



11/2006

Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienz-Massnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten

Extended Summary

Autoren:

Martin Jakob, Eberhard Jochem, Andrea Honegger, Center for Energy Policy and Economics, ETHZ

Andreas Baumgartner, Amstein&Walter, Zürich

Urs-Peter Menti, Iwan Plüss, Hochschule für Technik und Architektur HTA, Luzern

Mitarbeit (Beleuchtung)

Stefan Gasser, eTeam, S.A.F.E., Zürich

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, 3003 Bern
ewz-Stromsparfonds der Stadt Zürich (Co-Finanzierung)
Stromspar-Fonds Basel, Amt für Umwelt und Energie, Basel (Co-Finanzierung)
Service Cantonal de l'Energie (ScanE), Genève (Co-Finanzierung)

Auftragnehmer:

Centre for Energy Policy and Economics (CEPE), ETH Zürich, Zürichbergstrasse 18, 8032 Zürich
Amstein + Waltert (A+W), Zürich

Autoren:

Martin Jakob (CEPE – Projektleitung)
Eberhard Jochem, CEPE
Andrea Ott, CEPE
Urs-Peter Menti (A+W / HTA Luzern)
Andreas Baumgartner (A+W)
Stefan Gasser (eTEam)
Iwan Plüss (HTA Luzern)

Begleitgruppe:

C.U. Brunner (CUB)
O. Brückner (Karl Steiner AG)
H.P. Bürgi (Minergie)
Th. Bürki (EnAW)
L. Dolecek (BFE)
A. Eckmanns (BFE, korrespondierendes Mitglied)
R. Meier, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Leitung
L. Gutzwiller, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bundesamt für Energie)
P. Hofer (Prognos)
M. Tresp (CRB)
A. Trier (AWEL, Kt. ZH)
E. Schadegg (Grünberg & Partner), bis Mitte 2004
J. van der Maas (Kanton GE), ab Mitte 2004

Impressum:

Dieser Bericht kann unter www.ewg-bfe.ch bezogen werden.

Inhaltsverzeichnis

Danke.....	6
Résumé succinct	7
Executive Summary	15
Zusammenfassung	23
Ausgangslage, Zielsetzung und methodisches Vorgehen.....	23
Energiebedarf der Gebäudetypen und energetische Wirkung der Massnahmen	24
Gebäudesimulationen für Energie- und Komfortbetrachtungen	27
Kosten- und Nutzenbetrachtung unter Berücksichtigung des Komforts.....	33
Erhebung der technischen Kennwerte und der spezifischen Kosten	40
Schlussfolgerungen und Empfehlungen	41
Empfehlungen für Wirtschaft, Intermediäre, Politik und Verwaltung	42
1 Einführung, Problemstellung und Methodisches Vorgehen.....	45
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	45
1.2 Zielsetzung	46
1.3 Methodisches Vorgehen im Überblick.....	46
1.3.1 Gebäudekategorien	47
1.3.2 Methodischer Ansatz der Grenzkostenberechnung	48
1.3.3 Projektumfang und Abgrenzung	49
2 Abgrenzung, Relevanzanalyse, Referenzfälle und Massnahmenspektrum	51
2.1 Thematische Abgrenzung	51
2.2 Bezug zu Energieperspektiven	52
2.2.1 Energiebezugsflächen	52
2.2.2 Energiekennzahlen am Beispiel des Dienstleistungssektors	53
2.3 Relevanzanalyse: Gebäudekategorien inkl. energiewirtschaftliche Bedeutung	56
2.4 Referenzfälle und Energie-Effizienzmassnahmen.....	59
2.4.1 Bauweise Gebäudeform, Geometrie.....	60
2.4.2 Kennwerte der opaken Gebäudehülle	61
2.4.3 Kennwerte der transparenten Gebäudehülle	62
2.4.4 Beleuchtung.....	63
2.4.5 Sonnenschutz	65
2.4.6 Luftwechsel, Kühlung.....	66
2.4.7 Kälteerzeugung und -verteilung	68
2.4.8 Wärmeerzeugung und -verteilung.....	69
2.4.9 Interne Lasten und EKZ Elektrizität im Ist-Zustand und im Referenzfall.....	70
2.4.10 EKZ Wärme im Ist-Zustand und Referenzfall	71
3 Energie- und Komfortberechnungen.....	73
3.1 Stand der Forschung und Anwendung.....	73
3.1.1 Wärmebedarf der Wirtschaftsbauten	73
3.1.2 Elektrizitätsbedarf der Wirtschaftsbauten	74
3.1.3 Gleichzeitige Modellierung des Wärme- und Strombedarfs für Luftwechsel, Kühlungs- und Beleuchtung bei SIA 0176	74
3.2 Fragestellungen	76
3.2.1 Wärmebedarf in Funktion zunehmenden Wärmeschutzes.....	76
3.2.2 Glasanteil, Glasqualität, Sonnenschutz und Auswirkungen auf Komfort, Wärme und Kühlungsbedarf	76
3.2.3 Kühlung.....	76
3.2.4 Beleuchtung.....	77
3.3 Vorstudie am Beispiel Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975.....	78
3.3.1 Energetischer Vergleich verschiedener Fassaden-U-Werte.....	82
3.3.2 Komfortvergleich verschiedener Fassaden-U-Werte	83

3.3.3	Energetischer Vergleich unterschiedlicher Fenstertypen	84
3.3.4	Komfortvergleich unterschiedlicher Fenstertypen.....	85
3.3.5	Energetischer Vergleich unterschiedlicher Luftwechselkonzepte	87
3.3.6	Erneuerung der Lüftungsverteilung und Effizienz der Ventilatormotoren	94
3.3.7	Fazit der energetischen Berechnungen der Vorstudie für die Bürogebäude	94
3.4	Energetische Berechnungen für konkrete Gebäudetypen und stufenweise weitergehende Energie-Effizienzmassnahmen.....	95
3.4.1	Charakterisierung des thermischen Komforts	97
3.4.2	Gegenüberstellung von Energiebedarf und thermischem Komforts bei Neubauten	100
3.4.3	Energiebedarf und thermischer Komfort im Gebäudebestand	111
3.4.4	Volllaststunden bei der Beleuchtung	123
3.4.5	Sensitivität Fensteröffnung	126
3.4.6	Sensitivität Sonnenschutz Einsatz	130
3.5	Interpretation der Simulationsergebnisse	133
3.5.1	Sonnenschutz und Beleuchtung:	133
3.5.2	Automatische Fensteröffnung	134
3.6	Zusammenfassung und Fazit aus den Gebäudesimulationen für Energie- und Komfortbetrachtungen	134
4	Kostenerhebungen und Beschrieb der Einzelmassnahmen.....	141
4.1	Methodik.....	141
4.2	Marktmechanismen bei der Preisgestaltung	142
4.3	Fassaden.....	143
4.3.1	Neue Gebäude	143
4.3.2	Bestehende Bauten	144
4.4	Fenster und Verglasungen	145
4.4.1	Verglasungen	145
4.4.2	Fenster bei Neubauten und Gebäudeerneuerung	146
4.5	Sonnenschutz	150
4.6	Wärmeerzeugung und -verteilung	152
4.6.1	Investitionskosten der Wärmeerzeugung	152
4.6.2	Betrieb- und Unterhaltskosten der Wärmeerzeugung	155
4.6.3	Wärmeverteilung	155
4.7	Lüftungsanlagen und automatisierte Fensterlüftung	157
4.7.1	Mechanische Lüftungssysteme	158
4.7.2	Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG).....	160
4.7.3	Dezentrale Lüftungsanlagen	162
4.8	Kälteerzeugung und -verteilung.....	162
4.8.1	Zentrale Kälteerzeugung	162
4.8.2	Kälteabgabe.....	167
4.8.3	Dezentrale Kleinklimageräte	167
4.9	Hybride Wärme-, Kälte- und Lüftungssysteme	169
4.10	Beleuchtung	170
4.10.1	Technische Grundlagen und potenzielle Massnahmemöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz.....	172
4.10.2	Laufender Unterhalt.....	176
4.10.3	Sofortmassnahmen	177
4.10.4	Instandsetzung: Leuchtenumbau und Leuchten umrüsten	179
4.10.5	Leuchtensersatz.....	180
4.10.6	Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen: Erhebung von Kosten und technischen Kennwerten im Vergleich.....	184
4.10.7	Detailhandel.....	188
4.11	Betriebsoptimierung (BO).....	189
4.11.1	BO bei der Wärmeerzeugung- und verteilung	189
4.11.2	BO bei der Warmwasseraufbereitung und -verteilung	190
4.11.3	BO bei Kälteerzeugung und -verteilung	192
4.11.4	BO bei Lüftungs- und Klimaanlage	192

4.11.5	BO bei Beleuchtungsanlagen.....	193
4.11.6	Übergreifende Betriebsoptimierung (BO) und Inbetriebnahme.....	193
4.12	Fazit der Kostenerhebungen	194
5	Kosten-Nutzenanalyse und Grenzkostenbetrachtung auf Element- und Anlagenebene.....	195
5.1	Fassaden.....	195
5.1.1	Neubau	195
5.1.2	Bestehende Bauten	196
5.2	Fenster und Verglasungen	198
5.2.1	Verglasungen.....	198
5.2.2	Fenster bei neuen Gebäuden	200
5.2.3	Fenster bei bestehenden Gebäuden	203
5.3	Lüftungsanlagen.....	205
5.3.1	Einbau einer Lüftungslage mit Wärmerückgewinnung	205
5.3.2	Gekoppelte Steigerung der Elektrizitäts- und Wärme-Effizienz bei Lüftungsanlagen im Neubau	206
5.3.3	Gekoppelte Steigerung der Elektrizitäts- und Wärme-Effizienz bei Erneuerungen von Lüftungsanlagen im Gebäudebestand	207
5.3.4	Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage im Gebäudebestand.....	209
5.3.5	Erneuerung von WRG-Anlagen in alten Lüftungsanlagen	211
5.3.6	Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades bei Wärmerückgewinnungsanlagen	212
5.4	Komfortkühlung.....	212
5.4.1	Effizientere Kältemaschinen	212
5.4.2	Kälteerzeugung bei geringerem Temperaturhub oder alternativem Kältemittel	213
5.4.3	Rückkühlung mit Free-Cooling	215
5.4.4	Adiabatische Kühlung der Zuluft	216
5.4.5	Kälteabgabe.....	218
5.4.6	Integrale Planung und Konzeption	219
5.5	Beleuchtung	220
5.5.1	Wirkung von Lichtregelungen bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen.....	220
5.5.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen	223
5.5.3	Detailhandel.....	230
5.6	Wärmeerzeugung.....	232
5.6.1	Neue Gebäude.....	232
5.6.2	Bestehende Bauten	234
6	Kosten-Nutzen auf Gebäudeebene.....	235
6.1	Neubau	235
6.2	Erneuerung des Gebäudebestandes.....	243
6.3	Fazit	252
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	255
7.1	Inhaltliche Schlussfolgerungen.....	255
	Zum Zielkonflikt von Energieeffizienz und Komfort in Wirtschaftsgebäuden.....	255
	Zur Kostenstruktur und den Kosten- und Nutzenbetrachtungen von Energieeffizienzmassnahmen	259
	Zu Marktstrukturen und zum aktuellen Stand der Energie- und Kostenplanung	260
7.2	Methodische Anmerkungen	261
	Grenzen des Grenzkostenansatzes	261
	Grenzen der Modellierung von Energiebedarf und Komfort - Tools für Planer	261
7.3	Empfehlungen an Wirtschaft, Intermediäre, Politik und Verwaltung	262
	Wirtschaft, insbesondere Immobilienwirtschaft und Planer.....	262
	Intermediäre, insbesondere Normengebung, Aus- und berufliche Fortbildung.....	263
	Politik und Verwaltung.....	265
	Forschung und Entwicklung	266

8	Literatur	267
9	Anhang	271
9.1	EKZ als Funktion der Gebäudegrösse	271
9.2	SIA Dokumentation D 0176.....	271
9.3	Modelltechnische Spezifikationen	273
9.3.1	Behaglichkeit	273
9.3.2	Positionierung der Personen innerhalb des Raums.....	273
9.3.3	Luftwechsel.....	274
9.3.4	Zeitlicher Verlauf der Raumbellegung.....	275
9.4	Anhang zum Kapitel 3.3.....	276
9.5	Anhang zum Kapitel 3.4.....	280
9.5.1	Charakterisierung des thermischen Komforts anhand von drei Komfortmassen.....	283
9.5.2	Gegenüberstellung von Energiebedarf und thermischem Komforts	284
9.5.3	Sensitivität Fensteröffnung bei Energiebedarf und thermischem Komfort	296
9.5.4	Sensitivität Sonnenschutz Einsatz	297
9.6	Anhang zum Kapitel 4.....	300
9.6.1	Liste der Daten und Informationen liefernden Unternehmen und Institutionen.....	300
9.6.2	Lichtausbeute verschiedener Lampentypen im Vergleich	301
9.6.3	Erhebungsraster Beleuchtungen.....	303
9.7	Anhang zum Kapitel 5.....	308
9.7.1	Fenster und Verglasungen.....	308
9.7.2	Lüftungsanlagen	310
9.7.3	Komfortkühlung	312
9.7.4	Beleuchtungen.....	313
9.7.5	Wärmeerzeugung	316
9.8	Anhang zum Kapitel 6.....	317
9.8.1	Struktur der Kapitalkosten.....	317
9.8.2	Struktur der Jahreskosten für weitere Fallbeispiele	329
9.8.3	Jahreskosten, EKZ Elektrizität und thermischer Komfort als Funktion der Brennstoff-EKZ335	

Danke

Der vorliegende Bericht wurde ermöglicht durch die externe Finanzierung des BFE, der Kantone BS und GE und des EZW der Stadt Zürich (siehe auch Impressum) sowie durch Eigenmittel von Amstein+Walthert (A+W), der HTA Luzern sowie des CEPE der ETH Zürich. Das Projektteam spricht diesen Institutionen ein grosses Danke aus. Inhaltlich wurde das Projekt insbesondere durch Beiträge von Daten und Informationen zahlreicher Unternehmen und Institutionen ermöglicht (siehe dazu auch die Liste der Daten liefernden Unternehmen, S. 300). Diesen Unternehmen und Institutionen sind wir zu grossem Dank verpflichtet und allen beteiligten Personen sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Ein herzliches Danke geht namentlich an die Damen und Herren Aerne, Bachmann, Baumann, Bebie, Binda, Brückner, Brunner, Bucher, Buchholz, Burger, Camenisch, Canali, Columberg, Dittrich, Frank, Gasser, Gertsch, Ch. Gmür, H. Gmür, Gubler, Haefliger, Hegi, Heiz, Heusser, Hoch, Hofstetter, Hubacher, Jeangros, Joerg, Kaeslin, Kaufmann, Keel, Kegel, Kissel, Koch, Koller, Lenzlinger, Lüdi, Ménard, Mettler, Meyer, Michel, Mom, Moor, Mühlheim, W. Pluess, Prochaska, Rammelt, Rhyner, Ruosch, Schierz, Schmitz, Schönbächler, Schüller, Seifert, Simmler, Sokolean, Sollberger, Stahel, Stähli, Steinemann, Strasser, Sueess, Trösch, Vogt, Volpe, Wellig, Wenger, Widmann, Widmer, Wittlin und Zimmermann.

Sehr wertvoll waren auch die Inputs und Diskussionsbeiträge der Begleitgruppe; auch ihren Mitgliedern sei an dieser Stelle nochmals herzlich gedankt. Last but not least dankt die Projektleitung dem Projektteam herzlich für sein Engagement und seine Kompetenz, namentlich Andrea Honegger-Ott, Andreas Baumgartner, Stefan Gasser, Eberhard Jochem, Urs-Peter Menti und Iwan Plüss, sowie seinen Kollegen B. Aebischer, A. Altenburger, U. Flückiger, R. Mielebacher, B. Schrader, J. Staufer, R., D. Tschudy, R. Uetz, R. Schmitz, G. Zweifel.

Résumé succinct

Le projet vise à mettre à jour empiriquement la connaissance des coûts des mesures prises en faveur de l'efficacité énergétique dans les principales catégories de bâtiments du secteur public et commercial. L'étude devait porter sur la protection thermique en hiver et en été, sur les techniques de chauffage, de ventilation et de climatisation ainsi que sur l'éclairage. Il s'agissait d'examiner aussi bien la construction neuve que la rénovation, en distinguant entre la consommation d'électricité et celle de chaleur, et en considérant les interactions éventuelles. On a également souhaité évaluer (et si possible chiffrer) de possibles bénéfices additionnels. Ceux-ci ont été identifiés d'après les déclarations relatives à des modifications du confort induites par les mesures d'efficacité énergétique. Enfin, il s'agissait de formuler des recommandations à l'adresse des intéressés: investisseurs et concepteurs de nouveaux bâtiments, exploitants et propriétaires de bâtiments existants, professionnels de l'enveloppe et des installations du bâtiment et enfin, responsables de la recherche en techniques et en économie énergétiques.

Demande d'énergie et potentiels d'efficacité

Même si les travaux se sont centrés sur les bâtiments de bureaux, leurs résultats étant exprimés sous forme désagrégée peuvent être appliqués à d'autres catégories de bâtiments du secteur des services: écoles, hôpitaux, surfaces de vente. En l'absence de mesures particulières, la consommation spécifique de combustible des constructions neuves se situe entre 140 et 280 MJ/m²_{SRE}a, celle des bâtiments existants entre 430 et 1000 MJ/m²_{SRE}a, voire au-dessus de 1500 MJ/m²_{SRE}a dans certains cas isolés. Dans les bâtiments neufs où les charges internes sont élevées (appareils nécessitant 120 MJ_{el}/m²_{SRE}a), la demande d'électricité est du même ordre (180 à 350 MJ_{el}/m²_{SRE}a), alors qu'elle varie entre 180 et plus de 500 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans les bâtiments existants (Tableau R. 1). Or des interventions affectant le bâtiment et ses installations permettent de ramener l'indice de dépense d'énergie électrique dans les bâtiments existants et dans les constructions neuves à un niveau de 170 à 220 MJ_{el}/m²_{SRE}a, selon le train de mesures et la stratégie adoptée (p.ex. avec accent sur le combustible ou sur l'électricité). En vue de réduire de façon significative la demande de courant, il conviendrait d'agir aussi sur la consommation des appareils de bureau, qui représente souvent une part élevée des charges internes. Le potentiel d'économies y relatif se situe entre 40 et 80 MJ_{el}/m²_{SRE}a. Il est possible de faire en sorte que la demande de chaleur atteigne tout juste de 90 à 140 MJ/m²_{SRE}a dans les bâtiments neufs et de 100 à quelque 300 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans les bâtiments existants, selon le genre de construction. Enfin le recours à la récupération de chaleur et à la pompe à chaleur permet d'éliminer complètement les besoins de combustible restants.

Ces gains ne résultent pas d'un seul type d'interventions, mais d'**un ensemble de mesures combinées**:

- L'isolation thermique, les fenêtres et vitrages à faible valeur U se traduisent par une réduction des besoins de chaleur pouvant atteindre 100 MJ/m²a dans les bâtiments neufs et jusqu'à 400 MJ/m²a dans les bâtiments rénovés, tandis que la ventilation avec récupération de chaleur «vaut» jusqu'à 150 MJ/m²a (tous bâtiments confondus). Quant à l'optimisation de l'exploitation, elle produit entre quelques dizaines et environ 100 MJ/m²a, selon les circonstances.
- Pour l'électricité, un éclairage axé sur l'efficacité énergétique, incluant une modulation liée à la lumière du jour et à la présence de personnes permet des gains d'environ 40 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans les bâtiments neufs et de 60 à 120 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans la rénovation. On peut obtenir des gains comparables en prenant des mesures directes ou indirectes touchant la ventilation et le refroidissement, par exemple en réduisant les pertes de charge, en adaptant les réglages aux besoins (p.ex. en fonction du CO₂), en maintenant à moins de 70% la proportion des vitrages, en réglant l'action des pare-soleil (p.ex. par température extérieure dépassant 16 à 20°C), en limitant le refroidissement (temp. idéale non inf. à 26°C), en rendant plus efficace la production et la distribution de froid grâce à une différence de température modeste (coeff. performance annuel >5), en tirant parti de l'inertie thermique du bâtiment et en ouvrant les fenêtres pour le rafraîchir.

		Bâtiments neufs				Bâtiments existants			
		Standard		Good practice		Avant		Après rénov.	
		de	à	de	à	de	à	de	à
Electricité	Charges int. (app., sans éclairage)	40	120	30	60	40	120	30	60
	Eclairage	60	100	25	40	100	160	40	80
	Ventilation (air pulsé)	25	45	15	25	160	290	15	30
	Refroidissement	30	110	10	30	20	50	10	30
	Total sans pompe à chaleur (*)	100	350	80	140	180	530	90	150
	Chauffage (PAC)	30	100	20	35	-	-	25	40
Combustible.	Chauffage air pulsé	50	100	15	30	260	400	20	35
	Autres besoins de chaleur	90	280	70	120	380	600	80	140
	Total combustibles (*)	140	280	85	140	430	1000	100	150

(*) Le total ne correspond pas à la somme des éléments parce que toutes les catégories ne sont pas représentées partout et que les valeurs minimales et maximales ne se combinent pas forcément.

Tableau R. 1 Plages des indices de dépense d'énergie (consommation finale; MJ/m²a)

Interactions entre besoins de chaleur et d'électricité

Dans l'optique du confort, la réduction des besoins d'électricité et de combustible engendre parfois des conflits d'objectifs, mais elle peut aussi offrir des possibilités de synergie:

- *La synergie* résulte fréquemment du réglage amélioré des équipements de ventilation (en fonction de la production de CO₂ ou de la présence de personnes) et de refroidissement d'un bâtiment (élimination des excès de refroidissement), car ces mesures diminuent tant les besoins de chaleur que ceux d'électricité. La modernisation de l'éclairage accroît certes les besoins de chauffage et éventuellement d'énergie fossile, mais cela dans une mesure relativement modeste; il y a en tous cas gain d'énergie primaire. Il en va généralement de même avec une pompe à chaleur efficace.
- L'isolation thermique poussée de l'enveloppe du bâtiment a des effets tant positifs que négatifs en termes de confort thermique. D'une part celui-ci s'améliore en période froide, notamment en comparaison avec les bâtiments existants non isolés et de façon générale dans les bâtiments à forte proportion de vitrages, parce qu'il y a moins de surfaces froide et de courants d'air glacial. D'autre part, l'isolation thermique d'une façade qui en était privé risque d'en aggraver la surchauffe, surtout dans des locaux déjà critiques, privés de refroidissement actif et passif, et dont il est difficile ou impossible d'ouvrir les fenêtres (ceci n'est pas forcément le cas pour l'isolation thermique des toitures, car l'isolation thermique prévient aussi les gains de chaleur qui ont une importance beaucoup plus élevée aux toitures). Il faut alors recommander le recours à des verres sélectifs (valeur g modeste, comprise entre 0,35 et 0,42, mais bonne transmission de la lumière) et la combinaison des mesures d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment avec d'autres interventions touchant l'énergie et le confort (refroidissement passif ou actif, réduction des charges internes, notamment au moyen d'un éclairage efficace et bien réglé).
- La protection accrue vis-à-vis du soleil accroît certes le confort thermique et réduit les besoins de refroidissement, mais réclame davantage d'éclairage. On peut largement y remédier au moyen d'un système de refroidissement très efficace, réglé en fonction de la saison. Lorsqu'il ne fait pas très chaud, il faut préférer l'éclairage naturel au détriment de la protection solaire. Si les fenêtres à gain solaire ayant une valeur g élevée (en comparaison du standard à valeur U du verre correspondant) augmentent les gains solaires en période de chauffage, elles ne sont pourtant pas recommandées pour les bâtiments de services, car elles aggravent le risque de surchauffe en été. De leur côté, les fenêtres à protection solaire (faible valeur g) améliorent certes le confort estival, mais elles réclament plus de chauffage et plus d'électricité (éclairage).

