaler Ebene entsprechende Anstrengungen unternommen werden.

Das Technologie-Monitoring kann somit wichtige Hinweise liefern, wie die Bereiche Forschung/Entwicklung und breite Förderung aufeinander abzustimmen sind, damit mit den begrenzten Mitteln eine optimale Wirkung erzielt werden kann. Es ist offensichtlich, dass diese Abstimmung für jede Technologie speziell erfolgen muss. Diese Informationen könnten erhebliche Bedeutung in der schweizerischen Energiepolitik erhalten. Zum Beispiel macht eine mengenunbeschränkte Festlegung von kostendeckenden Einspeisetarifen für Elektrizität aus neuen erneuerbaren Energien, wie sie mit dem aktuellen Entwurf des Bundesgesetzes über die Stromversorgung vorgesehen ist, wenig Sinn, wenn eine Technologie noch sehr hohe Markteintrittskosten aufweist, welche primär mit Forschung und Entwicklung (Lerneffekten) abzubauen wäre.

Aus dem Monitoring ergeben sich Bedürfnisse an die Energieforschung

Das Technologie-Monitoring liefert Hinweise, welche Fortschritte für den Durchbruch einer Technologie erreicht werden müssen. Daraus ergeben sich die spezifischen Bedürfnisse der einzelnen Technologien an die Energieforschung. Da sich das Monitoring primär für Technologien eignet, welche bereits am Markt verfügbar sind, dürften diese Bedürfnisse eher die anwendungsorientierte Forschung wie die Grundlagenforschung betreffen.

Die Industrie wird primär in Bereichen mit hohem Potenzial und geringem Forschungsrisiko aus eigenem Antrieb forschen. Das Forschungsrisiko ist primär ganz zu Beginn des Lebenszyklus einer innovativen Technologie gross, wenn die künftigen Marktchancen noch sehr schwer zu beurteilen sind. Wie z.B. das Kapitel Kunststoffleichtbau im Automobilbereich zeigt, können hier durch öffentliche Förderung entscheidende Impulse gesetzt werden. Wichtig bleibt aber, dass von Beginn weg die Zusammenarbeit mit Industriepartnern gesucht wird, welche bereit sind positive Ergebnisse aus eigenem Antrieb weiter zu verfolgen.

Die Erfolgchancen einzelner Forschungsansätze kann mit dem Monitoring im Vorherein nicht beurteilt werden. Jedoch kann mit dem Monitoring bei längerfristigen Vorhaben im Sinne einer Erfolgskontrolle überprüft werden, ob die Fortschritte auch im notwendigen Umfang erzielt werden.

Neben den eigentlichen Energieeffizienz- und -produktionstechnologien bestehen weitere Technologien bzw. Technologiefelder mit hoher Energierelevanz:

Bei energetischen Effizienz- und Produktionstechnologien (WKK, Brennstoffzellen, HLWD, WP, Elektroantriebe) ist der Bezug zur Energiepolitik und -forschung direkt und offensichtlich, die Hauptnutzen sind energetischer Art. Bereits bei Lüftungssystemen für Niedrigenergie-Wohnhäuser stellt sich die Frage, ob diese eine energetische oder eine Wohnkomfortmassnahme darstellen und bei der Membrantechnologie sind bei den in der Schweiz relevanten Anwendungen die Energieeinsparungen auch eher Co-Benefits zu den Hauptnutzen höherer Prozess- und Produktqualität sowie neuer Produkte. Bei der Leichtbautechnologie gilt das am ausgeprägtesten. Leichtbautechnologie wird dann eingesetzt, wenn grössere Designfreiheit, bessere Modularisierung, mehr Flexibilität in der rigiden Grossserienproduktion, bessere Materialeigenschaften, weniger Gewicht für besseres Fahrzeughandling etc. realisierbar sind. Dass tieferes Gewicht und evtl. ein geringerer Luftwiderstand energetisch äusserst relevant sind, ist zurzeit eher ein Co-Benefit. Diese Betrachtungsweise erweitert den Fokus von Energieforschung und -politik beträchtlich. Die Grenzen zwischen Wirtschaftspolitik, Innovations-/Technologiepolitik und Energiepolitik verwischen sich und es stellen sich Zuordnungs- bzw. Abgrenzungsfragen. Aufgabe des Technologie-Monitorings ist, in den erwähnten Fällen, die innovationstreibenden oder hemmenden Faktoren zu identifizieren und zu verfolgen sowie den Bezug zu den energiepolitischen Zielen und Wirkungen herzustellen. Diese Informationen dienen der Industrie-, der Forschungs- wie auch der Energiepolitik.