Rentabilité des mesures pour plus d'efficacité

La principale conclusion à retenir d'emblée est que la rentabilité de ces mesures dépendra moins du niveau d'efficacité énergétique que **des options prises à l'échelon de l'architecture et de la conception, ainsi que du niveau de confort recherché**. Mentionnons la taille du bâtiment (effets d'échelle), sa forme, les matériaux choisis, le type de façade, la proportion de vitrages, le type de pare-soleil et leur répartition, la ventilation et / ou le refroidissement (ou leur absence). Ainsi la modification de la part de vitrages peut entraîner des surcoûts de $10 \text{ CHF/m}^2_{\text{SRE}} \text{ a}$ et davantage, cela pour des retombées relativement modestes sur les besoins d'électricité et de combustible. De même, l'amélioration du confort au moyen du refroidissement et de la ventilation entraîne des surcoûts pouvant atteindre $15 \text{ CHF/m}^2_{\text{SRE}} \text{ a}$.

Dans les bâtiments existants, la rentabilité des mesures touchant le bâtiment et les installations dépend non seulement de leur coût et de leur effet énergétique, mais encore – facteur important – **de la situation initiale et de la base de comparaison des coûts**. La comparaison fréquemment faite avec les dépenses courantes (pour l'énergie) n'est pas appropriée, parce que les investissements consentis accroissent la valeur réelle du bâtiment (et la productivité des personnes qui y travaillent). Objectivement, il vaut mieux comparer la rentabilité de deux options, la "réfection" et le "renouvellement énergétique standard", si difficile que soit la définition de leurs bases économiques. L'une et l'autre option révélera des investissements rentables, comme l'indiquent la présentation synoptique Tableau R. 2 et les remarques qui suivent. On a comparé les coûts annuels nets et les coûts spécifiques bruts en se référant à des constructions neuves typiques et à la rénovation énergétique, parfois à la réfection. Il existe des différences importantes entre les divers types de mesures, voire à l'intérieur de chacun d'eux, notamment selon la situation de référence¹.

Une **protection thermique plus poussée** de l'enveloppe (isolation renforcée, fenêtres à valeur U réduite) est un facteur décisif d'efficacité énergétique du bâtiment. Avec les prix actuels de l'énergie (0,07 à 0,08 CHF/kWh), les mesures prises à cet effet sont généralement rentables ou du moins, peu onéreuses (surcoûts n'atteignant pas $1\text{--}2 \text{ CHF/m}^2_{\text{SRE}} \text{ a}$) jusqu'à des valeurs U de $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ou une épaisseur d'isolation de 20 cm. C'est vrai aussi bien pour la construction neuve que pour les bâtiments existants, notamment si une réfection s'impose de toute façon, et même, si la façade est simple, en comparaison des dépenses courantes pour l'énergie. Avec une façade complexe, la rénovation énergétique est également rentable par rapport à une rénovation onéreuse, mais non en comparaison de simples mesures d'entretien.

Des éclairages énergétiquement efficaces (réglage compris) sont un facteur décisif d'efficacité énergétique et de confort. Surtout après rénovation d'un bâtiment existant, ils contribuent à la qualité ergonomique de la lumière (pas de scintillement, puissance, couleur de l'éclairage et fidélité dans le rendu des couleurs) et dégagent moins de chaleur. Les mesures à prendre pour cela sont généralement rentables ou n'engendrent que des surcoûts modérés, ne dépassant pas $2 \text{ CHF/m}^2 \text{ a}$, dans la règle, aussi bien dans la construction que dans la réfection. Par contre, si l'on s'appuie sur les dépenses courantes pour l'énergie, leur réduction ne compense pas le prix du renouvellement complet de l'éclairage, ce qui explique peut-être la rareté de l'opération.

Le coût élevé de l'utilisation du bâtiment provoque le plus souvent **une forte densité d'occupation et de dotation en appareils**. Il en résulte **d'importantes charges thermiques internes** (p. ex. éclairage moyennement efficace: env. $80 \text{ à } 100 \text{ MJ/m}^2_{\text{SRE}} \text{ a}$, appareils: jusqu'à $120 \text{ MJ/m}^2_{\text{SRE}} \text{ a}$). Plus les charges internes résiduelles sont élevées et la protection thermique du bâtiment poussée, plus il est difficile de maintenir un niveau de confort acceptable pendant les périodes estivales ensoleillées et entre-saisons. Les techniques de **refroidissement passif** (*ouverture automatisée des fenêtres ou*

¹ Le Tableau R. 2 fait la part belle aux mesures de rénovation, qui rapportent davantage. Mais les résultats obtenus dans la construction neuve peuvent être relativement tout aussi significatifs. Pour mieux comprendre les écarts constatés, on se référera au tableau Z.4 du résumé plus détaillé, p.30.

dispositifs de parapet avec ouvertures pour l'aération) apportent de substantielles améliorations du confort sans nécessiter des équipements de ventilation et de refroidissement. Leurs coûts annuels se situent entre quelque 5 et 10 CHF/m²_{SREA}. Toutefois le refroidissement passif n'est pas toujours possible (selon la situation initiale et l'emplacement du bâtiment) et bien souvent il est insuffisant pour répondre à des exigences élevées de confort thermique (conform. au à la révision de la norme SIA 382/1). Dans certains cas, il conviendrait par conséquent de réexaminer ces exigences lorsqu'elles s'appliquent à des bâtiments non ventilés ni refroidis.

	Electricité Δ ind. én. _{el} MJ/m ² _{SREA}	Chaleur (consom. final) Δ ind. én. _{comb.} MJ/m ² _{SREA}	Coûts annuels nets (1, 2) CHF/m ² _{SREA}	Coûts spécifiques bruts (1) CHF/kWh _{comb} CHF/kWh _{el}	Effets confort; heures de surchauffe selon limite de la révision de la norme SIA 382/1 (espaces sud)
Architecture (3)	+15 bis +25	-50 bis -60	-15 bis +20	Non examiné	Non examiné
Charges internes: densité d'occupation, appareils plus efficaces	-40 bis -80	+10 bis +40	+ 30 bis +40 (taux d'occupation) (4)	Non examiné	Surchauffe: jusqu'à -200 h
Isolation thermique	Négligeable	-100 bis -150	-0.5 bis +1	0.05 bis 0.13 *	Meilleur confort thermique en hiver; surchauffe: +50 à +200 h
Fenêtres / vitrages, protection solaire	-20 bis +15	+20 bis -400	-1 bis +5	0.03 bis 0.2 *	Meilleur confort thermique en hiver; surchauffe: -120 à + 800 h
Eclairage	-20 bis -110	+10 bis +60	-1 bis +2.5	* -0.05 bis +0.4	Meilleure ergonomie éclairage; surchauffe: jusqu'à -200 h
Ventilation/refroidissement (efficacité énergétique)	-10 bis -160	-50 bis -250	-10 bis + 1.5	* -0.25 bis + 0.4 (5)	Meilleure qualité de l'air, moindre concentration de CO ₂ surchauffe: + quelques 10 h
Ventil./refroid. (confort)	+10 bis +100	-50 bis +5	+3 bis +15	0.17 bis 0.3 (5) *	Surchauffe: jusqu'à -900 h (-1200 h)
Production de chaleur PAC et non én. fossile	+30 bis + 80	-30% -100%	-0.5 bis +1	n.a.	- avec des sondes terrestres, quelques centaines d' heures
Bois et non én. fossile	Négligeable	En. renouv. et non fossile	+1 bis +2	n.a.	
<p>* néant (1) constr. neuve standard ou rénovation énergétique (réfection partielle), intérêt réel 3% (2) coût combustible 7 ct./kWh, coût électricité 17 ct./kWh (3) part vitrages, choix du matériau, conception (4) appareils supposés sans effets / coûts (5) coûts nettement inférieurs si le confort amélioré était pris en compte Important: <u>on ne peut pas</u> directement additionner les potentiels d'efficacité énergétique des différents secteurs (interactions)</p>					

Tableau R. 2 Vue agrégée de l'effet énergétique, des modifications de confort, des coûts spécifiques bruts (CHF/kWh) et des coûts et bénéfices nets (CHF/m²a) des différents types de mesures (sans évaluation économique du gain de confort). Source CEPE et al., tableau Z.4, p. 30

Le refroidissement (actif ou passif) des bâtiments ne peut que prendre de l'importance, notamment du fait du réchauffement prévisible du climat en Suisse au cours des trois à cinq décennies à venir. Il conviendrait de tenir compte plus systématiquement de cette perspective dans la construction et dans les investissements en faveur des immeubles existants, afin d'éviter d'avoir à consentir d'inutiles réinvestissements ou d'être confronté à des dépenses d'électricité exagérées ou encore à des blocages sociaux. Le refroidissement actif (air pulsé, éléments de construction thermoactifs, plafond réfrigérant, refroidissement de l'air frais, refroidissement nocturne par ventilation) entraîne des surcoûts qui sont dans la règle de 3 à 15 CHF/m²_{SREA}. Il importe donc d'axer le système sur une efficacité élevée (avec p.ex. une faible charge de chaleur pour l'eau de refroidissement), ce qui est rentable ou n'engendre que des surcoûts modestes (0 à 2 CHF/m²_{SREA}) et permet un refroidissement très efficace (<30 MJ_{el}/m²_{SREA}, en combinaison avec les mesures indirectes citées plus haut). Ainsi le refroidissement ne jouera pas un rôle excessif par rapport aux autres applications de l'électricité (éclairage, air pulsé, appareils) comme on le croit souvent. Il faut toutefois relever ici que la consommation d'énergie de re-

froidissement réagit vivement (augmentation à plus de $100 \text{ MJ}_{\text{el}}/\text{m}^2_{\text{SRE}}\text{a}$) si l'on néglige les mesures directes et indirectes qui ont été mentionnées.

L'installation de ventilation est à considérer avant tout comme un équipement de confort et d'hygiène de l'air. Dotée d'un récupérateur de chaleur, elle réduit certes la demande nette de chauffage mais ne saurait se justifier économiquement dans la seule perspective de l'efficacité énergétique (coûts marginaux sensiblement supérieurs aux coûts de production de chaleur). L'une des raisons en est que même si sa conception privilégie les impératifs d'hygiène de l'air, la renouvellement de l'air est généralement plus rapide qu'avec l'ouverture des fenêtres (le plus souvent certes insuffisante dans l'optique de l'hygiène de l'air), ce qui réduit l'effet net de cet équipement et des pompes à chaleur alimentées à l'air vicié. Le bien-être exige un refroidissement approprié de l'air frais, sans lequel le confort diminue (menace de surchauffe). Le choix du *forced free cooling* (taux de renouvellement de l'air plus élevé et/ou périodes de fonctionnement plus longues, en particulier pendant les nuits) peut se justifier dans certains cas isolés pour des raisons de coût (possibilité de renoncer à la distribution hydraulique de froid). Cette solution doit toutefois être adoptée après mûre réflexion seulement, car ses besoins de courant risquent de dépasser rapidement ceux d'un bon refroidissement hydraulique. Le coût annuel de l'installation de refroidissement atteint en règle générale $10 \text{ CHF}/\text{m}^2\text{a}$, un montant plus ou moins indépendant du niveau d'efficacité énergétique atteint. Il importe donc de veiller à avoir de faibles pertes de charge ($<700 \text{ Pa}$), avec des ventilateurs et des moteurs électriques très efficaces, soit un taux d'efficacité élevé ($<0,3 \text{ Wh}/(\text{m}^3/\text{h})$) ainsi que des réglages adaptés aux besoins (en fonction du CO_2). Ces mesures permettent de réduire la consommation d'électricité des bâtiments neufs (gain de 20 à plus de $30 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{a}$, soit jusqu'à deux tiers en moins) comme des bâtiments rénovés (gain de 70 à $130 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{a}$), avec des gains pouvant dépasser $250 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{a}$ dans certains cas. Le recours à des équipements de récupération de chaleur au coefficient de performance amélioré (plus de 85%) est également rentable.

Dans bien des cas, p.ex. dans les bâtiments aux façades complexes ou protégées, aux espaces exigus, la **pompe à chaleur** ou la PAC alimentée à l'air vicié constitue une solution intéressante du point de vue énergétique et technique, permettant d'abaisser la consommation de combustible pour le chauffage. A condition de réaliser une installation très efficace ou de tirer parti des synergies avec le refroidissement du bâtiment, on pourra compenser l'investissement supplémentaire en comprimant les dépenses pour l'énergie et l'exploitation.

Les coûts nets pourraient se trouver sensiblement réduits, voire devenir des bénéfices si la comptabilisation ajoutait aux moindres dépenses d'énergie le **gain de confort**, évalué économiquement (voir sous-chapitre suivant). Inversement, il faut presque toujours s'attendre à des coûts nets et à des coûts bruts plus élevés si la comparaison se base uniquement sur les dépenses courantes pour l'énergie. Sont rentables les mesures dont le coût spécifique brut est inférieur à la moyenne des prix du combustible ou de l'électricité (moyenne calculée sur la durée de la mesure prise).

Conclusions de l'analyse économique

- (1) Dans les bâtiments utilitaires neufs ou rénovés, il est possible d'**améliorer le confort** et de **réduire sensiblement les besoins de combustible et d'électricité du bâtiment** en prenant des mesures appropriées. Pour abaisser de manière significative l'ensemble de la demande d'électricité, on doit étendre l'effort aux **appareils de bureau**, dont la consommation représente généralement une part importante des charges internes. Des projets bien conçus permettent de réaliser tant des immeubles neufs peu gourmands d'énergie que, dans les immeubles existants, la modernisation énergétique des équipements et de l'enveloppe dans des conditions rentables ou au prix d'un surcoût modeste (0 à quelques $\text{CHF}/\text{m}^2\text{a}$).
- (2) Les dépenses annuelles (brutes) pour l'énergie sont bien plus fortement influencées par les exigences de confort et les équipements supplémentaires (refroidissement actif, ventilation) et par les choix fondamentaux de l'architecte (type de façade, emplacement du pare-soleil, design archi-

tectonique extérieur et intérieur). Les coûts qui y sont liés atteignent entre 10 et quelques dizaines de CHF/m²a. A titre de comparaison: les coûts annuels intégraux des éléments d'un bâtiment du secteur public et commercial (avec les installations) qui déterminent la dépense d'énergie atteignent 50 à 100 CHF/m²a, les coûts totaux de capital et d'exploitation 300 à 400 CHF/m²a et les coûts de personnel approximativement 5000 à 10000 CHF/m²a. Il suffit que des locaux surchauffés ou trop refroidis, ou encore l'air vicié, réduisent la productivité des personnes qui y travaillent pour qu'il faille mesurer à cette aune la valeur de toute intervention touchant la protection thermique ou la demande d'énergie. Le très important bénéfice à attendre des mesures à caractère énergétique dans ces bâtiments est une réalité largement négligée, peut-être parce qu'elle est trop peu connue et n'a par conséquent guère été prise en compte dans l'appréciation des investissements pour l'énergie et des mesures d'organisation.

Conclusions touchant la politique de l'énergie et de la construction

La saisie des coûts et la définition de leurs éléments déterminants n'intéresse pas seulement l'appréciation économique des mesures pour l'efficacité énergétique, mais aussi la politique de l'énergie. Les concepteurs et les entrepreneurs appelés à travailler à la construction ou à la réfection et à la modernisation des bâtiments travaillent le plus souvent chacun de leur côté. Le maître de l'ouvrage désireux de faire les meilleurs choix énergétiques perd beaucoup de temps à s'informer et à chercher pour finalement décider. Les nombreuses interfaces empêchent la transparence et la compréhension d'ensemble, rendant impossible la comparaison des possibilités d'investissement du fait des délimitations différentes et des coûts connexes souvent non négligeables. Tant la subdivision du travail que la pression de la concurrence font que les prestations doivent coûter le moins cher possible. Cette tendance est toutefois contraire à la nécessité de réduire les coûts du cycle de vie (et par tant, de préférer les solutions efficaces au plan énergétique).

Une amélioration plus poussée de l'efficacité énergétique se heurte obstinément à des entraves d'organisation du marché. Ces entraves diffèrent selon les **groupes-cibles** qui en sont affectés.

- *L'amélioration des connaissances* que possèdent les investisseurs, les concepteurs et les entrepreneurs au sujet des possibilités d'investissement passe par beaucoup d'information, une plus grande transparence du marché et la réduction des coûts des transactions. Cinq aspects en particulier méritent d'être encouragés ; ce sont :
 - 1° *les services de conseil au démarrage et à la mise en œuvre* fournis aux propriétaires immobiliers (aspects financiers et conceptuels),
 - 2° *les campagnes ciblées de mesure et d'information émanant des producteurs d'équipements techniques, à l'intention des concepteurs et des utilisateurs* (comme la campagne « Druckluft » 2006),
 - 3° *les offres classiques de formation et de perfectionnement professionnel*, 4° *le développement des réseaux locaux d'acquisition de connaissances* (analogues aux modèles AEnEC et à energho) pour les sociétés immobilières et les propriétaires de bâtiments administratifs, et
 - 5° *l'adoption plus fréquente du label MINERGIE* et la mise en œuvre du *passport bâtiment* en Suisse. Il faut recommander avant tout le financement initial des réseaux locaux, particulièrement payant. Les mesures citées devront être préparées et mises en œuvre par l'administration fédérale et les cantons, en collaboration avec les associations professionnelles, notamment par le biais des normes SIA (adoption et application). A l'ordre du jour, la question de savoir comment accroître l'efficacité des moteurs électriques, ventilateurs, équipements cryogènes, pompes et plans d'installations, et comment promouvoir la conception intégrée, l'optimisation de l'exploitation et la gestion des immeubles.
- **Les professionnels de l'efficacité énergétique, c-à-d les concepteurs et les fournisseurs de technologies** sont interpellés à l'échelon de l'organisation (du marché), à celui du *développement technique*, de la *diffusion de technologie et de savoir-faire* ainsi que du *marketing*: il importe de faire plus largement connaître les méthodes et standards régissant les commandes et réglages adaptatifs (autodidactiques) pour les bâtiments (p.ex. la ventilation liée à la concentration en CO₂, l'optimisation précoce et complète des besoins de chauffage, de refroidissement et

d'éclairage avec recours aux prévisions météorologiques) ainsi que le refroidissement haute-performances pour le bâtiment. En termes de marketing, les concepteurs et les fournisseurs doivent associer les solutions proposées à du vécu, à des formes de vie plus saine, à un confort accru (hygiène de l'air, bien-être thermique, ergonomie améliorée de l'éclairage), à une meilleure productivité au travail et à une sorte de prestige. Il faut encore familiariser les investisseurs avec des notions telles que la protection améliorée contre le bruit et contre l'effraction, les moins longues périodes d'attente d'une location ou d'une location-vente, ainsi que la qualité améliorée et les intérêts du crédit diminués du fait de la convention de Bâle.

- On sous-estime parfois le rôle des **intermédiaires**, qui font baisser les coûts des transactions par *l'adoption de normes et la standardisation* ou qui éliminent d'importantes lacunes du savoir au moyen de la formation et du perfectionnement professionnels. Les normes, standards et benchmarks (p.ex. des normes comme SIA 380/4 ou SIA 382/1 et les exigences MINERGIE) constituent des instruments de décision dans le domaine technique, dont la principale qualité est de distinguer entre les solutions standard et les options axées sur l'efficacité. Normes et benchmarks peuvent s'appliquer aussi bien au système (besoin annuel d'énergie ou coûts spécifiques de l'énergie par m² et par année) qu'au composant isolé (cela pour des raisons d'exécution et pour tenir compte d'un marché où la division du travail et la spécialisation sont très poussées et où dominent les petites entreprises). Normes et recommandations (p.ex. sur les valeurs-limites et les valeurs-cibles) ont une valeur pratique pour les professionnels, qui y trouvent des éléments d'information, des bases de conception et le fondement de contrats de droit civil entre maîtres d'ouvrage et fournisseurs de prestations. Voilà pourquoi il conviendrait que la normalisation, qui relève largement du droit privé (p.ex. les Energycodes SIA) obtienne de l'Etat une aide tendanciellement plus élevée qu'aujourd'hui. Les normes ne doivent pas nécessairement être ancrées dans la loi, mais peuvent s'inscrire dans *des instruments de conception et des « tools » d'un emploi relativement facile*. Il faut tendre aussi à multiplier les *publications spécialisées* (comme en a produites jadis le programme RAVEL) fournissant des contenus techniques et des appréciations économiques (p.ex. des coûts sur tout un cycle de vie et des considérations coûts/bénéfices) ainsi que le développement de *benchmarks intégrés et d'instruments de conception, de travail et de mise en œuvre* qui facilitent *une vue globale*, qui révèlent les rapports coûts/bénéfices essentiels et sont souvent la condition première de l'optimisation.

Toutes les activités qui viennent d'être recommandées devraient certes relever principalement des organisations économiques elles-mêmes et de certaines entreprises, mais une initiative des pouvoirs publics et l'appui financier et moral de la Confédération, des cantons et des plus grandes communes leur seraient sans doute très bienvenus, car lesdites activités sont d'intérêt public et elles constituent des apports à l'économie globale (emploi, potentiels d'exportation, efficacité économique).

- **Législation:** les prescriptions techniques et architecturales dans le domaine de la construction, surtout dans le neuf, ont révélé être des instruments tout-à-fait utiles (p.ex. pour l'isolation thermique avec SIA 380/1 et MoPEC). **Il y a un retard à combler dans le domaine de l'électricité.** Les normes 380/4 et 382/1 pourront servir de base. De telles prescriptions influencent indirectement aussi la rénovation de bâtiments et d'installations, où le progrès technique qu'elles induisent est bien souvent pris en compte. Des benchmarks et des standards pourraient valoir des facilités à l'exportation de produits destinés à l'équipement technique des bâtiments. Quant à la mise en œuvre, elle doit être simple et efficace (les travaux en cours pour SIA 380/4 sont à intensifier). De plus, **la mise en œuvre** doit se doubler d'**éléments à caractère incitatif**, par exemple des procédures d'autorisation souples. Mentionnons les modèles pour gros consommateurs (MoPEC module 8) ainsi qu'une démarche duale (cf. norme SIA 382/1, ZH, GE): lorsque des valeurs aisément mesurables (p.ex. puissance installée, vitesse d'écoulement, ou pour un bâtiment existant, indice énergétique) se situent en dessous d'un certain seuil, on peut se passer de présenter la preuve du besoin ou une autorisation, d'installer le DIFC ou d'établir un plan des mesures à prendre. Il faut examiner aussi l'opportunité d'un renouvellement obligatoire, au terme de périodes de réinvestissement spécifiques pour chaque technologie. La coordination des mesures de mise en œuvre, si possible dans tout le pays, serait de nature à produire des effets d'échelle dans le perfectionne-

ment professionnel et à créer des conditions générales semblables dans les cantons, ce dont le marché libre ne peut que profiter.

- Les **collectivités publiques** (Confédération, cantons et communes) sont propriétaires d'une bonne partie des bâtiments utilitaires. Il conviendrait qu'elles procèdent dans chaque canton à la rénovation ciblée de certains types de bâtiments (p.ex. écoles, bureaux) à titre de **démonstration d'un comportement exemplaire**, condition première d'une politique crédible pour faire passer des exigences élevées dans les domaines de l'énergie et du climat. De leur côté, les entreprises d'approvisionnement en électricité pourraient offrir des tarifs incitatifs (cf. p.ex. EWZ) au moins jusqu'au niveau d'un least cost planning.

Quant aux composants de la bureautique, qui contribuent largement aux charges internes mais qui sont commercialisés dans le monde entier, leur efficacité énergétique devrait figurer plus souvent à l'ordre du jour des organes compétents de l'AIE, des instances de normalisation et de l'UE.

Enfin il incombe aux institutions actives dans *la recherche et le développement* de produire des instruments de conception simples et rapides intégrant les rapports complexes entre protection thermique, charges internes, installations du bâtiment et solutions peu onéreuses que la présente étude a mis en évidence au moyen de simulations d'envergure (p.ex. compléter l'outil SIA pour la ventilation et la climatisation ou le configurateur d'éclairage par des indices de coûts et des modules de rentabilité Good practice). De même, les thèses qui se dégagent de cette étude doivent rapidement trouver place dans les modèles actuels d'économie énergétique: ces thèses sont le bien-être lorsque les charges thermiques augmentent du fait des appareils de bureautique, les températures extérieures qui tendent elles aussi à augmenter (évolution du climat), les besoins croissants de confort des utilisateurs, et les gains de productivité souhaités par les employeurs tant publics que privés.