8.4 Nutzen des Technologiemonitorings

Nutzen für die Energiepolitik

Primär ist das Technologie-Monitoring ein Führungsinstrument für die Energiepolitik. Es hilft einerseits, für die untersuchten Technologien die Chancen und Risiken in Bezug auf den angestrebten Marktdurchbruch zu identifizieren, so dass die beschränkten Mittel gezielter auf erfolgsversprechende Technologien konzentriert werden können. Andererseits ist Technologiemonitoring ein notwendiges Instrument einer effektivitätsorientierten Energieforschung und Energiepolitik. Effektivitätsorientierte Energieforschung definiert in den verschiedenen Forschungsbereichen (möglichst quantitative) Ziele, deren Erreichungsgrad mit Technologiemonitoring überprüft wird, wobei gleichzeitig wertvolle Informationen zur Einschätzung der Effektivität sowie der Hemmnisse und Probleme der Forschungsförderung erfasst werden. Das Monitoring bildet damit eine Grundlage für das Controlling der eingesetzten Mittel für Energieforschung und Marktförderung.

Für die einzelnen energiepolitischen Massnahmen liefert das Technologie-Monitoring Entscheidungsgrundlagen und neue Ansatzpunkte (vgl. z.B. die Bemerkungen zur Energie-Etikette bei Fahrzeugen). Es schafft Zusatznutzen für die Innovations- und Technologiepolitik. Die Rationalität dieser Politikbereiche wird erhöht.

Bei sachgerechter Kommunikation erhöht das Technologie-Monitoring die Markttransparenz und fördert die Technologiediffusion und die Marktentwicklung. Es liefert Grundlagen für die Kommunikation energiepolitischer und -technischer Trends sowie für die Erfolge der Energiepolitik.

Für die Erarbeitung von Energieperspektiven, -modellen und für Evaluationen stellt das Technologie-Monitoring Grundlagen bereit.

Die für das Technologie-Monitoring vorgenommenen Analysen haben eine Vielzahl von Hemmnissen aber auch von Erfolgsfaktoren für energierelevante Technologien identifiziert und aufgezeigt. Viele dieser **Problem- und Hemmnisbereiche** sind grundsätzlich bekannt, werden aber hinsichtlich ihrer Bedeutung für die jeweils untersuchten Technologien thematisiert. So erschweren unter anderem die folgenden Faktoren den Erfolg von energetischen Massnahmen und Innovationen:

- **Sunk cost-Problematik:** Grosse und kostspielige Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsinfrastrukturen und -institutionen reduzieren die Perzeption und Adaption von Innovationen und erschweren auch aus wirtschaftlichen Gründen (sunk cost) die Anpassung von Produkten sowie von Produktionsprozessen. So stellt die Spezialisierung von Forschungs- und Entwicklungslabors in der Automobilindustrie ein institutionelles Hemmnis für den Einsatz der Leichtbautechnologie dar, welche thematisch den Verbund traditioneller Forschungseinheiten erfordern würde. Dasselbe gilt bei grossen Investitionen in Produktionsanlagen (wie beispielsweise die Lackierereien in der Automobilindustrie), welche Innovationen, die andere Produktionsinfrastrukturen benötigen, behindern.
- **Transaktionskosten** (Informationsbeschaffung, Evaluation, Planung, Installations- und Einführungskosten, etc.) können gerade bei neueren innovativen Technologien einen relevanten Teil der Gesamtkosten erreichen. Sie reduzieren die Vorteile innovativer Lösungen und wirken sich negativ auf ihre Wirtschaftlichkeit aus. Die Identifikation von Transaktionskosten spielt daher in Technologie-Monitoring II eine wesentliche Rolle. Daraus ergeben sich Ansatzpunkte für die Energie- und Technologiepolitik, welche für die Technologiediffusion und Marktentwicklung sehr bedeutsam sein können. Die zeitliche Entwicklung der Transaktionskosten im Rahmen eines Technologie-Monitorings ist ein guter Indikator für die Veränderung der Position einer Technologie auf der Technologie-Lebenskurve.