Executive Summary

Das Projekt verfolgte das Ziel, die Kenntnisse zu den Kosten von Energieeffizienz-Massnahmen für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis zu stellen. Abzudecken war der winterliche und sommerliche Wärmeschutz, die Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik sowie die Beleuchtung. Hierbei war zwischen Neubau und Erneuerung sowie zwischen Elektrizitäts- und Wärmeanwendungen zu unterscheiden und den Interaktionseffekten der Massnahmen Rechnung zu tragen. Qualitativ und – so weit möglich – quantitativ darzustellen waren zudem die möglichen Zusatznutzen. Diese wurden über Aussagen zur Komfortveränderung infolge von Energieeffizienz-Massnahmen ermittelt. Schliesslich sollten auch Handlungsempfehlungen zuhanden der relevanten Akteure wie Investoren und Planer von Neubauten, Betreiber und Besitzer von bestehenden Gebäuden, sowie zuhanden der Baubranche im Bereich Gebäudehülle und Gebäudetechnik und der energietechnischen und -wirtschaftlichen Forschung formuliert werden.

Stand des Energiebedarfs und Effizienzpotenziale

Wenngleich die Bürogebäude im Fokus der Analysen lagen, können die Ergebnisse aufgrund ihrer disaggregierten Form einzeln oder als Ganzes auf weitere Gebäudekategorien des Dienstleistungssektors wie Schulen, Spitäler, Verkaufsflächen übertragen werden. In der Ausgangslage beträgt der spezifische Heizenergiebedarf (Brennstoffbedarf) bei Neubauten zwischen 140 und 280 MJ/m²_{EBF}a und im Gebäudebestand zwischen 430 und 1000 MJ/m²_{EBF}a, in Einzelfällen über 1500 MJ/m²_{EBF}a. In Neubauten liegt der Elektrizitätsbedarf betragsmässig bei Gebäuden mit hohen internen Lasten (Arbeitshilfen 120 MJ_{el}/m²_{EBF}a) in einer ähnlichen Grössenordnung (180 bis 350 MJ_{el}/m²_{EBF}a), während er im Gebäudebestand zwischen 180 und über 500 MJ_{el}/m²_{EBF}a variiert (Tabelle Z.1). Durch Gebäude- und Gebäudetechnikmassnahmen lässt sich die Elektrizitäts-Energiekennzahl sowohl bei Neubauten wie auch im Gebäudebestand netto auf 170 bis 220 MJ_{el}/m²_{EBF}a reduzieren, je nach Massnahmenbündel und der damit verfolgten Strategie (z.B. Schwerpunktsetzung Brennstoff- bzw. Elektrizitätsmassnahmen). Um den gesamten Strombedarf markant zu reduzieren, wäre auch der Bürogeräte-Elektrizitätsbedarf, der oft einen hohen Anteil am Gesamtstrombedarf verursacht, mit in die Massnahmen einzubeziehen. Das entsprechende Energie-Effizienzpotenzial beträgt 40 bis 80 MJ_{el}/m²_{EBF}a. Der Wärmeenergiebedarf lässt sich bei Neubauten auf knapp 90 bis 140 MJ/m²_{EBF}a und im Gebäudebestand auf 100 bis rund 300 MJ_{el}/m²_{EBF}a reduzieren, je nach baulichen Voraussetzungen. Unter Verwendung von Wärmerückgewinnung und Wärmepumpen lässt sich der verbleibende Brennstoffbedarf vollständig substituieren.

	Neubau				Gebäudebestand			
	Standard von	bis	Good practice von	bis	Ausgangslage von	bis	Erneuert von	bis
Elektrizität Interne Lasten (ohne Beleuchtung): Arbeitshilfen, Geräte	40	120	30	60	40	120	30	60
Beleuchtung	60	100	25	40	100	160	40	80
Lüftung (Luftförderung)	25	45	15	25	160	290	15	30
Kühlung	30	110	10	30	20	50	10	30
Gesamt ohne Wärmepumpen (*)	100	350	80	140	180	530	90	150
Heizen (WP)	30	100	20	35	k.A.	k.A.	25	40
Brennstoffe Luftherwärmung in Lüftungsanlagen	50	100	15	30	260	400	20	35
Übriger Heizwärmebedarf	90	280	70	120	380	600	80	140
Gesamt Brennstoffe (*)	140	280	85	140	430	1000	100	150

(*) Da nicht alle Kategorien bei allen Gebäuden vorkommen und sich jeweils nicht alle je Minimal- und je alle Maximalwerte kombinieren, entspricht der Gesamtwert nicht der Summe der jeweiligen Spalten

Tabelle Z.1 Bereiche der Energiekennzahlen (Endenergie) bei Neubau und Gebäudebestand (MJ/m²a)

Erreicht werden diese Effizienzgewinne nicht durch einen einzigen Massnahmentyp, sondern durch ein **Zusammenspiel von Massnahmen**:

- Wärmedämmung, Fenster und Verglasungen mit geringeren U-Werten tragen bei Neubauten mit bis zu $100 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ und bei Gebäudeerneuerungen mit bis $400 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ zur Wärmebedarfsreduktion bei, Lüftungen mit Wärmerückgewinnung mit bis zu $150 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ (Neubau und Bestand). Betriebsoptimierungen ermöglichen einen Effizienzgewinn zwischen einigen 10 bis wenigen $100 \text{ MJ/m}^2\text{a}$, je nach Ausgangslage.
- Elektrizitätsseitig ermöglichen energie-effiziente Beleuchtungen inkl. tageslicht- und präsenzbasierte Regelungen Effizienzgewinne von rund $40 \text{ MJ}_{\text{el}}/\text{m}^2_{\text{EBF}}\text{a}$ bei Neubauten und von 60 bis $120 \text{ MJ}_{\text{el}}/\text{m}^2_{\text{EBF}}\text{a}$ bei Erneuerungen im Gebäudebestand. Betragsmässig ähnliche Effizienzgewinne lassen sich mit direkten oder indirekten Massnahmen in den Bereichen Lüftungen und Kühlung erzielen, z.B. durch geringere Druckverluste, bedarfsorientierte Regelungen (z.B. CO_2 -basiert), Glasanteilen geringer als 70%, geregelter Sonnenschutz (z.B. bei Aussentemperaturen über 16 bis 20°C), moderater Kühlung (Sollwert nicht unter 26°C), hoch effiziente Kälteerzeugung und -verteilung mittels geringem, d.h. variablen Temperaturhub (Jahres-Arbeitszahl >5), Nutzung der thermischen Gebäudemasse und der freien Kälte durch Fensteröffnung und Erdsonden.

Wechselwirkungen zwischen Heiz- und Strombedarf

Zwischen der Reduktion des Elektrizitäts- und des Brennstoffbedarfs bestehen bei der Erfüllung von Komfortanforderungen zum Teil Zielkonflikte und zum Teil können Synergieeffekte genutzt werden:

- *Synergieeffekte* können typischerweise durch bedarfsgerechte Regelungen bei Lüftungsanlagen (CO_2 - oder präsenzbasiert) und Gebäudekühlung (Vermeidung von übermässiger Kühlung) genutzt werden, denn diese Massnahmen reduzieren sowohl den Wärme- wie den Elektrizitätsbedarf. Beleuchtungserneuerungen erhöhen zwar den Wärme- und damit u. U. den fossilen Heizenergiebedarf, dies jedoch verhältnismässig geringfügig, so dass netto auf jeden Fall ein Primärenergiegewinn resultiert. Ein solcher ergibt sich auch bei effizienten Wärmepumpen.
- Der weitergehende Wärmeschutz der Gebäudehülle hat sowohl positive wie negative Effekte auf den thermischen Komfort. Zum einen wird dieser während den kalten Perioden deutlich verbessert, insbesondere im Vergleich zum ungedämmten Gebäudebestand und allgemein bei Gebäuden mit hohem Glasanteil, da kalt strahlende Flächen, Kaltluftströme und Zuglufterscheinungen vermindert werden. Zum anderen verschärft der Wärmeschutz bei bisher ungedämmten Fassaden potenziell die Überhitzung², v. a. bei bereits vor der Massnahme kritischen Räumen ohne aktive oder passive Kühlung und bei eingeschränkter oder fehlender Möglichkeit der Fensteröffnung. Als Folge ist zu empfehlen, selektive Gläser zu verwenden (geringer g-Wert von 0.35 bis 0.42, aber hohe Lichttransmission) und Gebäudehüllen-Wärmeschutzmassnahmen mit weiteren Energie- und Komfortmassnahmen zu kombinieren (passive oder aktive Kühlung, Reduktion der internen Lasten, insbesondere durch energie-effiziente und geregelte Beleuchtungen).
- Ein verstärkter Sonnenschutz erhöht zwar den thermischen Komfort und vermindert den thermischen Kühlbedarf, aber er erhöht den Beleuchtungsbedarf. Der Zielkonflikt kann durch eine sehr effiziente Kühlung und saisonvariable Regelungen weitgehend entschärft werden; während Perioden mit geringem Kühlbedarf ist die Tageslichtnutzung dem Sonnenschutzeinsatz vorzuziehen, dies umso mehr, je energie-effizienter der Kühlbedarf gedeckt wird. Solargewinnfenster mit höherem g-Wert (im Vergleich zum Standard bei jeweiligem Glas-U-Wert) erhöhen zwar die solaren Gewinne während der Heizperiode, sind aber in Dienstleistungsgebäuden nicht ratsam, denn sie erhöhen die Überhitzungsgefahr im Sommerhalbjahr. Sonnenschutzfenster (mit geringem g-Wert) verbessern zwar den sommerlichen Komfort, erhöhen jedoch netto den Wärme- und Strombedarf wegen des höheren Beleuchtungsbedarfs.

² Dies gilt bei Dämmungen im Dachbereich unter Umständen nicht, da im Dachbereich der Wärmeeintrag über die opaken Flächen eine markant höhere Bedeutung hat im Vergleich zu Fassaden, bei denen ein Grossteil des Wärmeeintrags über die transparenten Flächen erfolgt

Zur Rentabilität der Effizienzmassnahmen

Als wichtigstes Fazit sei vorneweg festgehalten, dass die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen weniger vom Energieeffizienz-Niveau als viel mehr von **grundsätzlichen architektonischen und konzeptionellen Entscheiden sowie vom angestrebten Komfortniveau** bestimmt wird. Zu nennen sind Gebäudegrösse (Skaleneffekte), Gebäudeform, Materialwahl, Fassadengestaltung, Glasanteil, Sonnenschutztyp- und -platzierung, Lüftung und/oder Kühlung ja oder nein. Eine Veränderung des Glasanteils kann beispielsweise mit Mehr- oder Minderkosten von 10 CHF/m²_{EBF}a und mehr verbunden sein, und dies bei relativ geringen Auswirkungen auf den Elektrizitäts- und Brennstoffbedarf. Auch die Komfortmassnahmen Gebäudekühlung oder -lüftung sind mit Zusatzkosten von bis zu 15 CHF/m²_{EBF}a verbunden.

Im Gebäudebestand hängt die Wirtschaftlichkeit von gebäude- und anlagenbezogenen Massnahmen zudem nicht nur von den Kosten der Massnahmen und ihrer energetischen Wirkung ab, sondern erheblich auch von der **Ausgangslage und der Kosten-Vergleichsbasis**. Die nicht selten verwendete Vergleichsbasis der laufenden (Energie-)Kosten ist nicht sachgerecht, weil durch die investiven Massnahmen neue Sachwerte für die Gebäudebewertung (und die Produktivität der dort Arbeitenden) geschaffen werden. Wenngleich die ökonomische Bezugsbasis von zwei Fällen, nämlich die "Instandsetzung" oder die "energetische Standard-Erneuerung", aufwändig zu definieren ist, ist das Vorgehen als Vergleichsbasis sachlich angemessen, d.h., beide Fälle führen zu der Identifikation rentabler Investitionsoptionen bzw. Investitionsbündeln, wie die zusammenfassende Übersichts-Tabelle Z.2 und die folgenden Ausführungen zeigen. Vergleichsbasis der Netto-Jahreskosten und der spezifischen Bruttokosten sind typische Standardneubauten bzw. energetische Erneuerung, teilweise auch Instandsetzungen. Die Variation zwischen den verschiedenen Massnahmentypen und auch innerhalb eines einzelnen Massnahmentyps ist beträchtlich, abhängig u. a. auch vom Referenzfall³.

Der **weitergehende Wärmeschutz der Gebäudehülle**, d.h. verstärkte Wärmedämmungen und Fenster mit geringeren U-Werten, ist ein zentrales Element für energie-effiziente Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind bei Annahme heutiger Wärmeenergiepreise (0.07 bis 0.08 CHF/kWh) bis zu U-Werten von 0.2 W/m²K bzw. Dämmstärken von 20 cm meist rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten verbunden (weniger als 1 bis 2 CHF/m²_{EBF}a). Dies gilt sowohl für den Neubaufall wie für den Gebäudebestand, bei letzterem insbesondere zum Zeitpunkt von ohnehin durchzuführenden Instandsetzungen, bei einfachen Fassaden sogar im Vergleich zu laufenden Energiekosten. Bei komplexen Fassaden sind energetische Erneuerungen im Vergleich zu aufwändigen Instandsetzungen ebenfalls wirtschaftlich, nicht jedoch im Vergleich zu einfachen Unterhaltsmassnahmen.

Energie-effiziente Beleuchtungen und Beleuchtungsregelungen sind zentrale Elemente für energie-effiziente und komfortable Gebäude. Sie steigern – v.a. bei Erneuerungen im Gebäudebestand – die ergonomische Qualität der Beleuchtung (Flimmerfreiheit, Beleuchtungsstärke, Lichtfarbe, Farbwiedergabe) und tragen zudem weniger zur Wärmeentwicklung bei. Die entsprechenden Effizienz-Massnahmen sind meist rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten von typischerweise 0 bis 2 CHF/m²a verbunden sowohl im Neubau als auch im Vergleich zu Instandsetzungen. Im Vergleich zu den laufenden Energiekosten kann ein kompletter Beleuchtungsersatz jedoch nicht vollständig über geringere Energiekosten amortisiert werden, was die geringen Erneuerungsraten mit erklären mag.

Der Kostendruck der Gebäudenutzung führt meist zu einer **dichten Personenbelegung und einer hohen Gerätedichte**. Dies führt zu hohen **internen Wärmelasten** (Arbeitshilfen und Geräte: bis 120 MJ/m²_{EBF}a). Je höher die (nicht mehr verminderbaren) internen Wärmelasten und je vollständiger die Gebäudehülle wärme geschützt ist, desto schwieriger ist es, während sonniger Perioden in akzep-

³ Die Ergebnisse in Tabelle Z.2 sind stark von den Erneuerungsmassnahmen im Gebäudebestand dominiert, weil diese betragsmässig eine höhere Wirkung aufweisen. Relativ gesehen können die Wirkungen im Neubau ebenso bedeutend sein. Für ein tieferes Verständnis der festgestellten Bandbreiten sei auf die detailliertere Tabelle Z.4 der ausführlicheren Zusammenfassung verwiesen, S. 38).

tables Komfort-Niveau halten zu können, selbst in der Übergangszeit. Massnahmen der **passiven Kühlung** (*automatisierte Fensteröffnung, Brüstungsgeräte, Nachströmöffnungen*) ermöglichen deutliche Komfortverbesserungen ohne den Einsatz von Lüftungs- oder Kühlanlagen. Die Jahreskosten solcher Massnahmen liegen bei ca. 5 bis 10 CHF/m²_{EBFa}. Passive Kühlung ist jedoch nicht in allen Fällen anwendbar (je nach Ausgangslage und Gebäudestandort) und in vielen Fällen nicht ausreichend, um die anspruchsvollen Anforderungen an den thermischen Komfort (gem. Entwurf SIA 382/1) zu erfüllen. Andererseits zeigen Untersuchungen, dass in nicht belüfteten und gekühlten Gebäuden mit Fensteröffnungsmöglichkeit höhere Temperaturen akzeptiert werden, so dass die genannten Anforderungen für solche Gebäude unter Umständen zu überdenken sind.

Massnahmenbereich	Elektrizität ΔEKZ_{el} MJ/m ² _{EBFa}	Wärme- Endenergie ΔEKZ_{Brst} MJ/m ² _{EBFa}	Netto-Jahres- kosten ^(1, 2) CHF/m ² _{EBFa}	Spezifische Bruttokosten ⁽¹⁾ CHF/kWh _{brst} CHF/kWh _{el}	Komfortauswirkung; Anzahl Stunden mit Überhitzung; Grenzwerte Entwurf SIA 381/1 (Südraum)
Architektur ⁽³⁾	+15 bis +25	-50 bis -60	-15 bis +20	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Interne Lasten: Belegungsdichte, effizientere Geräte	-40 bis -80	+10 bis +40	+ 30 bis +40 (Belegung), ⁽⁴⁾	Nicht untersucht	Überhitzung: bis -200 h
Wärmedämmungen	Vernachlässigbar	-100 bis -150	-0.5 bis +1	0.05 bis 0.13 *	Verbesserung therm. Komfort Winter; Überhitzung: +50 bis +200 h
Fenster/Verglasungen, Sonnenschutz	-20 bis +15	+20 bis -400	-1 bis +5	0.03 bis 0.2 *	Verbesserung therm. Komfort Winter; Überhitzung: -120 bis + 800 h
Beleuchtung	-20 bis -110	+10 bis +60	-1 bis +2.5	* -0.05 bis +0.4	Verbesserung Beleuchtungsergonomie; Überhitzung: bis -200 h
Lüftung/Kühlung (Energie-Effizienz)	-10 bis -160	-50 bis -250	-10 bis + 1.5	* -0.25 bis + 0.4 ⁽⁵⁾	Verbesserte Luftqualität, geringere CO ₂ -Konzentration Überhitzung: + einige 10 h
Lüftung/Kühlung (Komfort)	+10 bis +100	-50 bis +5	+3 bis +15	0.17 bis 0.3 ⁽⁵⁾ *	Überhitzung: bis -900 h (-1200 h)
Wärmeerzeugung					
WP statt fossile WE	+30 bis + 80	-30% -100%	-0.5 bis +1	k.A.	- einige 100 h bei Erdsonden-Nutzung
Holz statt fossile WE	Vernachlässigbar	Erneuerbar statt fossil	+1 bis +2	k.A.	
* Nicht zutreffend ⁽¹⁾ Vergleichsbasis Standardneubau oder energetische Erneuerung (teilweise Instandsetzung), 3% Realzins ⁽²⁾ Brennstoffpreis 7 Rp/kWh, Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh ⁽³⁾ Glasanteil, Materialisierung, Konzeption ⁽⁴⁾ Geräte mutmasslich kostenneutral ⁽⁵⁾ Markant tiefer, wenn Komfortnutzen (bedeutend) miteinbezogen würde Wichtig: die Energie-Effizienzpotenziale der einzelnen Bereiche sind <u>nicht</u> direkt addierbar (Interaktionseffekte)					

Tabelle Z.2 Übersicht über die energetische Wirkung, die Komfortveränderungen, die spezifischen Bruttokosten (CHF/kWh) und die Netto-Kosten bzw. Nutzen (CHF/m²a) der verschiedenen Massnahmenbereich (ohne ökonomische Bewertung des Komfortnutzens). Quelle CEPE at al 2006 (dieser Bericht), Tabelle Z.4.

Auch wegen der *absehbaren Klimaerwärmung in der Schweiz binnen der kommenden drei bis fünf Jahrzehnte* wird die **passive und aktive Gebäudekühlung** zunehmende Bedeutung erlangen. Diese Entwicklung sollte bei Neubauten und Re-Investitionen im Gebäudebestand mehr beachtet werden, um unnötige Nachinvestitionen oder unnötig hohe Elektrizitätskosten oder Akzeptanzprobleme zu vermeiden. Aktive Kühlung (Umluftkühler, TABS, Kühldecken, Zuluftkühlung, Nachtauskühlung über Lüftung) ist mit Mehrkosten von typischerweise 3 bis 15 CHF/m²_{EBFa} verbunden. Die aktive Kühlung sollte in der Folge möglichst effizient ausgelegt werden (z.B. geringer Temperaturhub zwischen Kühlwasser und Rückkühlung), was rentabel oder zu geringen Mehrkosten realisiert werden kann (0 bis 2 CHF/m²_{EBFa}) und energetisch sehr effiziente Gebäudekühlungen ermöglicht (<30 MJ_e/m²_{EBFa}, in Kombination mit den oben erwähnten indirekten Massnahmen). Damit nimmt die effiziente Kühlung im Vergleich zu den anderen Elektrizitätsanwendungen wie Beleuchtung, Luftförderung oder Geräte keine überragende Rolle ein, wie immer wieder vermutet wird. Anzumerken ist an dieser Stelle allerdings, dass der Kühlenergiebedarf stark sensitiv auf das Nichteinhalten der erwähnten direkten und

indirekten Massnahmen (Anstieg auf über $100 \text{ MJ}_{\text{el}}/\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a}$) und auf die Klimaerwärmung reagiert (siehe auch Frank, 2005 und Brunner, Steinmann et al., 2006).

Lüftungsanlagen sind primär als lufthygienische Komfortmassnahme zu verstehen. Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) vermögen zwar den spezifischen Heizwärmebedarf netto zu vermindern, machen jedoch aus Gründen der Energieeffizienz allein keinen ökonomischen Sinn (deutlich über den Wärmegestehungskosten liegende Grenzkosten). Mit ein Grund ist, dass selbst bei Auslegung auf den lufthygienischen Bedarf der Luftwechsel meistens höher ist als bei typischer (wenn auch meist aus lufthygienischer Sicht ungenügender) Fensterlüftung, was die Netto-Wirkung von WRG-Anlagen oder Abluft-WP vermindert. Aus Komfortgründen ist die Zuluft bedarfsgerecht zu kühlen, denn ohne Zuluftkühlung droht eine Komfortverschlechterung (Überhitzung). Die Möglichkeit des forced free cooling (höhere Luftwechselraten und/oder längere Betriebszeiten, insbesondere nachts) für die Gebäudekühlung kann im Einzelfall aus Kostengründen angezeigt sein (möglicher Verzicht auf hydraulische Kälteverteilung). Diese Form der Kühlung ist aber aus energetischen Gründen mit Bedacht einzusetzen, da der Elektrizitätsbedarf rasch denjenigen einer effizienten hydraulischen Kühlung übersteigen kann. Die Jahreskosten von Lüftungsanlagen betragen typischerweise $10 \text{ CHF}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$, mehr oder weniger unabhängig vom erreichten Energieeffizienzlevel. Entsprechend ist auf tiefe Druckverluste ($<700 \text{ Pa}$), hocheffiziente Ventilatoren und Elektromotoren bzw. eine hohe Gesamteffizienz ($<0.3 \text{ Wh}/(\text{m}^3/\text{h})$) und bedarfsgerechte Regelungen zu achten (CO_2 -basierte Regelung). Die genannten Massnahmen vermögen den Elektrizitätsbedarf bei Neubauten um 20 bis über $30 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ (bis zu minus zwei Drittel) und bei Erneuerungen um 70 bis $130 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$, in Einzelfällen um über $250 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ zu reduzieren. Ebenfalls rentabel ist der Einsatz von Wärmerückgewinnungs-Anlagen mit höherem Wirkungsgrad (über 85%).

In vielen Fällen, z.B. bei Gebäuden mit komplexen oder denkmalgeschützten Fassaden, engen Raumverhältnissen, sind **Wärmepumpen** oder Abluft-WP energetisch und technisch sinnvolle Lösungen, um Brennstoffe zu Heizzwecken zu substituieren. Höhere Investitionskosten können bei sehr effizienten Anlagen oder bei der Nutzung von Synergien mit der Gebäudekühlung durch günstigere Energie- und Betriebskosten amortisiert werden.

Im **Gebäudekontext** werden die Jahreskosten weniger vom Energie-Effizienzlevel als vielmehr vom angestrebten Komfortlevel bestimmt. Die Fälle mit geringer EKZ Elektrizität weisen sogar eher geringere Jahreskosten auf als diejenigen mit mittlerer und hoher Elektrizitäts-EKZ (Abbildung Z. 1) und zwar bei beiden unterschiedenen Komfortlevels (weniger bzw. mehr als 200 h mit im Vergleich zur Anforderung erhöhter Raumtemperatur). Bei gegebener Elektrizitäts-EKZ und bei gegebenem Komfort-Niveau ist der Verlauf der Jahreskosten als Funktion geringerer Brennstoff-EKZ als mehr oder weniger konstant zu bezeichnen, d.h. entsprechende Massnahmen sind - im Gebäudekontext - rentabel (bei 3% Realzinssatz, 7 Rp/kWh Brennstoffpreis, 17 Rp/kWh Elektrizitätspreis.).

Die Netto-Kosten könnten markant tiefer liegen oder sich in Netto-Nutzen verwandeln, wenn auf der Nutzenseite nebst den geringeren Energiekosten auch die **Komfortnutzen wirtschaftlich bewertet** würden (siehe nächstes Unterkapitel). Umgekehrt ist in den meisten Fällen mit höheren Nettokosten und höheren Bruttokosten zu rechnen, falls als Vergleichsbasis lediglich die laufenden (Energie-)kosten herangezogen werden. Wirtschaftlich sind diejenigen Massnahmen, deren spezifische Bruttokosten unter dem gemittelten künftigen Brennstoff- bzw. Elektrizitätspreis liegen (gemittelt über die Lebensdauer der Massnahme).

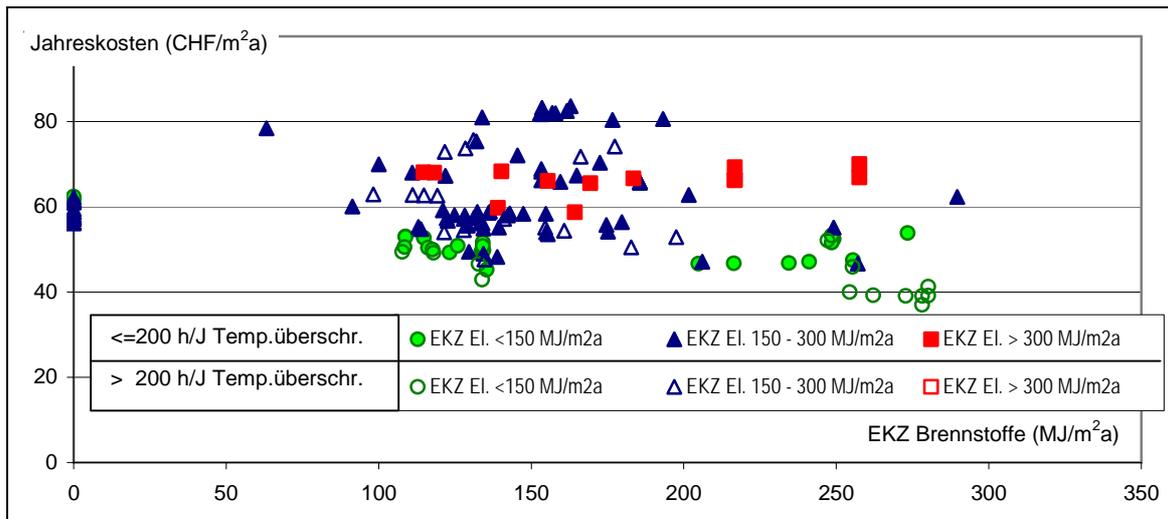


Abbildung Z. 1 Jahreskosten als Funktion der EKC Brennstoffe für verschiedene EKC Elektrizität und Komfortlevels (gemessen als Anzahl Stunden mit erhöhten Temperaturen in Südräumen) bei Neubauten

Fazit aus der ökonomischen Analyse

- (1) Bei Neubauten können sowohl im Gebäudebestand wie im Neubaufall Komfortniveau, Brennstoffbedarf und gebäudebezogener Elektrizitätsbedarf durch geeignete Massnahmen erheblich verbessert bzw. vermindert werden. Um den gesamten Strombedarf markant zu reduzieren, ist auch der Elektrizitätsbedarf der Arbeitshilfen (Bürogeräte) mit seinem meist hohen Anteil der internen Lasten und des Elektrizitätsbedarfs in die Massnahmen einzubeziehen. Energie-effiziente Lösungen im Neubau oder energetische Erneuerungen von Anlagen und Gebäudehülle im Gebäudebestand sind bei richtiger Planung entweder rentabel oder mit geringen Mehrkosten verbunden (0 bis wenige CHF/m²a).
- (2) Gleichzeitig mit einer hohen Brennstoff- und einer hohen Elektrizitätseffizienz kann auch ein hohes Komfortniveau erreicht werden. Komfort-Anforderungen oder Zusatznutzen erzeugende Installationen (aktive Kühlung, Lüftung) oder grundsätzliche architektonische Entscheide (Fassadentyp, Platzierung des Sonnenschutzes, architektonisches Design) haben weit grössere Auswirkungen auf die (brutto) Jahreskosten als Energie-Effizienzmassnahmen. Diese Auswirkungen betragen 10 bis einige wenige 10 CHF/m²a. Zum Vergleich: die jährlichen Vollkosten der energierelevanten Bauteile und Anlagen betragen bei Wirtschaftsgebäuden 50 bis 100 CHF/m²a, die gesamten Kapital- und Betriebskosten 300 bis 400 CHF/m²a und die Personalkosten etwa 5000 bis 10000 CHF/m²a. Wenn die Produktivität der in den Wirtschaftsgebäuden arbeitenden Menschen nur um wenige Promille durch überhitzte oder unterkühlte Räume oder unzureichende Luftqualität leidet, wird sich jede Wärmeschutz- oder energietechnische Massnahme am Erhalt der Arbeitsproduktivität orientieren müssen. Dies erhöht zum einen den Druck nach zusätzlichen Energiedienstleistungen (Kühlung, Lüftung) und verbessert zum anderen aufgrund der Zusatznutzen die Wirtschaftlichkeit von Energie-Effizienzmassnahmen markant. Die sehr grossen Zusatz-Nutzens energietechnischer Massnahmen in Wirtschaftsgebäuden werden derzeit weitgehend übersehen, vielleicht nicht zuletzt deshalb, weil diese Effekte weitgehend unbekannt sind und deshalb in der ökonomischen Bewertung energietechnischer Investitionen und organisatorischer Massnahmen bisher kaum Eingang gefunden haben.

Energie- und baupolitische Schlussfolgerungen

Die Kostenerhebungen und die Erarbeitung der Kostenkennwerte sind nicht nur zur ökonomischen Bewertung der Energieeffizienzmassnahmen an Wirtschaftsgebäuden von Interesse, sondern sie sind auch für die Energiepolitik aufschlussreich: Die beim Neubau und bei der Instandsetzung und Erneuer-

ung des Gebäudebestandes involvierten Planer und Gewerke arbeiten meist sehr arbeitsteilig. Dies führt für die Bauträger beim Anstreben von energie-effizienten Lösungen zu hohen Informations-, Such- und Entscheidungskosten. Die Vielzahl von Schnittstellen vermindert die Kostentransparenz und erschwert einen Systemblick sowie die Vergleichbarkeit von verschiedenen Investitionsoptionen infolge der unterschiedlichen Abgrenzungen und der oft nicht vernachlässigbaren „bauseitigen“ Kosten. Die Arbeitsteilung und der Wettbewerb in den Einzelleistungen führen dazu, die Leistungen mit möglichst geringen Investitionskosten zu erbringen. Die Investitionskostenminimierung steht aber mit der Minimierung der Lebenszykluskosten (und damit energie-effizienten Optionen) meist im Konflikt.

Einer weitergehenden Energieeffizienz stehen in erheblichem Umfang strukturelle und marktorganisatorische Hemmnisse im Weg. Diese sind **zielgruppenspezifisch** unterschiedlich.

- *Eine Erhöhung der Kenntnisse* auf Seiten der **Investoren, Planer und Baugewerke** über die rentablen Investitionsmöglichkeiten erfordert einen Abbau der Informationsasymmetrie, die Erhöhung der Markttransparenz und die Verminderung der Transaktionskosten. Zu fördern sind insbesondere *Initialberatungen und Umsetzungsberatungen* für Immobilienbesitzer (finanziell und ideell gestützt), *gezielte Mess- und Informationskampagnen seitens der Technologiehersteller für Planer und Technologienutzer* (vgl. Druckluftkampagne 2006, *klassische Aus- und berufliche Weiterbildungsangebote*, der *Ausbau der örtlichen, lernenden Netzwerke* (ähnlich den Modellen der EnAW und der energho) für Immobiliengesellschaften und Besitzer von Wirtschaftsgebäuden sowie *stärkere Verbreitung des Minergie-Labels* und die Umsetzung des *Gebäudepasses* in der Schweiz. Anschubfinanzierungen von örtlichen Netzwerken sind wegen der hohen Kosteneffizienz sehr empfehlenswert. Die genannten Massnahmen müssten von der Bundesverwaltung und den Kantonen in Zusammenarbeit mit den Berufsverbänden vorbereitet und umgesetzt werden, u.a. über die SIA-Normengebung und -anwendung. Abzudecken sind insbesondere die Themen hocheffiziente Beleuchtung, Elektromotoren, Lüfter, Kälteanlagen, Pumpen und sowie gesamtheitliche Anlagenkonzeption, integrierte Planung, Betriebsoptimierung und Gebäudemanagement.
- **Energieeffizienz-Anbieter, d.h. die Planer und Technologie-Lieferanten** sind auf der (marktorganisatorischen Ebene, auf der Ebene der *technischen Entwicklung, der Technologie- und Know-how-Diffusion* und des *Marketings* angesprochen: Weiter zu verbreiten sind Methoden und Standards für intelligente (lernende) dynamisierte Steuerungen und Regelung von Wirtschaftsgebäuden (z.B. CO₂-konzentrationsgeführte Lüftung, dynamische antizipierende und übergreifende Optimierung von Wärme-, Kühl- und Beleuchtungsbedarf inkl. Nutzung von Wettervorhersagen) sowie die hoch-effiziente Gebäudekühlung. Marketingseitig müssten Planer und Technologie-Lieferanten ihre technischen Lösungen mit Erlebniswerten, gesunderen Lebensformen, erhöhtem Komfort (Luft hygiene, thermische Behaglichkeit, verbesserte Ergonomie bei Beleuchtungen), verbesserte Arbeitsproduktivität und sozialem Prestige verknüpfen. Auch Aspekte wie verbesserter Schall- und Einbruchschutz, geringere Leerstände bei Vermietung und Leasing, sowie verbesserte Bonität und geringere Kreditzinsen wegen des Basler Abkommens sind den Investoren bewusst zu machen.
- Die Rolle der **Intermediäre** wird zuweilen unterschätzt, denn diese reduzieren durch *Normengebung oder Standardisierung* die Transaktionskosten oder beseitigen durch die Aus- bzw. die berufliche Fortbildung erhebliche Kenntnismängel. Normen, Standards und Benchmarks (z.B. Normen wie SIA 380/4 oder SIA 382/1 und Minergie-Anforderungen) bieten Entscheidungshilfen im technischen Bereich, besonders weil sie zwischen Standard- und zielorientierten Effizienzlösungen unterscheiden. Normen und Benchmarks können sowohl auf der Systemebene ansetzen (jährlicher Energiebedarf oder spezifische Energiekosten je m² und Jahr) wie auch auf der Ebene der Einzelkomponenten (letzteres, aus Gründen des Vollzugs und um den gegebenen Marktstrukturen mit hoher Arbeitsteilung und Spezialisierung und klein strukturierten Unternehmen Rechnung zu tragen). Normen und Empfehlungen (z.B. zu Grenz- und Zielwerten) dienen den Fachleuten in der Praxis als Orientierungshilfe, Planungsgrundlage und Basis für zivilrechtliche Verträge zwischen Bauträgern und Bauleistungserbringern. Das weitgehend privatrechtlich organisierte Normenwesen (z.B. SIA-Energycodes) sollte deshalb von staatlicher Seite eher stärker als bisher gestützt werden. Die Normen müssen nicht vollumfänglich gesetzgeberisch verankert, sondern können in *relativ einfach handhabbare Planungshilfen und Tools* umgesetzt werden. Zu empfehlen sind auch

die vermehrte Veröffentlichung von *spezifischen Fachpublikationen* (wie z.B. durch das frühere Programm RAVEL) mit technischen Inhalten und wirtschaftlichen Bewertungen (z.B. Lebenszykluskosten- und Kosten-Nutzenbetrachtungen) sowie die Entwicklung *integrierter Benchmarks* und *integrierender Planungswerkzeuge, Arbeitsunterlagen und Tools*, welche wesentliche Kosten-Nutzen-Relationen ermitteln und Optimierungsansätze häufig erst ermöglichen.

Wenngleich in allen dieser empfohlenen Aktivitäten die Selbstorganisationen der Wirtschaft und einzelne Unternehmungen die Hauptverantwortung übernehmen sollten, so mag eine öffentliche Initiative und finanzielle und ideelle Unterstützung seitens des Bundes, der Kantone oder grösserer Gemeinden sehr förderlich sein, weil diese Aktivitäten ein öffentliches Gut darstellen oder gesamtgesellschaftliche Vorteile mit sich bringen (Beschäftigung, Exportpotenziale, ökonomische Effizienz).

- **Gesetzgebung:** Technische und bauliche Vorschriften haben sich im Gebäudebereich, insbesondere beim Neubau, als effizientes und effektives Instrument erwiesen (z.B. Wärmeschutz mittels SIA 380/1 und MuKE). Der **Elektrizitätsbereich weist diesbezüglich einen Nachholbedarf auf**. Die Normen 380/4 und 382/1 bieten hierzu eine Grundlage. Indirekt entfalten solche Vorschriften auch eine nicht zu vernachlässigende Wirkung im Gebäudebestand, indem der induzierte technische Fortschritt auch bei Gebäude- und Anlagenerneuerungen zum Tragen kommt. Bei den Produkten der technischen Gebäudeausstattung könnten Benchmarks und Standards Exportvorteile erbringen. Der **Vollzug** ist effektiv, effizient und einfach zu gestalten (Umsetzungsarbeiten für die SIA 380/4 sind im Gang und zu intensivieren) und **mit anreizorientierten Komponenten**, z.B. flexiblen Bewilligungsverfahren, zu kombinieren. Zu nennen sind Grossverbrauchermodelle (MuKE Modul 8) sowie ein duales Vorgehen (vgl. Norm SIA 382/1, ZH, GE): bei Unterschreiten von Schwellenwerten von einfach zu messenden Grössen (z.B. installierte Leistung, Strömungsgeschwindigkeit, EKZ im Bestand) entfallen Bedarfsnachweis, Bewilligungspflicht VHKA oder Massnahmenplanung. Zu prüfen ist auch die Einführung einer Erneuerungspflicht für jeweils technikspezifisch festzulegende Re-Investitionsperioden. Mit einer möglichst schweizweiten Koordination der Vollzugsaspekte können Skaleneffekte bei der Fortbildung und gleiche Rahmenbedingungen in den Kantonen erreicht werden, was letztlich Markthemmnisse beseitigt.
- Die **öffentliche Hand** (Bund, Kantone, Gemeinden) hat einen erheblichen Teil des Bestandes der Nutzgebäude in ihrem eigenen Besitz. Gezielte Demonstrationsvorhaben bei der Gebäudeerneuerung für bestimmte Gebäudetypen (z.B. Schulen, Bürogebäude) sollten in jedem Kanton als **beispielhaftes Vorgehen der öffentlichen Hand** durchgeführt werden, um die grossen Anforderungen der Energie- und Klimapolitik glaubwürdig politisch vertreten zu können. Zudem könnten Elektrizitätsversorgungsunternehmen anreizorientierte Preismodelle anbieten (siehe z.B. EWZ), zumindest bis zum Mass eines least cost planning.

Da die Komponenten der Büroautomation in erheblichem Umfang zu den internen Lasten beitragen, aber international gehandelt werden, sollte ihre erforderliche Energieeffizienz in geeigneten Gruppen der IEA, des internationalen Normenschaffens und der EU intensiver thematisiert werden.

Aufgabe von *Forschung und Entwicklung* sollte es sein, die Zusammenhänge zwischen Wärmeschutz, internen Lasten, Gebäudetechnik und kostengünstigen Lösungen – in dieser Arbeit mit aufwändigen Simulationsrechnungen erstellt –, in einfache, schnell rechnende Planungswerkzeuge umzugliessen (z.B. Ergänzen des SIA Lüftung und Klima-Tools oder des Lichtkonfigurators mit Good practice Kostenkennwerten und Wirtschaftlichkeitsmodulen). Ebenfalls schnell aufzugreifen sind die hier erarbeiteten Ergebnisse in vorhandenen energiewirtschaftlichen Modellen (insbesondere den Komfortaspekt bei steigenden internen Wärmelasten durch Büroautomation, die tendenziell steigenden Aussen-temperaturen (Klimawandel) und die zunehmenden Komfortansprüche von Gebäudenutzern und gewünschte Produktivitätsfortschritte privater und öffentlicher Arbeitgeber).

Zusammenfassung

Ausgangslage, Zielsetzung und methodisches Vorgehen

In der Schweiz liegen u.a. grosse Energieeffizienzpotenziale in der Verminderung des Energiebedarfs im Gebäudebereich. Für die Wohngebäude ist der Stand der Kenntnisse zu den Potenzialen, Kosten und begleitenden Nutzen in der Schweiz durch jüngere Untersuchungen vergleichsweise differenziert und informativ (Jakob u.a. 2002, Jakob 2003). Die Informationen für Gebäude des *Dienstleistungs-, Gewerbe- und Industriesektors* (im Nachfolgenden Wirtschaftsgebäude genannt) sind noch sehr gering bzw. veraltet (Basler und Hofmann, 1992); die für die Wohngebäude erarbeiteten Ergebnisse sind jedoch nur bedingt auf die Wirtschaftsgebäude übertragbar. Insbesondere kommt bei den meisten Gebäudetypen der Wirtschaftsgebäude dem *sommerlichen Wärmeschutz und den Komfortaspekten* eine wesentlich grössere Bedeutung zu, weil hohe interne Wärmelasten, die Produktivität der in den Wirtschaftsgebäuden arbeitenden Menschen und der Nutzerkomfort (z.B. Kunden, Patienten, Tagungsteilnehmer) erhöhte Anforderungen an den Komfort stellen. Dies führt zu anderen energetischen Referenzwerten, zu vielfältigeren Massnahmemöglichkeiten und entsprechenden Interaktionen, insbesondere im Bereich des sommerlichen Wärmeschutzes und der Kühlung, Klimatisierung und Beleuchtung.

Ausgehend von dieser Ausgangslage verfolgte das Projekt folgende *Hauptziele*:

- Grenzkosten mit heutigem Kostenstand: Die Grenz- und Durchschnittskosten für die Anwendung energieeffizienter Massnahmen (winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz sowie Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik und Beleuchtung) sollten für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis gestellt werden. Hierbei sollte zwischen Neubau und Erneuerung unterschieden werden.
- Zusatznutzen: Für einige typische Fälle sollten die möglichen Zusatznutzen qualitativ und – so weit möglich – auch quantitativ (in Einzelfällen auch monetär) dargestellt werden. Als Mass dienen Aussagen zur Komfortveränderung beim Ergreifen von Energie-Effizienzmassnahmen.
- Als Projektergebnis sollten schliesslich Handlungsempfehlungen zuhanden der relevanten Akteure formuliert werden. Dazu gehören Investoren und Planer von Neubauten, Betreiber und Besitzer von bestehenden Gebäuden, die Baubranche im Bereich der Gebäudehülle und der Haustechnik, Akteure im Bereich energietechnischer und -wirtschaftlicher Forschung.

Methodisch behandelte die Analyse den gebäudebezogenen Energiebedarf sowie Massnahmen zu dessen Reduktion auf der Ebene von Einzelkomponenten (Wärme- und Sonnenschutz bei der Gebäudehülle, Beleuchtung, Lüftung, Kühlung, diverse Technik, z.B. Heizungspumpen) und für den jeweiligen Gebäudetyp als Ganzes. Die *Gebäudetypen* unterscheiden sich bzgl. ihrer Architektur, Nutzung, Bauweise und Gebäudetechnik-Ausstattungsgrad. Unterschieden werden insbesondere Gebäude mit hohen und geringen internen Lasten, hohen und geringen Glasanteilen sowie solche ohne und mit Lüftung und/oder aktiver Kühlung. Ausgangspunkt für die Kostenbetrachtungen bilden Referenzfälle, welche vom gesetzlich vorgeschriebenen Baustandard und der aktuellen typischen Bauweise (beim Neubau), vom heute üblicherweise anzutreffenden Zustand des Gebäudebestandes (vor einer Erneuerung) und von heute üblichen Instandsetzungs- und Erneuerungsmassnahmen ausgehen.

Um die *Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Gebäude- und Technikkomponenten* adäquat abzubilden, wurden für die definierten Gebäude- und Massnahmenkombinationen Ganzjahressimulationen mittels des *Simulationsprogramms IDA-ICE* durchgeführt, welches zu jedem Zeitschritt die gebäudephysikalischen Phänomene abbildet (Wärmeverluste, -gewinne, und -speicherung, Beleuchtungsbedarf, Elektrizitätsbedarf für Kühlung, Luftförderung). Hieraus resultiert der jährliche Energiebedarf, aufgeteilt auf die verschiedenen Formen (Elektrizität, Wärme) und die verschiedenen Nutzenergieformen (Gebäudeheizung, Lüftung, Kühlung, Beleuchtung) und interne Lasten. Anhand der

Simulationsergebnisse lässt sich auch das Niveau des thermischen Diskomforts, der Dauer des Überschreitens angenehmer Temperaturen ermitteln (jährliche Stundenzahl mit Innentemperaturen oberhalb eines definierten Grenzwertes gemäss Entwurf SIA 382/1).

Die erforderlichen Kostenerhebungen für Energieeffizienzmassnahmen im Bereich Fenster, Verglasungen, Wärmedämmungen, Beleuchtung, Lüftung, Klimatisierung, Sonnenschutz, Steuerung/Regelung, wurden bei Ingenieur-, Planungs- und Bauleistungsunternehmen in Form von Kostenkennwerten erhoben. Bei den gebäudetechnischen Anlagen wurden auch technische Alternativen berücksichtigt (z.B. Lampen und Leuchten unterschiedlicher Effizienz, Lichtregelung, „klassische“ Rückkühlung, hybride Rückkühler, Kleinklimageräte, Zuluftkühlung, Umluftkühler, Kühldecken, TABS).

Abschliessend erfolgten die Grenzkostenrechnungen und Kosten-Nutzendarstellungen für die definierten Gebäude- und Massnahmenkombinationen. Die Jahreskosten und deren Struktur (Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten) wurden basierend auf den erhobenen Investitionskosten (Annuitätenmethode) und der spezifischen Energie- und Leistungsbedarfswerte (Gebäudesimulationen) berechnet. Zur Beurteilung der verschiedenen Massnahmen wurden die Jahreskosten den Komfortwerten gegenüber gestellt, dies unter Berücksichtigung der sich ergebenden Interdependenzen, insbesondere zwischen Wärme- und Überhitzungsschutz bzw. zwischen Wärme- und Strombedarf.

Energiebedarf der Gebäudetypen und energetische Wirkung der Massnahmen

Die Gebäudetypen wurden derart definiert, um der Vielfalt der Gebäude in den Bereichen Neubau und Bestand gerecht zu werden und weisen demzufolge markante Unterschiede bzgl. Energiebedarfsstruktur auf, je nach ihrer architektonischen und gebäude- und energietechnischen Konfiguration. Ausgehend vom Referenzfall wurden Massnahmenbündel definiert und zwar dergestalt, um die Auswirkungen verschiedener Strategien sichtbar machen zu können (z.B. Gebäudehüllen- gefolgt von Gebäudetechnikmassnahmen oder umgekehrt, Brennstoff- gefolgt von Elektrizitätsmassnahmen oder umgekehrt). Gemäss der Simulationsergebnisse variieren die resultierenden Energiekennzahlen (EKZ) Heizen bzw. Brennstoffe und Elektrizität beträchtlich (Brennstoffe; 100 bis 1000 MJ/m²a; Elektrizität; 80 bis gut 500 MJ/m²a; vgl. Tabelle Z.3).

	Neubau				Gebäudebestand			
	Standard von	bis	Good practice von	bis	Ausgangslage von	bis	Erneuert von	bis
Elektrizität								
Interne Lasten (Geräte, ohne Bel.)	40	120	30	60	40	120	30	60
Beleuchtung	60	100	25	40	100	160	40	80
Lüftung (Luftförderung)	25	45	15	25	160	290	15	30
Kühlung	30	110	10	30	20	50	10	30
Gesamt ohne Wärmepumpen (*)	100	350	80	140	180	530	80	160
Heizen (WP)	30	100	20	35	k.A.	k.A.	25	40
Brennstoffe								
Lufterwärmung in Lüftungsanlagen	50	100	15	30	260	400 (**)	20	35
Übriger Heizwärmebedarf	90	280	70	120	380	600	80	140
Gesamt Brennstoffe (*)	140	280	85	140	430	1000 (**)	100	150
(*) Da nicht alle Kategorien bei allen Gebäuden vorkommen und sich jeweils nicht alle je Minimal- und je alle Maximalwerte kombinieren, entspricht der Gesamtwert nicht der Summe der jeweiligen Spalten								
(**) Bei 24h-Betrieb während 7 Tagen pro Woche bis 1200 MJ/m ² a (LA) bzw. bis 1750 MJ/m ² a (Gesamt Brennstoffe)								

Tabelle Z.3 Bereiche der Energiekennzahlen (Endenergie) bei Neubau und Gebäudebestand (MJ/m²a)

Auch die Struktur der Energiekennzahl weist grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Gebäudetypen auf. Je nach Konstellation kann es dabei zu Verschiebungen in der Rangfolge der einzelnen Energiedienstleistungen kommen. Insbesondere ist darauf hinzuweisen, dass die Gebäudekühlung mit einem Bedarf von 10 bis 30 MJ/m²a bei guter Konzeption, Ausführung und Betrieb im Vergleich zu den anderen Stromanwendungen keine überragende Rolle beim Elektrizitätsbedarf einnimmt. Der Bedarf für Beleuchtung oder Luftförderung kann grösser sein, v.a. im Gebäudebestand.