- **Know-how-Defizite und geringe Markttransparenz** verstärken die Neigung zu herkömmlichen Technologien, Produktionsverfahren und Produkten. Komplexitätsreduktion und verringerte Informations- und Risikokosten durch die Bildung von Forschungs- und Interessennetzwerken, durch Standardisierung, Qualitätssicherung, Richtlinien, Kennzahlen und Benchmarkentwicklung etc. sind u.U. entscheidende Faktoren für die Diffusion und den Markterfolg innovativer Technologien. Das Ausmass solcher Bestrebungen gibt wiederum einen Hinweis auf den Entwicklungsstand einer Technologie. Im Technologie-Monitoring sollten diese Faktoren daher qualitativ miterfasst werden.
- **Ungünstige, nicht bereinigte Marktstrukturen** (zu viele Klein- oder Nischenanbieter oder zu wenig Wettbewerb) können die Realisierung von Skalen- und Verbundeffekten verhindern und dadurch die Technologieentwicklung verzögern. Sie sind ein Hinweis auf unklare Perspektiven eines Technologiepfades bzw. auf Handlungsbedarf bei Vorliegen spezifischer Hemmnisse und weisen dadurch Relevanz für die Energie- und Innovationspolitik auf. Mit dem Technologie-Monitoring sind daher die Entwicklung der Markt- und Anbieterverhältnisse mit zu erfassen.

Eine wichtige Aufgabe des Technologie-Monitorings besteht darin, derartige Hemmnisse zu identifizieren, ihre Entwicklung zuhanden der Energie- und Forschungspolitik zu verfolgen und damit Ansatzpunkte für die Politik aufzuzeigen.

Im Technologie-Monitoring werden aber auch zusätzliche, nichtenergetische **Erfolgsfaktoren** herausgearbeitet (Co-Benefits, Qualitätsverbesserungen etc.), welche den Technologieeinsatz unterstützen.

Technologie-Monitoring erhöht die Markttransparenz: Die Markttransparenz bei den für das Technologie-Monitoring interessierenden Technologien ist in der Regel bei neuen Technologien oder Technologiefeldern noch gering, was die Forschungs- und Förderpolitik erschwert. Mit einem wie oben ausgeführten erweiterten Technologie-Monitoring kann mehr Transparenz hergestellt werden. Dabei können Beurteilungskriterien, Problemanalysen und Ansatzpunkte für energiepolitische Massnahmen sowie für die Forschungspolitik generiert werden. Gut kommuniziertes Technologie-Monitoring, das die Markttransparenz erhöht, liefert einen Input für die Marktentwicklung und die schnellere Technologiediffusion.

8.5 Künftige Gestaltung des Technologiemonitorings

Das Technologie-Monitoring I umfasst Energieeffizienz- und -produktionstechnologien mit definierten Anwendungen deren Entwicklung und Perspektiven untersucht werden. Das Technologie-Monitoring II ist eine zweifache Erweiterung des Monitorings:

- Zusätzlich zu den relativ engen technisch-wirtschaftlichen Monitoringfaktoren von Technologie-Monitoring I werden weitere entwicklungsrelevante Einflussfaktoren ins Monitoring einbezogen (Transaktionskosten, Hemmnisse, Markt- und Anbieterstruktur und Organisation, Standardisierung, etc.).
- Neben Energieeffizienz- und -produktionstechnologien primär im Gebäudebereich werden mit der Modul- und der Membrantechnologie zwei Technologiefelder ausserhalb des Gebäudebereichs untersucht, bei denen der Energieeinsatz bzw. der Energieverbrauch nicht im Vordergrund steht, die aber beide sehr energierelevante Auswirkungen haben können.