Entsprechend der Gebäudevielfalt sind auch die möglichen Energieeffizienzmassnahmen sehr vielfältig. Je nach Typ und Eingriffstiefe unterscheiden sich die einzelnen Massnahmen stark in ihrer energetischen Wirkung (Abbildung Z.2). Zwischen der Reduktion des Elektrizitäts- und des Brennstoffbedarfs (und der Erfüllung der Komfortanforderungen oder von Komfortverbesserungen) bestehen zum Teil Zielkonflikte, zum Teil können aber auch Synergieeffekte genutzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen exergetischen und energiewirtschaftlichen Wertigkeit der Energieträger Brennstoffe und Elektrizität wurde die energetische Wirkung der Massnahmen hinsichtlich des entsprechenden Substitutionsverhältnisses analysiert, um es dem entsprechenden Verhältnis der Elektrizitätserzeugung gegenüber stellen zu können. Für letztere beträgt dieses in Europa typischerweise rund 3, könnte sich jedoch künftig – je nach Erneuerung des europäischen Kraftwerkparks – dem Wert 2 annähern. Vorzuziehen sind Massnahmen, die sich unterhalb der entsprechenden Trennlinie befinden (siehe Abbildung Z.2). Folgende sechs Bereiche werden unterschieden:

- Quadrant Q3: Sowohl der Brennstoff- wie der Elektrizitätsbedarf werden reduziert. Massnahmen in diesem Bereich können aus energetischer und exergetischer Sicht vorbehaltlos empfohlen werden. Typische Beispiele für diesen sehr energieeffizienten Bereich sind bedarfsgerechte Betriebsweisen bei Gebäudelüftung und -kühlung (Betriebszeiten, bedarfsgerechte Luftmengen, nicht zu geringe Solltemperaturen bei der Kühlung) sowie selektivere Wärmeschutzfenster (tieferer U-Wert bei konstantem oder höherer g-Wert und entsprechender Lichttransmission) oder entsprechender Sonnenschutz.
- Quadrant Q2.2: Einige Effizienzmassnahmen bei Elektrizitätsanwendungen erhöhen den Heizwärmebedarf wegen geringerer Sonnenenergienutzung oder wegen geringerer freigesetzter Wärme in der Heizperiode (z.B. Beleuchtung). Hierbei ist allerdings der Anstieg des Heizwärmebedarfs betragsmässig höchstens etwa halb so hoch wie der Stromrückgang. Die Reduktion einer kWh Elektrizität kann also mit einem zusätzlichen Brennstoffeinsatz von 0.5 kWh oder weniger erreicht werden. Dies ist primärenergieseitig netto um einen Faktor drei bis vier weniger; d.h. solche Massnahmen sind sehr energieeffizient. Auch einige Fenster-, Verglasungs- oder Sonnenschutzmassnahmen liegen im günstigen Bereich Q2.2.
- Quadrant Q2.1: Bei einigen anderen hingegen ist der in Kauf zu nehmende Brennstoffbedarf mindestens 2 bis 3-mal höher als der Rückgang des Strombedarfs. Diese Massnahmen sind aus rein exergetischer Sicht nicht zu empfehlen, sind teilweise jedoch erforderlich, um die Anforderungen des thermischen Komforts einhalten zu können.
- Quadrant Q4.1: Umgekehrt wird bei einigen gebäudehüllen- und gebäudetechnischen Massnahmen Wärme- bzw. Brennstoffenergie durch Elektrizität substituiert. Typische Beispiele für Massnahmen im empfehlenswerten Bereich unterhalb der Trennlinie mit kritischem Substitutions-Verhältnis sind Wärmepumpen anstelle von brennstoffbasierter Wärmeerzeugung, wobei bei Planung, Ausführung und Betrieb auf eine entsprechende hohe Qualität zu achten ist (JAZ>3). Ein Fensterersatz liegt im Gebäudebestand in aller Regel ebenfalls im Quadrant Q4.1 und aufgrund der mittlerweile erreichten hohen Selektivität bei den Verglasungen gilt dies meistens auch beim Neubau. An der Grenze liegt die architektonische Massnahme eines geringeren Fensteranteils, bei welcher der Heizwärmebedarf markant reduziert wird, der Strombedarf aufgrund des höheren Beleuchtungsbedarfs netto zunimmt. Ebenfalls an der Grenze und teilweise darüber liegen (zusätzliche) Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) oder Abluft-WP. Lüftungsanlagen sind aus exergetischer Sicht also nur bei sehr hoher Elektrizitätseffizienz inkl. bedarfsgerechter Regelung zu empfehlen (Druckverlust möglichst < 700 Pa, Elektrizitätsbedarf <0.34 Wh/(m³/h)).

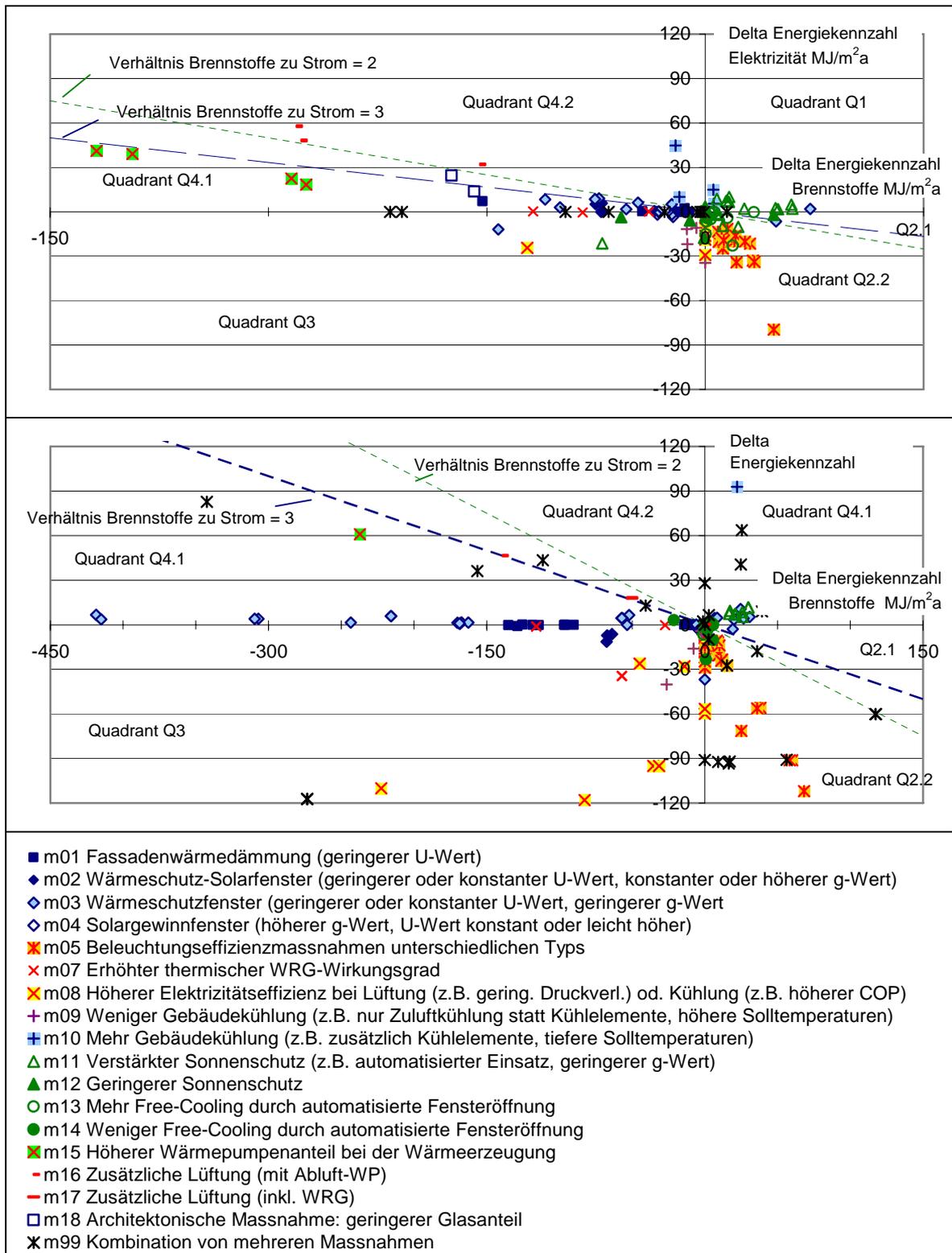


Abbildung Z.2 Energetische Wirkung der Massnahmen (Delta Energiekennzahl Elektrizität und Energiekennzahl Brennstoffe) im Bereich Neubau (oben) und Gebäudeerneuerung (unten).

- Quadrant Q1: Bei einem Teil der Massnahmen nehmen sowohl Brennstoff- als auch Strombedarf zu. Es sind dies typischerweise Komfortmassnahmen, z.B. zusätzliche Kühlung oder Sonnenschutzmassnahmen, welche insbesondere in Gebäuden ohne Kühlung erforderlich sind, um den Komfortanforderungen Rechnung zu tragen (betragsmässig meistens unter 30 MJ/m²a).

- Zu guter Letzt sind die Massnahmen mit klarer Wirkung zu nennen, welche im Wesentlichen entweder nur den Brennstoffbedarf reduzieren (z.B. erhöhter thermischer Wirkungsgrad der WRG) oder nur den Strombedarf (z.B. effizientere Ventilatoren, Pumpen, geringere Druckverluste, höhere JAZ bei der Gebäudekühlung); diese liegen auf der x- oder der y-Achse.

Pro Gebäudetyp stellen die definierten Massnahmenbündel eine kumulierte Folge von zunehmend mehr und/oder zunehmend weitergehenden Massnahmen dar, d.h. die Wirkung der einzelnen Massnahmen kumuliert sich mit den jeweils vorangehenden Massnahmen. Jedes dieser Bündel (und der Referenzfall) ist durch die Energiekennzahl Brennstoff und die Energiekennzahl Elektrizität charakterisiert (siehe Abbildung Z.3, wobei jedes Kürzel bzw. jede Signatur einen Gebäudetyp darstellt). Die erkennbaren strukturellen Verläufe weisen markante Unterschiede auf. Während bei einigen Gebäudetypen bei der Energiekennzahl Elektrizität als Funktion der abnehmenden Energiekennzahl Brennstoffe eine Abnahme zu verzeichnen ist, nimmt bei anderen Gebäudetypen der Strombedarf als Funktion der abnehmenden Brennstoff-EKZ zu.

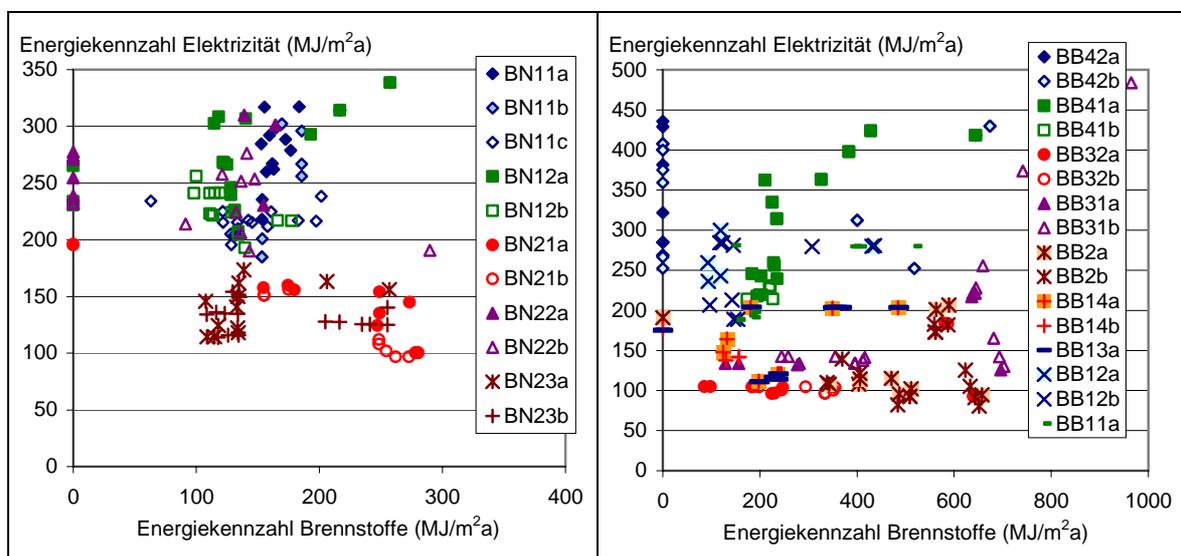


Abbildung Z.3 Energiekennzahl Elektrizität als Funktion der Energiekennzahl Brennstoffe für die verschiedenen Gebäudetypen im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts). Die Abkürzungen in der Legende beziehen sich auf die Definition der Gebäudetypen gem. Tabelle 96

Gebäudesimulationen für Energie- und Komfortbetrachtungen

Das Gebäude als Ganzes

A priori könnte man vermuten, dass zur Vermeidung von Überhitzung im Sommerhalbjahr allenfalls ein höherer Elektrizitätsbedarf in Kauf genommen werden muss (Gebäudekühlung, evtl. Lüftung) und dass die Überhitzung mit verbesserter Wärmedämmung oder mit neuen Wärmeschutz-Fenstern abnimmt. Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt jedoch, dass Überhitzung und der Elektrizitätsbedarf weit stärker von der Konfiguration bzgl. interner Lasten sowie aktiver und passiver Kühlung bestimmt werden (vgl. Abbildung Z.4):

- Bei vollständiger Kühlung (Kühlung der Zuluft und Kühlelemente) und genügend tiefen Solltemperaturen (z.B. 23°C) werden die Komfortanforderungen eingehalten). Ohne Kühlung ist der Grenzwert der Stundenzahl zu hoher Raumtemperaturen deutlich überschritten, sowohl bei hohen wie bei geringen internen Lasten, sowohl bei hohem wie bei tiefem Elektrizitätsbedarf.
- Bei gegebener Konfiguration bzgl. interner Lasten sowie aktiver und passiver Kühlung steigt die Stundenzahl überhörter Raumtemperaturen mit erhöhtem Wärmeschutz aufgrund Überhitzung

an, zumindest für die Konfigurationen ohne vollständige Kühlung. Bei Situationen ohne Free Cooling (z.B. durch Fensteröffnung) und bei Gebäuden mit hohen internen Lasten ist dies ausgeprägter als bei solchen mit geringen internen Lasten.

Fazit: Ohne Kühlung oder Free Cooling (z.B. durch Fensteröffnung, Brüstungsgeräte, Luftklappen etc.) kann der thermische Komfort auch in Fällen mit geringen internen Lasten häufig nicht sichergestellt werden. Eine Zuluftkühlung ist bei den angenommenen Luftwechselraten, die sich am luft-hygienischen Bedarf orientieren, weder bei hohen noch bei geringen internen Lasten zur vollständigen Erfüllung der Komfortanforderungen ausreichend, es sei denn in Kombination mit Free Cooling.

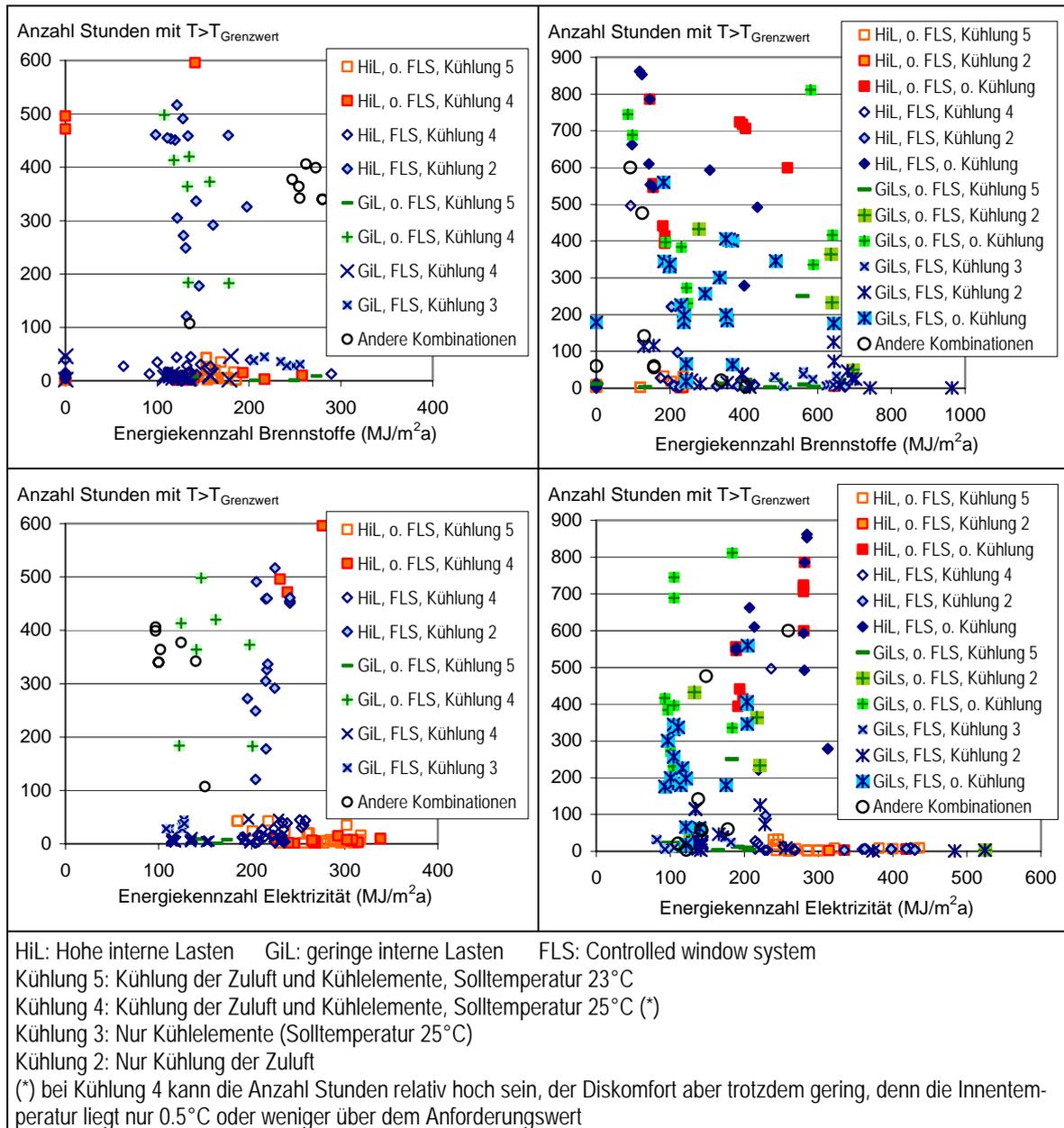


Abbildung Z.4 Anzahl Stunden mit Überhitzung (Anforderungen gemäss Entwurf SIA 382/1) als Funktion der Energiekennzahlen Brennstoffe (obenstehende Diagramme) und Elektrizität (unten stehende Diagramme) für Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts)

Die **internen Wärmelasten** durch Personen und Elektrogeräte haben einen hohen Einfluss auf die Komfortbedingungen, und zwar nicht nur während des Hochsommers, sondern auch während langer Perioden der Übergangszeit. Dies gilt nicht nur für Gebäude mit hohem Fensterflächenanteil, sondern auch für den Gebäudebestand mit Bauweise und geometrischen Verhältnissen ähnlich denjenigen von Wohngebäuden. Zur Reduktion der unkomfortablen, d.h. produktivitätsvermindernden Zustände kommt der Reduktion der internen Lasten eine sehr hohe Bedeutung zu (z.B. sehr energie-effiziente Beleuchtungen, effiziente PCs und andere Bürogeräte). Bei dichter Personenbelegung und damit verbundener hoher Gerätedichte sind akzeptable Komfortzustände jedoch nur durch kompensatorische Massnahmen zu erreichen: aktive Kühlung, Lüftungsanlagen inkl. Nachtauskühlung, Nachströmöffnungen und Brüstungsgeräte, automatische oder evtl. manuelle Fensteröffnung).

Die Massnahmen im Einzelnen

Wie oben erläutert, sind Interaktionseffekte zwischen verschiedenen elektrizitätsbezogenen Energiedienstleistungen (z.B. Beleuchtung, Bürogeräte und Kühlen) sowie zwischen Wärmeschutz und Komfort derart gross, dass das primäre Ziel der Massnahme in ihr Gegenteil verkehrt werden kann. Im Einzelnen können folgende Fazits festgehalten werden:

Fassadenwärmeeinsparungen und die damit verbundenen geringeren U-Werten führen zu einer deutlichen Reduktion des Wärmeenergiebedarfs, besonders bei der Erneuerung des zuvor nicht wärme-geschützten Gebäudebestandes (je nach Flächenverhältnis zur EBF und Dämmstandard um 10 bis 25 MJ/m²a im Neubaubereich und 100 bis 150 MJ/m²a im Gebäudebestand). Der Preis für diese Wärmeenergiebedarfsreduktion ist eine Verschlechterung der sommerlichen Komfortsituation, sofern im Gebäude keine kompensatorischen Massnahmen bereits installiert sind (z.B. Kühlung) oder getroffen werden (Reduktion der internen Lasten, Lüftung, automatisierte Fensteröffnung, Nachtauskühlung, verbesserter Sonnenschutz, Verglasungen mit geringeren g-Werten). Die Anzahl Stunden mit Temperaturgrenzwertüberschreitung kann um einige Duzend bis zu wenigen hundert Stunden ansteigen (siehe Abbildung Z.5). Derartige Wirkungen können auch im Neubaufall auftreten.

Fenster oder Verglasungen: qualitativ lassen sich die oben gemachten Aussagen bzgl. Heizwärmebedarf und Komfort auf den Fensterersatz bzw. auf Verglasungen mit geringeren U-Werten (und einigermassen konstanten g-Werten) übertragen (Wärmeenergiebedarfsreduktion bis zu 50 MJ/m²a beim Neubau und gut 400 MJ/m²a beim Fensterersatz, Erhöhung der Stunden mit zu hohen Temperaturen um einige hundert Stunden/Jahr). Der Anstieg der Stundenzahl mit überhöhten Raumtemperaturen kann verringert oder vermieden werden, indem Gläser mit geringeren g-Werten eingesetzt werden. Massnahmen im Fenster- bzw. Verglasungsbereich haben zudem Auswirkungen auf den Beleuchtungs- und den Kühlbedarf. Der Netto-Effekt auf den Elektrizitätsbedarf ist jedoch relativ gering und kann je nach Konstellation positiv oder negativ sein (mit -15 bis +12 MJ_e/m²a). Ausgeprägte Solar-gewinnfenster (g-Wert > 55%) und ausgeprägte Sonnenschutzfenster (g-Wert < 40%) sind nur in speziellen Fällen zu empfehlen (letztere z.B. aus Gründen der Elektrizitätseffizienz bei Gebäuden mit hohen Glasanteilen, ungenügendem variablen Sonnenschutz oder aus Gründen des Überhitzungsschutzes bei Gebäuden ohne Kühlung).

Auch der **Verglasungsanteil** hat Auswirkungen auf den Beleuchtungs- und den Kühlenergiebedarf sowie auf den Wärmebedarf und die sommerliche Überhitzung. Als Funktion des höheren Glasanteils nimmt der Wärmeenergiebedarf in der Regel markant zu (z.B. um 50 bis 60 MJ/m²a bei einer Erhöhung des Fensteranteils von 50% auf 80% wegen der schlechteren Wärmedämmeigenschaften der Fenster und zusätzlicher Wärmebrückeneffekte). Der Netto-Elektrizitätsbedarf hingegen nimmt mit zunehmendem Glasanteil in der Regel ab (15 bis 25 MJ_e/m²a), da die Reduktion des Beleuchtungsenergiebedarfs betragsmässig grösser ist als der zunehmende Kühlenergiebedarf (siehe auch SIA D0176). Voraussetzung dafür sind der bedarfsgerechte Einsatz der Beleuchtung (manuell oder geregelt), zwischen- oder aussen liegender Sonnenschutz und mittel- bis sehr effiziente Gebäudekühlung. Bei sehr hohen Glasanteilen (70% und mehr) kann es allerdings dann zur sehr hohen Energiemehrverbräuchen führen, wenn Abweichungen vom Sollverhalten von Sonnenschutz und Fensteröffnung (z.B. durch Benutzereinflüsse) oder beim Betrieb von Kühl- und Lüftungsanlagen zu beobachten sind. Hohe Glasanteile verursachen zudem wenig komfortable Situationen, auch wenn die Raum-

temperatur die gestellten Anforderungen erfüllt, weil übermässig warm (Sonnentage) oder kalt strahlende Flächen und damit verbundene Kaltluftströme als unangenehm empfunden werden.

In der Schnittmenge zwischen Kühlenergie- und Beleuchtungsbedarf steht der **Sonnenschutz**, welcher indirekt zudem den Wärmebedarf beeinflusst. Dabei ist zwischen statischem Sonnenschutz (Verglasungen mit tiefen g-Werten) und dynamischem Sonnenschutz (Storen, Lamellen) zu unterscheiden. Der statische Sonnenschutz hat den Vorteil, dass der Sichtkontakt gegen aussen besser und länger gewährleistet ist und die Auswirkungen von – evtl. unabsichtlich – offen stehendem dynamischem Sonnenschutz auf Energiebedarf und Komfort geringer sind. Ein dynamischer Sonnenschutz hat den Vorteil, dass dieser besser auf wechselnde (äussere oder innere) Bedingungen zu reagieren vermag, reduziert aber häufiger den Sichtkontakt gegen aussen. Sonnenschutzmassnahmen reduzieren die Anzahl Stunden überhöhter Raumtemperaturen in nicht gekühlten oder ungenügend gekühlten Gebäuden (typischerweise um bis zu 200 h/Jahr). In gekühlten Gebäuden mit hohem Glasanteil wird der thermische Komfort aufgrund geringerer Strahlung verbessert. Bzgl. Elektrizitätsbedarf bewirkt ein verstärkter Sonnenschutz (geringere g-Werte, geringere Schwellenwerte) je nach Gebäudekonstellation einen geringen Anstieg (0 bis 10 MJ/m²a) bei nicht oder sehr effizient gekühlten Gebäuden, da in diesen Fällen der höhere Beleuchtungsbedarf den geringeren Kühlelektrizitätsbedarf überwiegt. Bei aktiv gekühlten Gebäuden mit hohem Kühlenergiebedarf und mit mittlerer oder geringer Kühleffizienz resultiert eine geringe Reduktion (0 bis -20 MJ/m²a, siehe auch Abbildung Z.2). Der zusätzliche Wärmeenergiebedarf beträgt typischerweise 10 bis 20 MJ/m²a (bei Annahme von über das ganz Jahr konstanten Sonnenschutz-Einsatzkriterien). Fazit: der Sonnenschutz Einsatz sollte dynamisch reguliert werden mit Priorität der Tageslichtnutzung und Reduktion des Beleuchtungsbedarfs im Winter und während der Übergangszeit (Voraussetzung sind geregelte Beleuchtungssysteme oder sehr bewusst agierende Nutzende) und mit Priorität stark abschirmender Sonnenschutz bei lang aneinanderfolgenden Sonnentagen im Hochsommer). Im Bereich des dynamischen Sonnenschutzes sind beträchtliche Effizienz- und Komfortpotenziale zu erwarten, wobei es der weiteren Forschung und Entwicklung und der Verbreitung entsprechender Kenntnisse in die Praxis bedarf.

Die Beleuchtung ist ein typisches Beispiel einer multifunktionalen Energiedienstleistung: der primäre Zweck der Beleuchtung ist eine angemessene Beleuchtungsstärke, harmonische Leuchtdichteverteilung, natürliche Schattigkeit, geeignete Lichtfarbe, befriedigende Farbwiedergabe, aber auch die zu erfüllenden Anforderungen (z.B. Schutz vor störender Reflexbildung und Direktblendung, Flimmerfreiheit); sekundäre Zwecke sind innenarchitektonische Ziele (z.B. Repräsentativität, Design-Qualitäten, optische Akzente). Die Beleuchtung hat zudem multidimensionale energetische Auswirkungen (Lichtqualität, Wärmeabgabe, Kühlbedarf). Aus energetischer Sicht und hinsichtlich des thermischen Komforts kommt der Beleuchtung besonders in Bürogebäuden und weiteren Gebäudetypen eine erhebliche Bedeutung zu.⁴ Dies gilt besonders bei alten Beleuchtungen und bei vergleichsweise geringem Tageslichtangebot (Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung 100 bis 150 MJ/m²a). Der Elektrizitätsbedarf kann dank des technischen und fachlichen Fortschritts (Planung, effizientere Leuchten, Lampen und Vorschaltgeräte, bedarfsgerechten Konzepten und Lichtregelungen) markant reduziert werden, sowohl im Neubau (gesamthaft, in Zusammenspiel mit geeignetem Sonnenschutz, um 25% bis 70% bzw. um 20 bis 60 MJ/m²a) als auch insbesondere bei Erneuerungen (gesamthaft um 40% bis 70% bzw. 40 bis 80 MJ/m²a). Mittels Einzelmassnahmen lassen sich Gewinne von 15 bis 35 MJ/m²a (Neubau) bzw. von 15 bis gut 50 MJ/m²a erzielen. Erreicht wird dies durch geringere installierte spezifische Leistungen (weniger als 10 W/m² statt 15 bis 18 W/m²), durch geringere Volllaststunden (Reduktion um einige hundert Stunden pro Jahr) oder durch eine Kombination der beiden. Energie-effiziente Beleuchtungen erzeugen zudem indirekte energetische Nutzen, indem sie den Elektrizitätsbedarf für Kühlung reduzieren (daraus ergibt sich eine Zusatzwirkung der Beleuchtungsmassnahmen von 10% bis 30%). Der thermische Komfort verbessert sich bei Beleuchtungsmassnahmen erheblich, v.a. bei nicht gekühlten Gebäuden: die Anzahl Belegungsstunden mit erhöhten Temperaturen wird um 50 bis zu 300 h/Jahr reduziert (d.h. eine Arbeitswoche bis mehr als ein Arbeitsmonat).

⁴ Bei Gebäuden mit ansonsten tiefen internen Lasten macht die Beleuchtung einen hohen Anteil aus und bei Gebäuden mit hohen internen Lasten ist der marginale Beitrag der Beleuchtung zu kritischen Komfortsituationen von besonderer Bedeutung.

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung: Der primäre Nutzen von Lüftungsanlagen besteht im Sicherstellen der Raumluftqualität, insbesondere in Fällen mit geringer Eignung für Fensterlüftung (Gruppen- oder Grossraumbüro, Hörsäle, evtl. Schulräume, lärm- oder schadstoffbelastete Lage), der sekundäre Nutzen in der Verringerung des Wärmebedarfs (typischerweise um 50 bis 80 MJ/m²a). Bei geeigneter Regelung können Lüftungsanlagen auch zur Verringerung der Stundenzahl mit überhöhten Raumtemperaturen beitragen. Während langer Perioden der Übergangszeit und während eines Teils des Sommers ist dies auch ohne aktive Zuluftkühlung der Fall. Der typische Elektrizitätsbedarf von neuen Anlagen beträgt bei angepasstem Luftwechsel und Betriebszeiten für die Luftförderung 20 bis 40 MJ/m²a, bei effizienten Anlagen weniger als 10 bis 20 MJ/m²a und für die Zuluftkühlung 7 bis 20 MJ/m²a. Eine Erhöhung des Luftwechsels über das lufthygienisch Erforderliche hinaus ist aus energetischer und regelungstechnischer Sicht kritisch zu beurteilen. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob wasserbasierte Kühlsysteme oder mit Bedacht eingesetzte Kleinklimageräte energetische Vorteile aufweisen. Generell ist auf möglichst geringe Druckverluste, bedarfsgerechte Regelung (CO₂-Konzentration oder Präsenz basiert) und auf hocheffiziente Ventilatoren zu achten, auch bei Neuanlagen beträgt allein dieses technische Effizienzpotenzial 30% bis 50%.

Erneuerung von Lüftungsanlagen: Obwohl ein beachtlicher Teil der Lüftungen im Gebäudebestand entweder erneuert oder mit Wärmerückgewinnungen nachgerüstet wurde, bestehen in diesem Bereich nach wie vor Energieeffizienzpotenziale, und zwar sowohl wärme- wie stromseitig. Das technische Elektrizitätseffizienzpotenzial bei Lüftungsanlagenerneuerungen beträgt aufgrund geringerer Druckverluste und effizienterer Ventilatoren 50 bis 80%. Bei angepassten Betriebszeiten entspricht dies bis 70 bis 100 MJ/m²a. Bei bestehenden Anlagen ist eine Reduktion des Energiebedarfs durch Betriebsoptimierungsmaßnahmen, d.h. durch das Anpassen der Betriebszeiten und der Luftvolumenströme möglich. Damit lässt sich der Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung um typischerweise um einen bis zwei Drittel (je nach Ausgangslage um 30 bis 120 MJ/m²a) sowie der Wärmebedarf um 50 bis 250 MJ/m²a reduzieren.

Besteht bereits vor der Re-Investition eine **Zuluftkühlung** (evtl. inkl. Entfeuchtung), lässt sich bei Erneuerungen von Lüftungsanlagen ein weiteres Effizienzpotenzial nutzen, indem die Luftwechselraten und die Zulufttemperaturen **bedarfsgerecht** angepasst werden. Die Luftwechselraten im Anlagenbestand liegen meistens markant über den lufthygienischen Anforderungen (typischerweise um das Zwei- bis Dreifache). Parallel zur Reduktion der Luftwechselraten reduziert sich der Kühlenergiebedarf (gleiche Zulufttemperaturen vorausgesetzt). Der Elektrizitätsbedarf der Zuluftkühlung lässt sich von beobachteten Werten von über 50 MJ/m²a auf 10 bis 20 MJ/m²a reduzieren. Wird die Luftwechselrate bei Lüftungen mit Zuluftkühlung reduziert, kann sich jedoch die thermische Komfortsituation (bzgl. Überhitzung) verschlechtern, was u.U. kompensatorische Massnahmen erforderlich macht (z.B. Einbau von Kühldecken oder Umluftkühlern). Im Neubau und bei umfassenden Gebäudeerneuerungen ist aus energetischer Sicht zwischen den Funktionen Lüftung und Kühlung zu trennen.

Bezüglich der Sicherstellung des thermischen Komforts bzw. der Vermeidung hoher Stundenzahlen von überhöhten Raumtemperaturen kommt der **Gebäudekühlung** eine zentrale Bedeutung zu. Bei mittel bis hoch verglasten Bauten mit mittleren bis hohen Wärmelasten sind die Komfortanforderungen gemäss SIA 381/1 ohne die eine oder andere Form der aktiven oder passiven Gebäudekühlung nicht erfüllbar. Ein markanter Anteil des Bedarfs an Kühlung fällt nicht während des Hochsommers, sondern während der Übergangszeit an. Bei hochverglasten Bauten besteht an sonnigen Tagen bereits im Winter eine Überhitzungsgefahr. Ohne Fensterlüftung kann die Gebäudekühlung gemessen in Nutzenergie (als Bedarf an thermischer, abzuführender Energie, d.h. vor der Erzeugung durch die Kühlanlage) 100 bis 250 MJ_{th}/m²a betragen, besonders bei Gebäuden mit hohen Glasanteilen, suboptimalem Sonnenschutz und hohen internen Lasten. Bei einigermaßen gut gedämmten Gebäuden (Neubaustandard) ist dieser Wert vergleichbar wie der Nutzenergiebedarf der Gebäudeheizung (150 bis 250 MJ_{th}/m²a). Der Kühlbedarfsminderung und hocheffizienten Kühlanlagen ist in diesen Fällen eine hohe Priorität zuzumessen. Bei heute weit verbreiteten JAZ von 2 bis 3 beträgt der Elektrizitätsbedarf in diesen Fällen 80 bis 120 MJ_{el}/m²a. Das Endenergieeffizienzpotenzial ist jedoch beträchtlich und wird in der allgemeinen Wahrnehmung oft unterschätzt. Bei mitteleffizienten Anlagen und Konzepten in Kombination mit gebäudeseitigen Massnahmen (Sonnenschutz, Verglasung) beträgt der Endenergiebedarf für Kühlung selbst in Gebäuden mit hohem Glasanteil und hohen internen Lasten

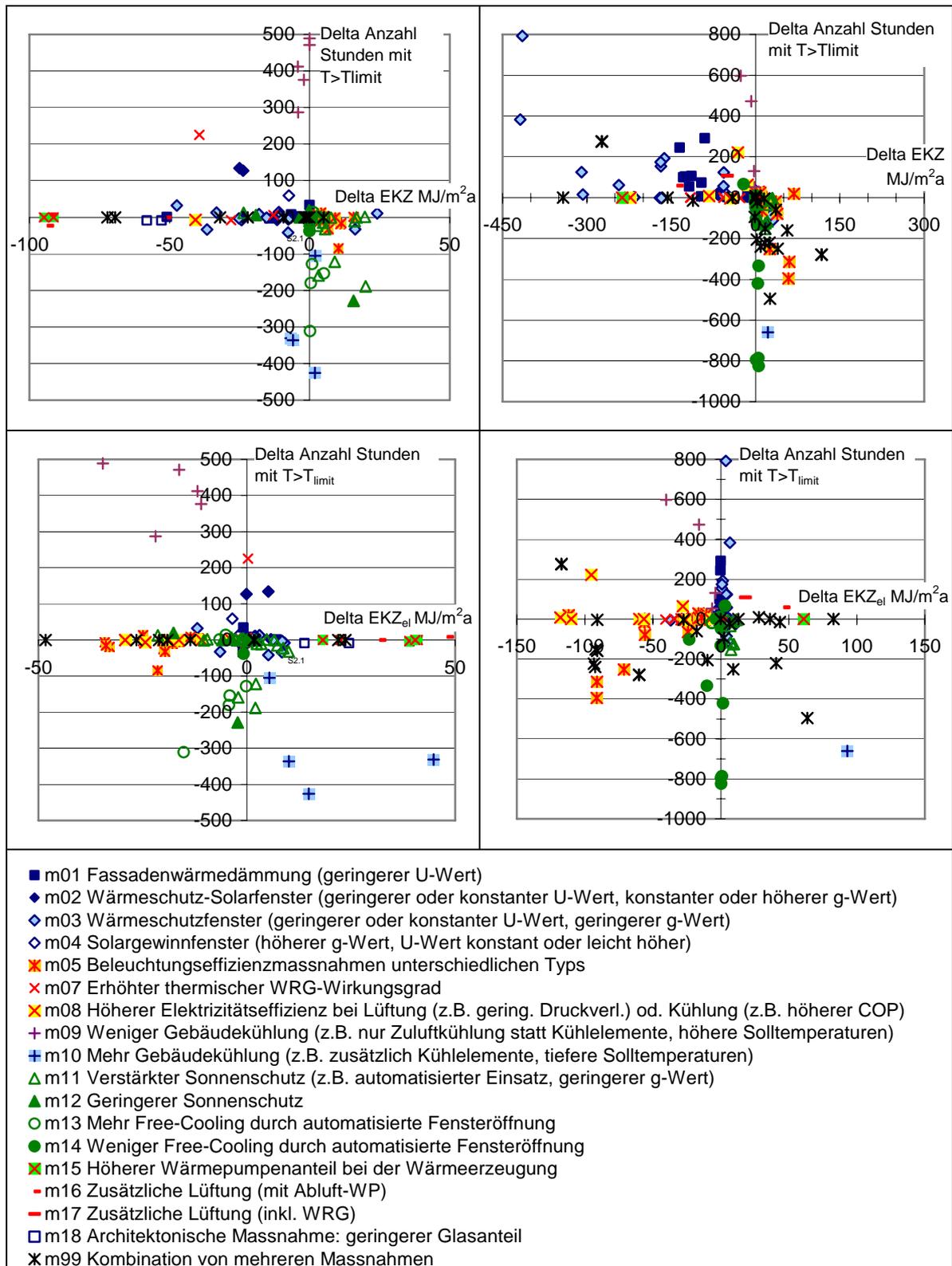


Abbildung Z.5 Auswirkungen der Massnahmen auf die Stundenzahl überhöhter Raumtemperaturen als Funktion der energetischen Wirkung der Massnahmen (Delta Energiekennzahl Brennstoffe obere Diagramme bzw. Delta Energiekennzahl Elektrizität, untere Diagramme) im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts).

„nur“ rund 30 bis 60 MJ_e/m²a (ohne Entfeuchtung), bei Gebäuden mit moderatem Glasanteil die Hälfte davon. Der Einfluss der Gebäudenutzenden, umfangreiche Entfeuchtung oder mittelmässig realisierte Installationen können dieses Bild jedoch markant ändern, weshalb technische Massnahmen vorzusehen sind. Dazu gehört insbesondere die hocheffiziente Kältebereitstellung und -verteilung (d.h. ein dynamischer, geringer Temperaturhub zwischen Verteilung und Rückkühlung, Verwendung von nassen Rückkühlern), Ausnützung der „freien Kälte“ der Aussenluft (bei im Vergleich zum Raum tieferen Aussentemperaturen), bedarfsgerechte Regelung, zurückhaltenden Entfeuchtung, abgestimmte Regelung von Kühlung, Sonnenschutz und Beleuchtung. Der Endenergiebedarf für Kühlung kann auf 20 MJ/m²a oder weniger reduziert werden, bei effizienten Anlagen (JAZ 4 bis 5) in Kombination mit gebäudeseitigen Massnahmen und bei hocheffizienten Anlagen (JAZ 7 bis >20) ohne solche.

Automatisierte Fensteröffnung, Brüstungsgeräte, Free Cooling: Gemäss Ergebnissen der Gebäudesimulationen hat die geregelte Fensteröffnung sowohl bzgl. Überhitzungsschutz als auch bzgl. Kühlbedarf einen sehr grossen positiven Effekt: Die Anzahl Stunden mit zu hohen Innentemperaturen wird um einige hundert bis gegen tausend Stunden pro Jahr reduziert. Der Kühlenergiebedarf wird durch die geregelte Fensteröffnung um 50% bis 70% reduziert, was je nach Fall 30 bis 60 MJ_e/m²a entspricht, ein weiterer Hinweis, dass ein markanter Anteil des Kühlbedarfs in die Übergangszeit fällt. Obwohl der positive Effekt der geregelten Fensteröffnung in den Simulationen möglicherweise zu optimistisch eingeschätzt wird (einströmende Luft ist für Behaglichkeit zu kalt, Fassade kann sich erwärmen und einströmende Luft ist wärmer als meteorologische Aussentemperatur), zeigen die Ergebnisse die hohen Energieeffizienz- und Komfortpotenziale der Möglichkeit der Fensteröffnung und der Kühlung mittels „freier Kälte“. Die automatisierte Fensteröffnung kann in die Rand- und Nachtstunden verlegt werden, und die freie Kälte kann auch mittels Luftklappen, Nachströmöffnungen, Brüstungsgeräten sowie Kühl- und/oder Lüftungsanlagen (s. oben) genutzt werden. Anzumerken ist, dass die anspruchsvollen Komfortanforderungen in vielen Fällen mit solchen Massnahmen allein nicht eingehalten werden können.

Regelungen: Die Energieflüsse in Wirtschaftsbauten sind einer hohen Dynamik und Interaktion unterworfen. Der heutige Stand der Mess-, Sensor- und Regeltechnik könnte der Dynamik und den Interaktionseffekten durchaus Rechnung tragen, wird aber nicht oder nur sehr beschränkt angewendet. Die Regelung basiert jedoch häufig auf momentanen Schwellenwerten und nimmt selten auf übrige Gebäudetechnikbereiche oder auf die Trägheit des Gebäudes Bezug. Es fehlen Regelkonzepte, welche aktuelle und vorausschauende Parameter wie Nutzung, Meteorologie (inkl. Prognosen) mit einbeziehen. Vernetzte, antizipierend agierende und adaptive Regelungen und Steuerungen, welche nicht gegen, sondern mit der Bauphysik arbeiten und das Nutzerverhalten mit einbeziehen, sind zu fördern.

Die Energieanlagen und insbesondere deren Zusammenspiel verhalten sich in der Praxis häufig nicht derart ideal, wie dies die Simulationsrechnungen zeigen. Insbesondere im Fall der Gebäudekühlung kann der Elektrizitätsbedarf rasch ansteigen, z.B. durch „suboptimale“ oder gar fehlerhafte Regelungen (zu tiefe oder zu hohe Sollwerte, gleichzeitige Kühlung und Heizung). Auch der häufig beobachtete „Stand-by“-Bedarf von Gebäuden (nachts, am Wochenende) ist vielfach darauf zurückzuführen. **Betriebsoptimierungsmassnahmen** kommt deshalb eine grosse Bedeutung zu, und zwar sowohl anlässlich der Inbetriebsetzung der Anlagen beim Gebäudeneubau und bei der Erneuerung als auch in regelmässigen Abständen während des laufenden Betriebs. Bei Lüftungsanlagen z.B. kann die für die Energiebedarfsreduktion entscheidende Reduktion der Druckverluste häufig auch durch die Reduktion der Luftvolumenströme erreicht werden.

Kosten- und Nutzenbetrachtung unter Berücksichtigung des Komforts

Die gesamten Jahreskosten (Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten) variieren als Funktion des *erreichten Energieeffizienznieaus, des Komfortnieaus und zwischen verschiedenen Gebäudetypen*, wobei die Variation zwischen den verschiedenen Gebäudetypen grösser ist als die Variation aufgrund der unterschiedlichen Energieeffizienznieaus (siehe Abbildung Z.6). Dies ist insbesondere eine Folge von grundsätzlichen architektonischen und konzeptionellen Grundentscheiden. Dazu gehören Gebäudegrösse (Skaleneffekte) und Gebäudeform, Materialwahl, Fassadengestaltung, Glasanteil, Son-

nenschutztyp, Lüftung und/oder Kühlung. Diese grundsätzlichen Entscheide beeinflussen das Kosten-niveau weit stärker als die Energieeffizienz. Eine Erhöhung des Glasanteils von 50% auf 80% kann beispielsweise mit Mehrkosten von 10 CHF/m²a und mehr für die Kapitalkosten verbunden sein, und dies bei relativ geringen Auswirkungen auf den Elektrizitäts- und Brennstoffbedarf.

Die Jahreskosten sind zudem stark vom erreichten *thermischen Komfort* abhängig. Die Jahreskosten der Fälle, welche die Komfortanforderungen erfüllen (weniger als 100 Stunden mit Innentemperaturen über dem geforderten Grenzwert), liegen klar über denjenigen, welche die Anforderungen nicht erfüllen (untere Diagramme der Abbildung Z.6⁵). Dies trifft besonders für den Gebäudebestand zu; denn beim Neubau mussten in den meisten Fällen Komfortmassnahmen angenommen werden, um die Anforderungen zu erfüllen. Die Jahreskosten von (zusätzlicher) Kühlung betragen rund 10 CHF/m²a, diejenigen von zusätzlichen Lüftungen liegen in der gleichen Grössenordnung. Die Elektrizitätskosten der internen Lasten (Geräte, ohne Beleuchtung) beeinflussen die Jahreskosten direkt (die Elektrizitätskosten betragen 5.5 CHF/m²a statt 1.8 CHF/m²a) und indirekt (zusätzliche Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten für Kühlung, wobei letztere bis zu 5 CHF/m²a betragen können).