Für den Entscheid über die künftige Ausgestaltung des Technologie-Monitorings stellen sich neben der Frage nach dem Nutzen (siehe vorangehendes Kapitel) die folgenden Fragen:

- Technologien/Technologiefelder, die dem Monitoring zweckmässigerweise unterworfen werden?
- Ausgestaltungsmöglichkeiten von Technologie-Monitoring als Grundlage der Energie-, Forschungs- und Innovationspolitik?

Welche Technologien sollen erfasst werden?

- Wir plädieren für eine Beschränkung des Technologie-Monitorings auf diejenigen Technologien, die für die schweizerische Energiepolitik von hoher Bedeutung sind sowie auf diejenigen Technologien, die mit bedeutenden Mitteln aus dem Energiebereich (F+E, Förderbeiträge) gefördert werden (dabei würde sicher die Membrantechnologie nicht mehr weiterverfolgt, aber auch bei der Leichtbautechnologie stellt sich die Frage, ob und in welcher Form sie zweckmässigerweise weitergeführt werden sollte).
- Für die Energiepolitik dürften dabei die Lehren aus den Entwicklungen der Vergangenheit zusammen mit Angaben über die künftigen Perspektiven einzelner Technologien im Vordergrund stehen.
- Bei der Forschungspolitik wird es eher darum gehen, mehr Informationen zur Entwicklung und zu den Perspektiven geförderter Technologien bzw. Technologiepfade zu erhalten, um zusätzliche Grundlagen für das Controlling des (riskanten) Mitteleinsatzes zu gewinnen.

Technologie-Monitoring als Daueraufgabe?

Wir schlagen vor, das Technologie-Monitoring als periodisch wahrgenommene Aufgabe zu etablieren. Dabei sollte sich das Monitoring auf Technologien mit klar definierten Anwendungen beschränken, welche gleichzeitig für die Energiepolitik von hoher Bedeutung sind, weil sie grosse finanzielle Mittel binden oder binden sollen.

Das so verstandene Technologie-Monitoring sollte folgende Teile umfassen:

- Mit bescheidenem Zusatzaufwand jährlich im Rahmen der Statistik (erneuerbare Energien, WKK) die wesentlichen wirtschaftlichen Parameter der bereits untersuchten Technologien erheben und mitpublizieren.
- Noch nicht untersuchte für die schweizerische Energiepolitik aber bedeutungsvolle Technologien einem Monitoring unterziehen.
- Alle 5 Jahre die Entwicklung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der bisher untersuchten Technologien aufdatieren und die Veränderungen im Bereich der Hemmnisse und Erfolgsfaktoren festhalten.
- Die Aufdatierung von bereits umfassend aufbereiteten Technologien soll mit begrenztem Aufwand vorgenommen werden. Zuerst sollten die für die Aufdatierung relevanten Monitoringfaktoren pro Technologie bestimmt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Qualität des Monitorings und die Generierung der 'Technologiegeschichten' sichergestellt sind.
- Im Sinne einer Beschränkung schlagen wir vor, die im Monitoring bearbeiteten Technologien schwergewichtig nach ihrer Bedeutung für die schweizerische Energiepolitik auszuwählen sowie nach dem Ausmass der Förderung, die sie für Forschung oder durch Förderprogramme erhalten.
- Bei der periodischen Aufdatierung sollte jeweils überprüft werden, ob neue Technologien aufzugreifen und grundsätzlich aufzuarbeiten sind (gehört ebenfalls zu den in diesem Zeitpunkt zweckmässigen Relevanzüberlegungen).
- Neue Technologiefelder Technologien, die nicht primär Gegenstand der Energiepolitik sind (d.h. nicht durch energetische Fördermassnahmen oder energiepolitische Regelungen beeinflusst werden), sollten nicht im energetischen Technologie-Monitoring bearbeitet werden, sondern allenfalls von der Innovations- Forschungs- oder Technologiepolitik.

9 Literaturverzeichnis

- Austin, Thomas C.; Dulla Robert G.; Carlson, Thomas R.: Alternative and Future Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Road Vehicles, prepared for the transportation table subgroup on road vehicle technology and fuels, Sierra Research, Inc., Sacramento CA, 1999.
- Basics 2000: Perspektiven des Energieverbrauchs in der Industrie, Modelldokumentation zuhanden des BFE, Zürich, 30. März 2000.
- Basics: Perspektiven der Energienachfrage der Industrie für die Szenarien I bis III, 1990 - 2030, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bern, 1996.
- Blessing,R; Burgener, A.: 8. Berichterstattung im Rahmen der Energieverordnung über die Absenkung des spezifischen Treibstoff-Normverbrauchs von Personenwagen 2003, im Auftrag des UVEK, auto-schweiz, Bern 2004.
- Bullinger, Hans-Jörg et al. (Hrsg.): Automobilentwicklung in Deutschland: Wie sicher in die Zukunft? Fraunhofer Institut Arbeitswirtschaft und Organisation, Promind GmbH, München 2004.
- Bundesamt für Energie: Schweizerische Gesamtenergiestatistik, Bern, 2002.
- Composites World: Industry overview, <http://www.compositesworld.com/sb/ov-introduction>, 2004.
- De Almeida, Fonseca, Ferreira, et.al., ISR - University of Coimbra, im Auftrag der EU-Kommission, Generaldirektion Energie und Transport, Improving the Penetration of Energy - Efficient Motors and Drives, 2000
- De Almeida, Fonseca, Ferreira, et.al., ISR - University of Coimbra, im Auftrag der EU-Kommission, Generaldirektion Energie und Transport, Variable Speed Drives for Electric Motor Systems, 2000
- De Cicco, John: It's not (just) technology, it's the market (stupid!), Consumer information for promoting greener cars, American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington 2000.
- Dögl, März, Querschnittstechnologie Leistungselektronik, Institut für Technik & Marktstrategien, Nürnberg, Fraunhofer IISB, 2004
- EATC-News: Pressemitteilung vom September 2003, www.eatc-online.org/EATC-News.html, 2003.
- ECMT European Conference of ministers of transport: Monitoring of CO2 Emissions from new cars, Council of Ministers, CEMT/CM (2003)10, Brussels, 27. März 2003.
- eco**ncept, Ott W., Steiner P., 'Wirtschaftlichkeit nachhaltiger energetischer Massnahmen im Gebäudebereich', im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich 2002
- eco**ncept, FHBB, Ott W., Binz A., Seiler B. Moosmann A., 'Neubauen statt Sanieren?', im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern/Zürich,März 2002
- eco**ncept, CEPE, Ott W., Jakob M., Baur M., 'Zusatznutzen bei energieeffizienten Neubauten', im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Programm EWG), mit Beteiligung des Bundesamtes für Wohnungswesen, Bern,Zürich, erscheint im Frühjahr 2005
- Eicher, Ott, Rigassi: Technologie-Monitoring, Schlussbericht, im Auftrag des Bundesamts für Energie, 2003.