Im Gebäudebestand sind die Jahreskosten stark abhängig von den *grundsätzlichen Referenzfall-kategorien* „laufende Energiekosten“, „Unterhalt“, „Instandhaltung“, „Instandsetzung“ und „Erneuerung“. Im Vergleich zu den beiden erstgenannten Referenzfällen sind Energieeffizienzmassnahmen häufig nicht oder nur unter günstigen Bedingungen wirtschaftlich, währenddem weitergehende Energieeffizienzmassnahmen im Vergleich zu einer ohnehin durchzuführenden Erneuerung in vielen Fällen wirtschaftlich realisiert werden können. Typische Beispiele sind Fensterersatz, Wärmedämmung bei komplexen Fassaden, Beleuchtungserneuerung, welche im Vergleich zu den laufenden Energiekosten und einfachen Unterhalts- und Instandhaltungsarbeiten nicht wirtschaftlich sind. Ist jedoch aufgrund der Lebensdauer, aus technischen oder ästhetischen Gründen ohnehin ein Fensterersatz, eine Fassaden- oder Beleuchtungserneuerung durchzuführen, sind weitergehende Effizienzstandards wie geringere U-Werte und präsenz- oder tageslichtbasierte Beleuchtungserneuerungen meistens wirtschaftlich. Fazit: Investive Energieeffizienzmassnahmen mit einem gegenüber dem Ist-Zustand markanten Erneuerungs- und Re-Investitionsanteil sind im Vergleich zu laufenden Kosten häufig nicht wirtschaftlich, im Vergleich zu (energetisch nicht wirksamen) Instandsetzungen jedoch durchaus.

Bei der Analyse der Trade-offs zwischen den Jahreskosten und je den Einflussgrössen Brennstoffbedarf, Elektrizitätsbedarf und Komfort ist zu beachten, dass bei einem bestimmten Paarvergleich die Kosten auch von einem oder zwei der jeweils anderen Einflussfaktoren abhängen. Bezüglich des Zusammenhangs zwischen spezifischem *Brennstoffbedarf* und *Jahreskosten* auf Gebäudeebene können folgende Feststellungen gemacht werden:

- Heizkosten von Wirtschaftsgebäuden (etwa 0.4 bis 1.2 CHF/m².a) sind – im Vergleich zu den Stromkosten, v.a. aber im Vergleich zu den Kapitalkosten von Wirtschaftsgebäuden – sehr gering. Entsprechend relativ gering ist auch das Heizkosteneinsparpotenzial (gemessen an übrigen Kostenanteilen); als Folge wird ihnen auch wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Für energieeffizientere Lösungen können jedoch höhere Kapitalkosten durch geringere Energiekosten kompensiert werden. Von einigen wenigen Ausnahmen abgesehen (siehe unten) sind die gesamten Jahreskosten für einen bestimmten Gebäudetyp als Funktion des geringeren Brennstoffbedarfs mehr oder weniger konstant. Einige Massnahmen sind mit geringen Mehr- oder Minderkosten im Bereich von -3 bis 2 CHF/m²a verbunden (siehe Abbildung Z.6 und Abbildung Z.7, jeweils obere Diagramme). Dies bedeutet, dass die meisten Energieeffizienzmassnahmen, welche den Heizwärmebedarf reduzieren, sind entweder wirtschaftlich oder nahe der Wirtschaftlichkeitsgrenze. Dies betrifft insbesondere Gebäudehüllenmassnahmen (inkl. Fenster), aber auch Wärmerückgewinnungsanlagen mit höherem thermischem Wirkungsgrad (bei bereits vorhandenem oder vorgesehener Lüftungsanlage) und Betriebsoptimierungsmassnahmen.

⁵: Hinweis: die definierte Solltemperatur der Kühlung liegt bei „Kühlung 4“ teilweise knapp über dem geforderten Limit (um bis zu 0.5°C). Die Anzahl der Stunden mit Temperaturüberschreitung mag relativ hoch sein, die Temperaturüberschreitung ist jedoch während der meisten dieser Stunden gering (0.5°C oder weniger).

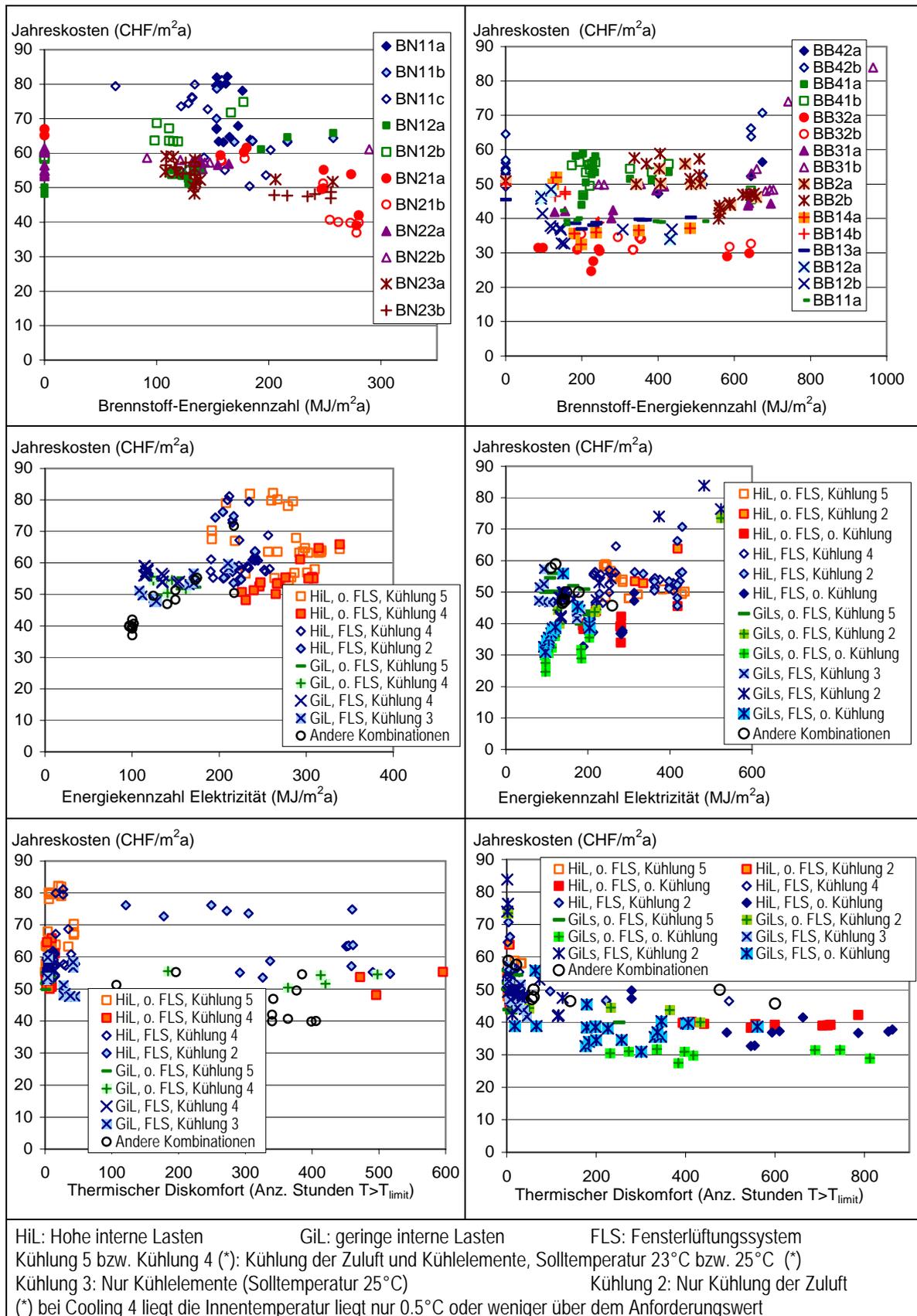


Abbildung Z.6 Jahreskosten als Funktion der Energiekennzahl Brennstoffe (obere Diagramme), der Energiekennzahl Elektrizität (mittlere Diagramme) und des thermischen Diskomforts im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts)

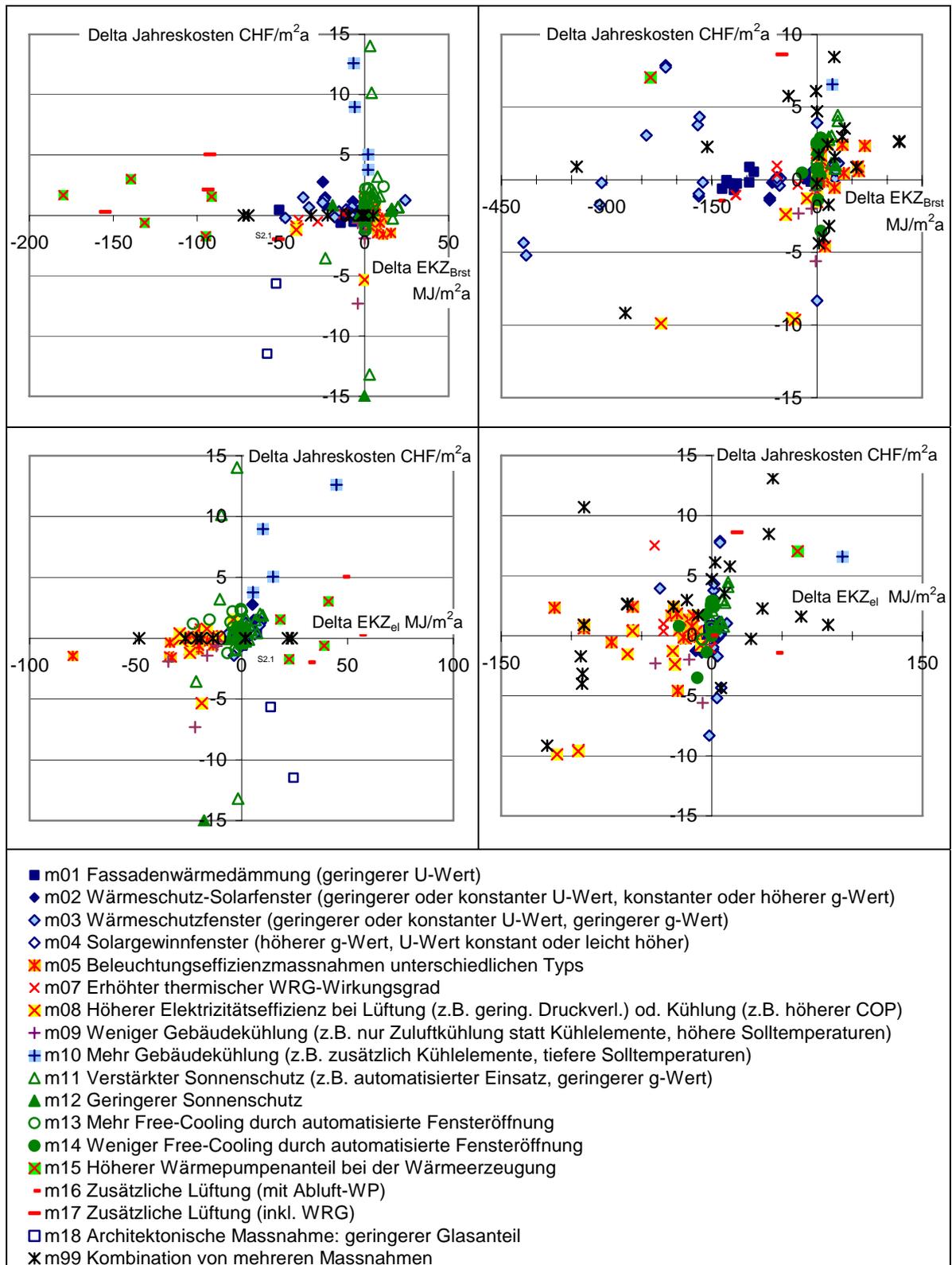


Abbildung Z.7 Mehr- und Minderjahreskosten der Massnahmen als Funktion ihrer energetischen Wirkung (Delta Energiekennzahl Brennstoffe, obere Diagramme bzw. Delta Energiekennzahl Elektrizität, untere Diagramme) im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts).

- Teilweise sind relative grosse Reduktionen der gesamten Jahreskosten zu verzeichnen, insbesondere Betriebsoptimierungsmassnahmen (BO). Die Jahreskostenreduktionen von BO-Massnahmen können v.a. im Gebäudebestand besonders gross ausfallen (1 bis ca. 15 CHF/m²a, in Einzelfällen über 20 CHF/m²a), sind aber auch im Neubau nicht zu vernachlässigen (bis zu 5 CHF/m²a).
- Einige Heizwärmebedarfsreduktionsmassnahmen sind mit einer deutlicheren Erhöhung der Jahreskosten verbunden. Verursacht werden diese entweder durch Wärmepumpen, welche fossile Heizanlagen ersetzen (bis +4 CHF/m²a, wobei anzufügen ist, dass bei WP auch Netto-Jahreskostenreduktionen möglich sind), Abluft-Systeme mit WP oder durch Lüftungsanlagen (5 bis 10 CHF/m²a). An dieser Stelle ist anzumerken, dass der primäre Zweck von Lüftungsanlagen im Bereitstellen von guter Luftqualität (geringe Konzentrationen an CO₂ und Gerüchen) besteht und die Heizwärmebedarfsreduktion als Zusatznutzen anzusehen ist.
- Bei einigen Kostensprüngen sind keine wesentlichen Veränderungen im Brennstoffbedarf festzustellen. Dabei handelt es sich um Elektrizitäts- und Komfortmassnahmen.

Ähnliche Aussagen können zum Zusammenhang zwischen dem spezifischen Elektrizitätsbedarf und den Jahreskosten gemacht werden: Im Verlauf der zunehmenden Elektrizitätseffizienz (geringere EKZ_{el}) sind die gesamten Jahreskosten innerhalb eines bestimmten Gebäudetyps relativ konstant oder nur mit relativ geringen Kostensteigerungen verbunden (typischerweise 0 bis 2 CHF/m²a). Im Vergleich zwischen den verschiedenen Gebäudetypen wird die EKZ_{el} ganz erheblich von der Annahme der internen Lasten durch Geräte beeinflusst (40 bzw. 120 MJ/m²a). Zu beachten ist zudem, dass bei einigen Fällen mit geringem Elektrizitätsbedarf und geringen Kosten die thermischen Komfortanforderungen nicht eingehalten werden (Fälle ohne oder mit nur geringer Kühlung), d.h. für einen geringen Elektrizitätsbedarf und geringe Kosten sind Komforteinbussen (und eventuell Produktivitätsverluste) in Kauf zu nehmen. Ebenfalls zu höheren (und nicht geringeren) EKZ_{el} führen Brennstoffsubstitutionsmassnahmen wie WP oder Lüftungen mit WRG. Weitere Massnahmen führen zwar zu höheren oder geringeren Kosten, nicht aber zu substantiell unterschiedlichem Elektrizitätsbedarf. Dabei handelt es sich um Brennstoffeffizienzmassnahmen oder bereits weiter oben angesprochene grundsätzliche konzeptionelle Entscheide (z.B. Fassadentyp, Glasanteile).

Bei der Energie- und Komfortwirkung und den Kosten sind zwischen den einzelnen Massnahmen-typen grosse Unterschiede festzustellen, wie die Übersichts-Tabelle Z.4 zeigt. Auch innerhalb eines Massnahmenbereichs ist die Variation beträchtlich, je nach betrachteter Massnahme und Referenzfall (Neubau, Erneuerung, Instandsetzung, laufende Kosten). Zum Verständnis: wirtschaftlich sind diejenigen Massnahmen, deren Nettokosten negativ sind oder deren spezifischen Bruttokosten unter dem gemittelten künftigen Brennstoff- bzw. Elektrizitätspreis liegen (gemittelt über die Lebensdauer der Massnahme). In den meisten Bereichen lassen sich zum Teil beträchtliche wirtschaftliche Energieeffizienzpotenziale identifizieren, v.a. im Re-Investitionszyklus und bei Neubauten. Bei den übrigen Massnahmen würden markant tiefere Netto-Kosten oder gar ebenfalls Netto-Nutzen resultieren, wenn auf der Nutzenseite nebst den geringeren Energiekosten auch die Komfortnutzen wirtschaftlich bewertet würden (siehe exemplarische Gegenüberstellung im nächsten Unterkapitel).

Wegen des Zielkonfliktes von Energieeffizienz und Komfort gibt es für die jeweiligen Gebäudetypen und für den Fall von Neubau und Erneuerung jeweils kosten- und energieeffiziente Bündel von Massnahmen, die wegen der Einhaltung der Komfortanforderungen eindeutig gegenüber anderen Massnahmenkombinationen vorzuziehen sind (vgl. Tabelle Z.5).

Massnahmenbereich	Massnahmenbeschreibung	Geb.typ ⁽¹⁾	Elektrizität Δ EKZel MJ/m ² EBFa	Wärme-Endenergie Brennstoffe, Fernw. Δ EKZ _{Brst} MJ/m ² EBFa	Komfort; Anzahl Stunden mit Überhitzung (Südraum)	Referenz- fall ⁽¹⁾ Netto- Jahreskosten (CHF/m ² a)	Referenz- fall ⁽¹⁾ Spezifische Brutto- kosten CHF /kWh _{brst} /kWh _{el}
Nutzung	Geringere Belegungsdichte				bis -200 h	+ 30 bis +40	
Architektur	Geringerer Fensteranteil (50 statt 80%)		+15 bis +25	-50 bis -60	nicht untersucht	-5 bis -8	
	Fassadentyp (Materialisierung)				nicht untersucht	-15 bis +20	Nicht anwendbar (n.a.)
Wärme- dämmungen	WD 0.3 W/m ² K statt keine WD ⁽²⁾	B	gering	-100 bis -150	+50 bis +200 h	LK: -0.5 bis +1 IS: -0.5 bis +1	LK: 0.08 bis 0.2 * IS: 0.05 bis 0.15 *
	WD 0.2 W/m ² K statt 0.3 W/m ² K	N, B	gering	-10 bis -25	bis + 50 h	SN, EE:	SN, EE: 0.08 bis 0.13 /
Fenster	Fenstersatz Ug=1.1 statt 2.2-3.0 W/m ² K	B	-15 bis +12	-170 bis -400	Markante Verb. Winter; Überh. bis + 800 h	LK: +4 bis+8; IS: +0 bis+5	LK: 0.17 bis 0.17 * IS: 0.09 bis 0.18 *
	3fach-Wärmeschutzfenster statt 2-fach	N, B	-12 bis +10	-10 bis -50	bis +130 h	SN; EE: -1 bis +2	SN, EE: 0.03 bis 0.2 * ⁽³⁾
	Sonnenschutzfenster statt reiner WS	N, B	-0 bis -12	+10 bis +25	bis -120 h	+1 bis + 2.5	nicht berechnet (n.b.)
Beleuchtung	Erneuerung bestehende Beleuchtung inkl Präsenzmelder u./o. Tageslichtreg.	B	-40 bis -110	+20 bis +60	Verbess. Beleuchtungsergonomie; Überh. b. -200 h	LK; IH: +1 bis +3 IS: -1 bis +1	LK/IH: * -0.05 bis +0.5 IS: * -0.05 bis +0.2
	Energie-effizientere Beleuchtung inkl. R	N	-20 bis -70	+10 bis + 30	bis -100 h	-0.2 bis +2.5	* / 0.13 bis 0.4
	Präsenzmelder u./o. Tageslichtregel.	N, B	-20 bis -50		bis -100 h	SN; EE: -1 bis -0.2	SN, EE: * 0.06 bis 0.15
Lüftung	Betriebsoptimierungsmassnahmen	B, N	-30 bis -100 ⁽⁴⁾	-50 bis -250 ⁽⁴⁾	+ einige 10 h bei ⁽⁹⁾	B: bis -10, N: bis -2	* - ... bis 0.2
	Komplette Lüftungserneuerung	B	-70 bis -160 ⁽⁴⁾	-60 bis -250 ⁽⁴⁾	+ einige 10 h bei ⁽⁹⁾	LK; IH: -12 bis +1.5	
	Einbau Lüftung mit WRG / Abluft-WP ⁽²⁾	B, N	+20 bis +40 / ⁽⁵⁾	-50 bis -80	+ einige 10 h	+7.5 bis +9	0.17 bis 0.3 *
	Höherer WRG-Wirkungsgrad	B, N	< +5	-40 bis -80, -15 bis -40	+ einige 10 h	Alle -2.5 bis 0.5	SN, LK 0.03 bis 0.1 / *
	Geringere Druckverluste (grössere LK)	B, N	-10 bis -15	k.A.	k.A.	SN, EE: +0.5 bis +1	SN, EE * 0.3 bis 0.4
	Bedarfsgerechte Regelung (z.B. CO ₂)	B, N	-10 bis -25	k.A.	nicht untersucht	SN, EE: -1 bis -1.5	SN, EE n.a. -0.3 bis -0.2
Komfortkühlung	Einbau Kühlung mit Kühlelementen	B, N	+30 bis +60 ⁽⁶⁾	+0 bis +10	bis -900 h (-1200h)	+10 bis +15	n.a. (Komfortmassnahme)
	Einbau Zuluftkühlung	B, N	+7 bis +20 ⁽⁷⁾	+0 bis +10	bis -400 h	+3 ⁽⁸⁾	n.a. (Komfortmassnahme)
	Erneuerung Kälteanlage (Standard)	B	-10 bis -50 ⁽⁹⁾	-50 bis +5 ⁽⁹⁾	+ einige 10 h bei ⁽⁹⁾	LK: bis +7, EE:.....	
	Effizientere Gebäudekühlung	N, B	-10 bis -80	k.A.			* <0.2
	Fensterlüftungssystem	B, N	vernachlässigbar	+0 bis +10	bis -900 h	+ 5 bis +10	n.a. (Komfortmassnahme)
Sonnenschutz	Verstärkter Sonnenschutz		-20 bis +10	-25 bis +20	bis -200 h	-1 bis +3	n.b.
Interne Lasten	Effizientere Geräte	B, N	-40 bis -80	+10 bis +40	bis -200 h	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Wärmeerzeugung	WP statt fossile Heizung	B, N	+30 bis + 80	-100%	k.A.	-0.5 bis +1	
	Holz statt fossile Heizung	B, N	vernachlässigbar	Erneuerbar statt fossil	k.A.	+1 bis +2	

(1) B: Gebäudebestand, N: Neubau, SN: Standardneubau, LK: laufende Kosten, IS: Instandsetzung, EE: energetische Erneuerung (2) WD: Wärmedämmung, WRG: Wärmerückgewinnung (3) in Einzelfällen bis 0.3 CHF/kWh (gilt auch für Rahmenverbesserungen) (4) Je nach Ausgangslage -einige 100 MJ/m²a (5) bzw. 50% davon bei effizienten Anlagen (6) bei effizienten Lösungen 20 MJ_{el}/m²a, bei hohen Glasanteilen bis 120 MJ_{el}/m²a (7) ohne Luftförderung (8) bei vorhandener Lüftung (9) inkl. Reduktion Luftwechselraten

Tabelle Z.4 Übersicht über die energetische Wirkung, die Komfortveränderungen und die Kosten der verschiedenen Massnahmentypen (Quelle CEPE at al).