- Engelhardt N.: Membranbelebungsverfahren - eine beherrschbare und erfolgreiche Technik - Erfahrungen nach vierjährigem Betrieb, in: Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Institut für Verfahrenstechnik ivt, Aachen, 2003.
- EU-Altautorichtlinie: Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge, (http://europa.eu.int/eur-lex/pri/de/oj/dat/2000/l_269/l_26920001021de00340042.pdf), Brüssel 2000.
- EU-Kommission, Generaldirektion Energie und Transport, Das europäische Motor Challenge Programm, Modul Antriebe, 2003
- EU-Projekt ATLAS: vgl. http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/html/vehicledes.html (Teilbereich Verkehr; Leichtbau, 1996/97)
- European Alliance for SMC: SMC/BMC: Design for Success, Frankfurt a.M., 2001.
- Faraday Advance: Trends in Hybrid Metallic, Polymer and Composite Automotive Structures, findings from a UK technology mission to Germany and Switzerland, Oxford 2003.
- Friedl, Christa: EU macht es dem Pkw-Leichtbau künftig schwer, VDI Nachrichten, S.5, 13.10.2000.
- Friedrich, Axel: Das Auto der Zukunft, Power Point Präsentation, Umweltbundesamt UBA, Berlin.
- Harbers, Fons: Advances in SMC/BMC automotive applications, European Alliance for SMC, Society of Automotive Engineers Inc., 2002.
- High Tech Plastics: Geschäftsbericht 2003, Marktwachstum, www.htp.at/html/gb_2003/marktwachstum.html, 2003.
- Horlacher M. Et al., MODULTEC – Modultechnologie für Leichtmobile, im Auftrag des BFE / EnergieSchweiz, März 2003
- Huber - HTA Luzern, Komfortlüftung - Projektierung von einfachen Lüftungsanlagen im Wohnbereich, erschienen im Faktor Verlag, 2004
- IEA: Experience Curves for Energy Technology Policy, 2000
- Jakob, Jochem, Christen, Stocker (CEPE/HBT), Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, September 2002
- Jochem, Eberhard et. al.: Steps towards a 2000 Watt-Society, Developing a White Paper on Research and Development of Energy.Efficient Technologies, Pre-study, Novatlantis, Dezember 2002.
- Jungmann, Thomas: Intelligenter Leichtbau auf Bayrisch, www.all4engineers.de , 2004b.
- Jungmann, Thomas: Konzeptioneller Leichtbau aus Wolfsburg, www.all4engineers.de , 2004a.
- Jungmann, Thomas: Neuer Kunststoff für lackierte Karosserieteile, www.all4engineers.de, 2004c
- Kost, Robert: Progress Report for Automotive Lightweighting Materials, U.S. Department of Energy, Washington 2003.
- Köth, Claus Peter: Gefangen in alten Konzepten, in: Automobil Industrie, 7-8/2004, S.34-39, Vogel Auto Medien, Würzburg 2004.

- Maier, Anja; Wehner, Joachim; Meyr, Wolfgang: Kunststoffleichtbau am Beispiel der neuen 6er Baureihe. In: Kunststoffe im Automobilbau, VDI, Düsseldorf 2004.
- Morovic, T.; Jaeckel, G.; Jochem, E.: Programmstudie Rationelle Energieverwendung in Industrie und Kleinverbrauch, Teil II, Rationelle Energienutzung bei thermischen Trennverfahren in der Flüssigphase, Abschlussbericht für den Bundesminister für Forschung und Technologie, Forschungsvorhaben 032 8800 A, Karlsruhe 1991.
- Müller, Peters, et.al., IPSO Dübendorf, Akzeptanz von Komfortlüftungen im Wohnungsbereich, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Mai 2001
- Müller-Wondorf, Rolf: Automobilhersteller setzen zunehmend auf den "Multimaterialmix" Produktion: Sättigungstendenzen und der härter werdende Wettbewerb mit Metallen bremsen den Zuwachs der Kunststoffanwendungen in neuen Kfz-Modellen, VDI-Nachrichten, S.17, 22.03.2002.
- Ostertag - Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, No-regret Potentials in energy Conservation, 2002
- ÖWAW-Regelblatt 406: Begriffe der Membrantechnologie, Wasser Abfall Regelwerk, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, 2002.
- Paschek, Laurin: Mattes; Outsourcing bringt Zulieferern Wachstumsschub von 42%, www.all4engineers.de, 2004a.
- Schäper, Siegfried: "EU bestraft den Leichtbau"; Standpunkt: Die EU-Altautoverordnung macht es dem Leichtbau beim Automobil künftig besonders schwer, VDI-Nachrichten, S.2, 12.10.2000.
- Schaub, Martin: Rohstoffliches Recycling am Beispiel der RESH-Verwertung mit dem RESHMENT Prozess, Referat an der Tagung "Stoffliches Recycling in der Schweiz - sind die Grenzen erreicht?" der ISWA vom 11. 04.2002.
- Schmidt, Silke; Handels, Bert: Ecobalance von SMC Teilen, Vergleich von Kraftfahrzeug-Heckdeckeln aus Stahl, Aluminium und SMC, European Alliance for SMC, 2004.
- Schuh, Thomas: Innovative Ultra Light SMC Technologies, Referat 4th Automotive Seminar - New Challenges in Automotive, Bremen 10.-11.2.2004.
- Shell: Shell Pkw-Szenarien bis 2030, Flexibilität bestimmt Motorisierung, Shell Deutschland Oil External Affairs Central Europe, Hamburg 2004.
- Sommer, Michael: Thermosets; Combating the challenges of price and recyclability, Plastics in Automotive Exteriors Conference, Frankfurt, 22.-23. 1. 2003.
- Sotoudeh, Mahshid; Mihalyi, Bettina; Stifter, Rainer; Siegele, Bernhard: Bewertung des Durchsetzungspotenzials und der Wirtschaftlichkeit vorsorgender Umwelttechnologien, zwei Fallbeispiele, Institut für Technikfolgenabschätzung der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2000.
- Soufflet, B.; Recouvreur M.: Class A SMC Body Parts for Avantime: Technical Challenges, Referat an der SMC-Alliance-Tagung in Bad Nauheim 2001.
- Stevenson, T.: Membrane technology for wastewater treatment and reuse - state of the art and future perspective, in: Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, ivt 2003.

Symalit AG: Innovative GMT Applications for the Japanese automotive industry, European Applications (Folienpräsentation), 2003.

Tschachtli Christian: Leichtbau dynamisiert den Luxus, in Automobilrevue 38/2002.

University of Calabria: A report on membrane activities in Europe, Prepared by the working party on membranes of the European federation of chemical engineering and the European society on membrane science and technology, Department of Chemistry, Chemical Engineering Section, University of Calabria, Arcavacata di Rende, 1992.

van Asselt, Willem; van Damme, Peter; Oelgarth, Arndt: European Alliance for Thermoplastic Composites, Paper discussed and confirmed on the 1st EATC Meeting, Frankfurt 2000.

Vollrath, K.: Methodenmix sorgt für mehr automobilen Leichtbau, VDI-Nachrichten, 4.6.2004.

Von Hohental, Moritz-York: Stahl gegen Kunststoff, www.all4engineers.de, 2004.

Wenz, Konrad: Kein Tauchgang mehr?, in: Automobil Industrie, 7-8/2004, S.34-39, Vogel Auto Medien, Würzburg 2004.

Wulf, Bernd: Auf der Überholspur; Thermoplastische LFT-Werkstoffe für Unterbodenmodule liefern Vorteile beim Automobilbau, in Kunststofftrends, Darmstadt 01/2004.

Zogg, Markus: Neue Wege zum Recycling von faserverstärkten Kunststoffen, Diss. ETH Nr. 11'946, Zürich 1996.

Anhang

Liste der Interviewpartner:

Drehzahlvariable elektrische Motoren

- Fuji Electric GmbH, Altenrhein, Hr. M. Thalmann
- Siemens Schweiz AG, Zürich, Hr. H. Menzi
- Gloor Engineering, Sufers, Hr. R. Gloor
- Ayrton Energy GmbH, Basel, Hr. S. von Kenel
- Herrmann + Partner, Basel, Hr. M. Herrmann
- Arena, Zürich, Hr. J. Nipkow

Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohngebäude

- Elcotherm AG, Vilters, Hr. I. Diezinger
- Elco Shared Services GmbH, Hechingen (D), Hr. E. Gabrielli
- Zehnder Comfosystems AG, Wädenswil, Hr. R. Matt
- Innoplan, Schöftland, Hr. Th. Scheuzger
- Ingenieurbüro Hanspeter Abbühl, Spiez, Hr. R. Rebmann
- Hochschule für Technik und Architektur, Luzern, Hr. H. Huber
- Minergie Agentur Bau, Bern, Hr. B. Hari
- Amt für Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kt. Zürich, Hr. Ch. Gmür

Membrantechnologie

- Bucher-Guyer Foodtech AG, Niederweningen (Anlagenbau: Mikro- und Ultrafiltration für Lebensmittelindustrie)
- Kühni AG, Allschwil (Anlagenbau: Dampfpermeation/Pervaporation, druckgetriebene Verfahren, Membranextraktion für Wasseraufbereitung, Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie)
- Burger Membrantechnik, Bolligen (Anlagenbau: Druckgetriebene Verfahren für Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie)
- PS Prozesstechnik GmbH, Basel (Anlagenbau: Druckgetriebene Verfahren für Chemie- und Pharmaindustrie, Abwasser-Entsorgung)

- cm-celfa Membrantrenntechnik AG, Schwyz (Membran- und Modulproduzent: Pervaporation und Dampfpermeation für Chemie- und Pharmaindustrie)
- Membratex, Sierre (Anlagenbau: Mikro- und Ultrafiltration für Wasseraufbereitung)
- Ropur, Münchenstein (Anlagenbau: Umkehrosmose und Nanofiltration für Meerwasserentsalzung und Reinstwasseraufbereitung)
- Sulzer Chemtech AG, Winterthur (Membran- und Modulproduktion und Anlagenbau: Pervaporation und Dampfpermeation für Chemie- und Pharmaindustrie)
- Bayer Technology Services, Leverkusen (Anlagenbau und Technologieentwicklung für Chemie- und Pharmaindustrie sowie Biotech-Bereich)
- Institut für Verfahrenstechnik, Aachen, Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik
- Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart

Informationen zu Modellen verschiedener Autohersteller sowie allgemeine Informationen auf dem Internet

www.ch-forschung.ch

(Infos zum Projekt Modultec)

www.germancarfans.com

(diverse Informationen zu deutschen Autos und Leichtbau)

www.volkswagen-umwelt.de

(1-Liter-Auto)

www.sportwagen-hp.de

(Opel Speedster)

http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/html/vehicledes.html

(EU Projekt ATLAS, Teilbereich Verkehr; Leichtbau, 1996/97)

<http://www.korropol.com/verfahren.html>

(Übersicht und Kurzbeschreibung der wichtigsten Verfahren zur Kunststoffformenherstellung)

http://www.shell.com/static/de-de/downloads/2004/24_shell_pkw_studie_2004.pdf

(Shell Pkw-Studie mit Verbrauchsszenarien für Deutschland)

http://www.slb.tu-chemnitz.de/pdf/Kap2_script_oH.pdf

(Vorlesungsscript der Technischen Universität Chemnitz zu "Faserverbundkonstruktion - Kapitel 2 Textile Halbzeuge / Hybridwerkstoffe")

www.autocomposites.org

(website der US-amerikanischen Organisation ACA Automotive Composites Alliance (ACA), eine Handelsvereinigung von 24 Autozulieferer im Kunststoffbereich)

www.classicdriver.de

(v.a. BMW)

www.em-fiberglas.dk

(Infos zum RTM-Verfahren)

www.gernancarfans.com

(website mit unzähligen Infos zu deutschen Autos, u.a. VW (1lt.-Auto), BMW etc.)

www.kern-gmbh.de/index_glossar.html

(Glossar Duomere und Thermoplaste)

www.smc-alliance.com

(website der European SMC Alliance mit 14 Mitgliedsunternehmen)

www.sportwagen-hp.de

(Beschreibung des Opel Speedster mit Alu-Chassis und SMC-Karosserie)

www.stiftung-autorecycling.ch

(Website von Auto Schweiz zum Recycling)

www.waeschle.de

(Thermoplaste)