	Wichtige Planungs- und Investitionsregel (Auswahl)
Neubau und Gebäudebestand	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmedämmungen und Wärmeschutzfenster und -verglasungen sind zentrale Elemente für energie-effiziente Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind – bei Annahme heutiger Energiepreise – meist rentabel (insbesondere im Vergleich zu nicht-energetischen Instandsetzungen) oder mit nur geringen Mehrkosten verbunden (weniger als 1 bis 2 CHF/m²a bei Wärmedämmungen bis zu U-Werten von 0.2 W/m²K bzw. Dämmstärken von 20 cm und bis zu Ug von 0.5 W/m²K.). - Solargewinnfenster mit höherem g-Wert (im Vergleich zum Standard bei jeweiligem Glas-U-Wert) mit dem Ziel, die solaren Gewinne während der Heizperiode zu erhöhen, sind im Bürobereich nicht ratsam, denn sie erhöhen die Überhitzungsgefahr im Sommerhalbjahr. - Sonnenschutzfenster (mit tiefem g-Wert) verbessern zwar den sommerlichen Komfort, erhöhen jedoch netto den Wärmebedarf (bei gleichem Sonnenschutzregime) und den Strombedarf, auch bei gekühlten Gebäuden (mehr Beleuchtung bei geregelter Beleuchtung). - Energie-effiziente Beleuchtungen und Beleuchtungsregelungen sind ein zentrales Element für energie-effiziente und thermisch komfortable Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind meist rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten von typischerweise 0 bis 2 CHF/m²a verbunden (insbesondere bei Einbezug der Wartungskosten von alten Beleuchtungen im Bestand). - Je höher die (nicht mehr verminderbaren) internen Wärmelasten, desto notwendiger wird der Einsatz einer aktiven Kühlung, um insbesondere ausserhalb der Heizperiode das erforderliche Komfort-Niveau halten zu können. Aktive Kühlung ist mit Mehrkosten von bis zu 10 CHF/m²a verbunden. Bei Einsatz von Kältemaschinen sind Anlagen möglichst effizient zu konzipieren (z.B. geringer Temperaturhub zwischen Kühlwasser und Rückkühlung, Nutzung von „freier Kälte“), was rentabel oder zu geringen Mehrkosten realisiert werden kann (0 bis 2 CHF/m²a). - Der Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) ist aus Komfortgründen bei dichter Belegung und eingeschränkter Möglichkeit der Fensterlüftung angezeigt, macht jedoch aus Gründen der Energieeffizienz <u>allein</u> keinen ökonomischen Sinn (deutlich über den Wärmege-stehungskosten liegende Grenzkosten): durch die WRG (auch mit Abluft-Wärmepumpe) kann zwar der Heizwärmebedarf netto vermindert werden, aber weniger stark als erwartet, weil auch der bedarfsgerechte Luftwechsel meistens höher als bei typischer (wenn auch meist aus luft-hygienischer Sicht ungenügender) Fensterlüftung. Typische Kosten: bis zu 10 CHF/m²a. - Bei vorhandenen oder aus lufthygienischer Sicht erforderlichen Lüftungsanlagen ist auf möglichst geringe Druckverluste (ein Mass für den Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung), d.h. auf geringe Luftgeschwindigkeiten und hocheffiziente Ventilatoren und Elektromotoren zu achten. Wärmerückgewinnungs-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad (über 85%) sind rentabel. - Eine automatisierte Fensteröffnung oder Brüstungsgeräte mit Nachströmöffnungen ermöglichen deutliche Komfortverbesserungen (ohne den Einsatz von Lüftungs- oder Kühlanlagen). Denn abgesehen von wenigen Spitzentagen im Jahr ist die Aussenluft kühler als die Raumtemperatur (Jahreskosten der Massnahme bis zu 8 CHF/m²a). - Bei Gebäuden mit komplexen oder denkmalgeschützten Fassaden sind Wärmepumpen energie-tisch und technisch sinnvolle Lösungen, um Brennstoffe zu Heizzwecken zu substituieren. Höhere Investitionskosten können jedoch bei effizienten Anlagen oder bei der Nutzung von Synergien mit der Gebäudekühlung durch günstigere Energie- und Betriebskosten amortisiert werden.
Gebäudebestand	<ul style="list-style-type: none"> - Bei hohen internen Lasten von Gebäuden ohne aktive Kühlung verschärft Wärmeschutz die sommerliche Überhitzung, v.a. bei bereits vor der Massnahme beobachteten kritischen Situationen sommerlicher Überhitzung, so dass kompensatorische Massnahmen zu ergreifen sind.
Neubau	<ul style="list-style-type: none"> - Eine dichte Personenbelegung und eine damit meist verbundene hohe Gerätedichte führen zu hohen internen Wärmelasten. Ohne aktive Kühlung (Kühldecken, Umluftkühler, TABS, Zuluftkühlung, evtl. Nachtauskühlung) lassen sich die Anforderungen an den sommerlichen Komfort kaum einhalten, selbst bei Gebäuden mit geringen Glasanteilen, energie-effizienter Beleuchtung und sehr gutem Sonnenschutz.

Tabelle Z.5

Planungs- und Investitionsregeln zur Minimierung des Zielkonflikts Raum-Komfort und Energieeffizienz in Wirtschaftsgebäuden (Quelle CEPE et al.)

Fazit: Energie-effiziente Lösungen im Neubau oder energetische Erneuerungen von Anlagen und Gebäudehülle im Gebäudebestand sind bei adäquaten methodischem Ansatz entweder rentabel oder mit geringen Mehrkosten verbunden (0 bis wenige CHF/m²a). Weit grössere Auswirkungen auf die (brutto) Jahresenergiekosten haben Komfort-Anforderungen oder Zusatznutzen erzeugende Installationen (aktive Kühlung, Lüftung) oder grundsätzliche architektonische Entscheide (Fassadentyp, Platzierung des Sonnenschutzes, innenarchitektonisches Design). Diese betragen 10 bis einige wenige 10 CHF/m²a. Zum Vergleich: die jährlichen Vollkosten der energierelevanten Bauteile und Anlagen betragen bei Wirtschaftsgebäuden 50 bis 100 CHF/m², die Gebäudenebenkosten 300 bis 400 CHF/m² und die Personalkosten etwa 5000 bis 10000 CHF/m². Wenn die Produktivität der Beschäftigten nur um wenige Promille durch überhitzte oder unterkühlte Räume leidet, wird sich jede Wärmeschutzmassnahme oder energietechnische Massnahme am Erhalt der Produktivität orientieren müssen. Dieses Faktum der sehr grossen Zusatz-Nutzen energietechnischer Massnahmen in Wirtschaftsgebäuden wird derzeit weitgehend übersehen, vielleicht nicht zuletzt deshalb, weil die produktivitätsverändernden Effekte unangenehmer Raumtemperaturen und Zuglufterscheinungen weitgehend unbekannt sind und in der ökonomischen Bewertung bisher kaum Eingang gefunden haben.

Erhebung der technischen Kennwerte und der spezifischen Kosten

Im Rahmen dieses Projekts wurden umfangreiche Kostenerhebungen durchgeführt und spezifische Kostenkennwerte erarbeitet (siehe Kap. 4). Diese Kennwerte bilden die Grundlage für die nachfolgenden Kosten-Nutzen-Rechnungen, können aber auch von Dritten für Variantenstudien und grundsätzliche Kosten-Nutzen-Überlegungen verwendet werden. Auf die Kennwerte im Einzelnen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, denn diese Kennwerte erlangen ihre inhaltliche Bedeutung erst bei ihrer Anwendung im Einzelfall oder bei Kosten-Nutzenüberlegungen (siehe unten).

Die Kostenkennwerte beziehen sich auf jeweils adäquate Bezugsgrössen, so dass sie für eine grosse Vielfalt von Gebäuden angewendet werden können. Diese Grössen sind typischerweise Flächenmasse, Anlagen- oder Bedarfsleistungen, Luftvolumenströme etc. Bei den meisten Kostenkennwerten wird im Hinblick auf den Grenzkostenansatz zwischen verschiedenen energetischen Qualitätsverläufen oder -stufen unterschieden (z.B. Kosten als Funktion des U-Wertes, des Nutzungsgrades und weiteren Energieeffizienzmassen). Bei einigen Kostenelementen stehen Grenzkostenbetrachtungen eher zwischen verschiedenen Kostenelementen im Vordergrund als innerhalb eines selben Kostenelements (z.B. WP statt fossile Heizung). Die Kostenkennwerte umfassen sowohl investive Elemente wie auch Instandhaltungs- und Unterhaltsmassnahmen sowie Betriebsoptimierungsmassnahmen. In den meisten Fällen sind energie-effizientere Varianten derselben Energiedienstleistung mit höheren (Initial-)kosten verbunden. Inwieweit diese durch geringere laufende Kosten, insbesondere Energiekosten, wieder wettgemacht werden können, ist Gegenstand von Kap. 5 und Kap. 6.

Die Kostenerhebungen und die Erarbeitung der Kostenkennwerte sind nicht nur zur ökonomischen Bewertung der Energieeffizienzmassnahmen an Wirtschaftsgebäuden von Interesse, sondern sie sind auch aufschlussreich für bestehende Entscheidungsprozesse und Markunvollkommenheiten:

- Die beim Bau von neuen Gebäuden und bei der Instandsetzung und Erneuerung des Gebäudebestandes involvierten Planer und Gewerke arbeiten meist sehr arbeitsteilig und ohne Integrationsversuche.
- Obwohl eine Hemmnisanalyse nicht explizites Untersuchungsziel der vorliegenden Studie war, haben die Kostenerhebungen gezeigt, dass sowohl die Arbeitsteilung sowie die Kleinstruktur der beteiligten Unternehmen für die Energie-Effizienz ein system-immanentes Hemmnis darstellt. Die Arbeitsteilung führt dazu, die anzubietenden Leistungen mit möglichst geringen Investitionskosten zu erbringen. Das Prinzip der Investitionskostenminimierung steht aber dem Lebenszykluskostenansatz und damit energie-effizienten Optionen entgegen, denn diese haben in der Regel höhere Investitionskosten.

- Die Arbeitsteilung bei den einzelnen Gewerken führt auch zu vielen Schnittstellen. Dies führt für die Bauträger beim Anstreben von energie-effizienten Lösungen zu hohen Informations- und Suchkosten. Die Arbeitsteilung und die Schnittstellen vermindern die Kostentransparenz, erschweren die Vergleichbarkeit von verschiedenen Investitionsoptionen infolge der unterschiedlichen Abgrenzungen und der oft nicht vernachlässigbaren sogenannten „bauseitigen“ Kosten und verhindern Erneuerungs-Investitionen, die mit modernsten Vermessungs- und Planungsmethoden bis zu 30 % kostengünstiger erstellt werden könnten (Jochem u.a. 2005, S. 105–113).
- Bei manchen Massnahmen handelt es sich um kombinierte Energie- und Komfortmassnahmen oder um alleinige Komfortmassnahmen. Einige andere Massnahmen wie z.B. Lüftungsanlagen verändern gleichzeitig Energiebedarf und Komfort (Luftqualität, thermisch), was Kosten-Nutzen-Analysen aufwändig werden lässt oder wegen fehlender Grundlagen gar verunmöglicht.
- Die (ökonomischen) Auswirkungen von konstant frischer Luft und einer angenehmen Raumtemperatur auf die Produktivität der in den Wirtschaftsgebäuden arbeitenden Menschen sind weitgehend unbekannt und deshalb in der ökonomischen Bewertung energietechnischer Investitionen und organisatorischer Massnahmen derzeit noch ausgeschlossen.

Einer weitergehenden Energieeffizienz stehen also in erheblichem Umfang strukturelle und marktorganisatorische Hemmnisse im Weg. Diese sind zielgruppenspezifisch unterschiedlich.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Inhaltliche Schlussfolgerungen

Die inhaltlichen Schlussfolgerungen werden insbesondere unter dem Zielkonflikt von Energieeffizienz und Komfort/Produktivität für die Wirtschaftsgebäude gezogen. Auf die Bewertung der investitionsbezogenen Lösungen wurde bereits in den oberen Abschnitten weitgehend eingegangen. Herausgestellt seien hier nochmals folgende Ergebnisse unter energie- und klimapolitischen Gesichtspunkten:

- (1) Bei Wirtschaftsgebäuden können sowohl im *Gebäudebestand* wie im *Neubau* Komfortniveau, Brennstoffbedarf und *gebäudebezogener* Elektrizitätsbedarf durch geeignete Massnahmen erheblich verbessert bzw. vermindert werden. Um den *gesamten* Strombedarf markant zu reduzieren, wäre auch der Elektrizitätsbedarf der Bürogeräte (Informations- und Kommunikationstechnologien, IKT), der oft einen hohen Anteil des Strombedarfs und der internen Lasten darstellt, mit in die Massnahmen einzubeziehen.
- (2) Im *Gebäudebestand* hängen die Wirtschaftlichkeit von gebäude- und anlagenbezogenen Massnahmen nicht nur von den Kosten der Massnahmen und ihrer energetischen Wirkung ab, sondern erheblich auch von der *Ausgangslage* und der *Kosten-Vergleichsbasis* ab. Die nicht selten verwendete Vergleichsbasis der laufenden (Energie-)Kosten mag die geringen Erneuerungsraten mit erklären, ist jedoch nicht sachgerecht, weil durch die investiven Massnahmen neue Sachwerte für die Gebäudebewertung (und die Produktivität der dort Arbeitenden) geschaffen werden. Wenngleich die ökonomische Bezugsbasis von zwei Fällen, die "Instandsetzung" oder "energetische Standard-Erneuerung" aufwändig zu definieren ist, ist das Vorgehen als Vergleichsbasis sachlich angemessen. Beide Fälle führen zur Identifikation rentabler Investitionsoptionen bzw. Investitionsbündeln.
- (3) Die vielfach für die Investitionsentscheide allein verwendete und häufig relativ kurze geforderte Amortisationszeit (Payback-Zeit) ist ein Risikomass für den Rückfluss des eingesetzten Kapitals; sie sagt nichts zur Rentabilität der betrachteten Investitionsmassnahmen aus, die insbesondere bei den involvierten langen Nutzungszeiten (15 bis 50 Jahre) von höchster Bedeutung ist (z.B. Dach- oder Fassadenwärmedämmung, hoch effiziente Elektromotoren, Ventilatoren, Kompressoren und Anlagenkonzepte, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, kombinierte Kälte- und Wärmeerzeugung). Hier bedarf es dringend einer intensiven Aufklärung bei allen Investorengruppen von Wirtschaftsgebäuden, will man erhebliche Fehlentwicklungen unter klimapolitischen Gesichts-

punkten wegen der langen Nutzungszeiten vermeiden. Es handelt sich hier um einen klassischen Fall von „stranded investments“ in den nächsten Dekaden.

- (4) Bei *energiewirtschaftlichen Analysen* hatte man bisher eine Differenzierung der Kosten- und Energieeffizienzdaten wie hierbei vorliegend nicht zur Verfügung und der Konflikt zwischen Energieeffizienz und Komfort/Produktivität der Beschäftigten in den Wirtschaftsgebäuden war in der Stringenz der vorliegenden Analyse nicht aufgegriffen. Die nunmehr verfügbaren Grundlagen zur Substitutionswirkung zwischen Wärme- und Strombedarf (sehr unterschiedlich zwischen verschiedenen Massnahmetypen) war nicht empirisch fundiert, und die Differenz zwischen Instandsetzung und rentabler Re-Investition auf den neuen technischen Stand kennzeichnet jene unausgeschöpften Effizienzpotenziale (die "low hanging fruits"), die bisher überwiegend als Ergebnis von erfahrungsbasierten Schätzungen in den energiewirtschaftlichen bottom-up-Modellen quantifiziert wurden.
- (5) Wegen der Fülle der unterschiedlichen Merkmale und Anforderungen der Wirtschaftsgebäude ist die Ermittlung der Grenzkosten für energiewirtschaftliche Analyse Zwecke komplex und wegen hoher Sensitivitäten auch nicht einfach zu realisieren; sie macht Vereinfachungen notwendig. Die hier vorgenommene Klassifizierung ist ein erster grosser Schritt, den unterschiedlichen Gegebenheiten angemessener als bisher Rechnung zu tragen.

Empfehlungen für Wirtschaft, Intermediäre, Politik und Verwaltung

Eine vertiefte Hemmnis- und Politikanalyse war nicht zentraler Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Dennoch waren die Arbeiten indirekt eine Auseinandersetzung mit dem Innovationsgeschehen im Bereich der Wirtschaftsgebäude mit ihren verschiedenen Gruppen der Nutzer und Investoren, der Planer und Baugewerke; sie erbrachten Hinweise für Empfehlungen der energie- und innovationspolitischen Akteure sowie der Gebäudebesitzer, die alle Wirtschaftssektoren einschliesslich der öffentlichen Hand umfassen:

- (1) Eine *mangelhafte Kenntnis* auf Seiten der Investoren, Planer und Baugewerke über die rentablen Investitionsmöglichkeiten sowie das hohe Mass an Arbeitsteilung auf Seite der Bauleistungsanbieter führt häufig zu hohen Such- und Informationskosten; die mehrstufigen Entscheidungsprozesse (firmenintern und -übergreifend) mit dem fragwürdigen Entscheidungskriterium der tiefen Investitionskosten oder der kurzen Amortisations-Zeiten auch zur Resignation der Energieverantwortlichen. Ein Abbau der Informationsasymmetrie, die Erhöhung der Markttransparenz und die Verminderung der Transaktionskosten erfordern mehr
 - Initial- und Umsetzungsberatungen für Immobilienbesitzer (finanziell und ideell gestützt),
 - *gezielte Mess- und Informationskampagnen seitens der Technologiehersteller für Planer und Technologienutzer* (wie dies z.B. bei der Druckluft derzeit (2006) der Fall ist), insbesondere zu hocheffizienter Beleuchtung, hocheffizienten Elektromotoren, Lüftungsanlagen, Gebäudekühlung und Kälteanlagen, Pumpen und Anlagenkonzepte sowie integrierte Planung, Betriebsoptimierungs-Massnahmen und Gebäudemanagement.
 - als Ergänzung/Alternative zu *klassischen* Aus- und beruflichen Weiterbildungsangeboten *ein Ausbau der örtlichen, lernenden Netzwerke* (wie Energiemodell von EnergieSchweiz bzw. der EnAW und das Programm energho) für Immobiliengesellschaften und Besitzer von Wirtschaftsgebäuden (Anschubfinanzierung empfehlenswert, Instrument erreicht einen um den Faktor 10 höheren Multiplikatoreffekt gegenüber einer Initialberatung).
 - Umsetzung des *Gebäudepasses auch in der Schweiz*, der aufgrund der EU-Richtlinie in den Mitgliedsstaaten umgesetzt wird.

Diese Verbesserungsmassnahmen zur Erhöhung der Markttransparenz müssten von der Verwaltung auf Bundes- und Kantonsebene initiiert und in Zusammenarbeit mit den Intermediären der Immobilienwirtschaft und den Planungs- und Gebäudetechnikbranchen umgesetzt werden.

- (2) *Marketing*: Auch den Energieeffizienz-Anbietern, d.h. den Planern und Technologie-Lieferanten, ist bewusst zu machen, dass sie Erlebniswerte, gesündere Lebensformen, Komfort, Produktivität der Nutzer der Wirtschaftsgebäude und soziales Prestige mit ihren technischen Lösungen ermöglichen. Damit einhergehen müssen auch die Botschaften des ökonomischen Nutzens der Co-Benefits (z.B. auch mehr Komfort, verbesserte Ergonomie bei Beleuchtungen, bessere Arbeits- und Kapitalproduktivität, Schallschutz, Einbruchschutz, geringere Leerstände, bessere Bonität wegen des Abkommens Basel II).
- (3) Die *Rolle der Intermediäre* wird zuweilen unterschätzt, insbesondere dann, wenn Normengebung oder Standardisierung die Transaktionskosten reduzieren oder die Ausbildung bzw. die berufliche Fortbildung das Hemmnis erheblicher Kenntnismängel beseitigen. Deshalb werden Empfehlungen zu Normen, Standards und Benchmarks gemacht.
- Normen, Standards und Benchmarks (z.B. Normen wie SIA 380/4 oder SIA 382/1) bieten Entscheidungshilfen im technischen Bereich, besonders weil sie zwischen Standardlösungen und zielorientierten Effizienzlösungen unterscheiden. Normen und Benchmarks sollten sowohl auf der Systemebene ansetzen (gesamter jährlicher Energiebedarf sowie spezifische Energiekosten je m² und Jahr) wie auch auf der Ebene der Einzelkomponenten (letzteres, um den gegebenen Marktstrukturen mit hoher Arbeitsteilung und Spezialisierung und klein strukturierten Unternehmen Rechnung zu tragen).
 - Normen und Empfehlungen dienen letztlich als Grundlage für Vorschriften, die gesamtschweizerisch und zunehmend international koordiniert sein sollten. Bei den technischen Produkten könnten Benchmarks und Standards Exportvorteile erbringen.
 - Normen und Empfehlungen (z.B. zu Grenz- und Zielwerten) dienen den Fachleuten in der Praxis als Orientierungshilfe, Planungsgrundlage und Basis für zivilrechtliche Verträge zwischen Bauträgern und Bauleistungserbringern; die Normen und Empfehlungen müssen nicht in vollem Umfang gesetzgeberisch verankert sein, sondern können in *relativ einfach handhabbare Planungshilfen und Tools* umgesetzt sein.
 - Die Entwicklung *integrierter Benchmarks* und *integrierende Planungswerkzeuge*, auf welche sowohl Architekten, technisch orientierte Planer und Kostenplaner gemeinsam zugreifen.

Das weitgehend privatrechtlich organisierte Normenwesen sollte deshalb von staatlicher Seite mindestens wie bisher gestützt werden.

- (4) Neben den mangelhaften Kenntnissen besteht ein Defizit an *Arbeitsunterlagen und rechnergestützten Tools*, welche die wesentlichen Kosten-Nutzen-Relationen ermitteln und Optimierungsansätze häufig erst ermöglichen. *Aus- und Weiterbildungsangebote* – sowohl mehrjährig und intensiv wie auch mit geringem Aufwand zu absolvierende Weiterbildungskurse –, Bereitstellen von *spezifischen Fachpublikationen* (wie z.B. das frühere Programm RAVEL) mit fachlich-technischen Inhalten und wirtschaftlichen Aspekte (Lebenszykluskosten- und Kosten-Nutzen-Betrachtungen) als auch *Arbeitsinstrumente und rechnergestützte Tools* werden empfohlen.
- (5) Weiter zu entwickeln sind technische Standards und Tools für intelligente dynamisierte Steuerungen und Regelung von Wirtschaftsgebäuden, z.B. CO₂-konzentrationsgeführte Lüftung, übergreifende dynamische und antizipierende Optimierungen von Heiz-, Kühl- und Beleuchtungsbedarf unter Nutzung von Nutzungszeiten, Benutzerverhalten und Wettervorhersagen).
- (6) Wenngleich in allen dieser empfohlenen Aktivitäten die Selbstorganisationen der Wirtschaft und einzelne Unternehmungen die Initiative und die Hauptverantwortung übernehmen sollten, so mag eine öffentliche finanzielle und ideelle Unterstützung seitens des Bundes, der Kantone oder grösserer Gemeinden sehr förderlich sein, weil die jeweiligen Aktivitäten ein öffentliches Gut darstellen oder gesamtgesellschaftliche Vorteile mit sich bringen (Beschäftigung, verbesserte Exportpotenziale, ökonomische Effizienz).
- (7) Unter diesem Gesichtspunkt, aber auch aus Sicht eines least cost planning der künftigen Energiebeschaffung, rechtfertigen sich auch anreizorientierte Preismodelle der sich weitgehend im öf-

fentlichen Besitz befindenden Elektrizitätsversorgungsunternehmen (z.B. an Zielvereinbarungen gebundene Preisnachlässe, vgl. EWZ u.a.).

- (8) Technische und bauliche Vorschriften haben sich im Gebäudebereich, insbesondere beim Neubau, als effizientes und effektives Instrument erwiesen. Indirekt entfalten Vorschriften im Neubaubereich auch eine nicht zu vernachlässigende Wirkung im Gebäudebestand, indem der induzierte technische Fortschritt auch bei Gebäude- und Anlagenerneuerungen zum Tragen kommt. Im Vergleich zu Vorschriften im Wärmeschutz besteht bei der gebäudebezogenen Elektrizität ein Nachholbedarf bzgl. verbindlichen Anforderungen. Denkbar sind solche Anforderungen im Bereich Beleuchtung, Lüftung und Kühlung.
- (9) Die erwähnten Anforderungen sind so auszugestalten, dass sie eine relevante Wirkung erzeugen, für Vollzugsorgane und Planende einfach anzuwenden sind und eine hohe Planungsflexibilität aufweisen. Realisiert werden könnte dies über eine duale Vorgehensweise, wobei einerseits Vorgaben zu spezifischen installierten Leistungen gemacht werden und zum anderen – bei Überschreiten dieser Vorgaben – Bedarfsnachweis, Bewilligungs- oder Erneuerungspflicht zur Anwendung kommen (vgl. SIA 382/1 und Vorgehen Kanton ZH bei Klima/Lüftung, Modul 8 der MuKEN im Bereich Grossverbraucher, Kanton GE im Zusammenhang mit der Verbrauchserhebung/VHKA-Befreiung sowie die Pflicht zu Energiekonzepten). Diese Aspekte sind möglichst schweizweit zu koordinieren, um Skaleneffekte bei Fortbildung und Kosten zu erreichen.
- (10) Die öffentliche Hand (Bund, Kantone, Gemeinden) haben einen erheblichen Teil des Bestandes der Wirtschaftsgebäude in ihrem eigenen Besitz. Es wäre zu erwägen, ob nicht gezielte Demonstrationsvorhaben bei der Gebäudesanierung für bestimmte Gebäudetypen (z.B. Schulen, Bürogebäude, Spitäler) in jedem Kanton eine notwendige Voraussetzung als *Beispiel der öffentlichen Hand* durchgeführt werden müssten, um die grossen Anforderungen der Energie- und Klimapolitik glaubwürdig politisch vertreten zu können.
- (11) Wegen der *absehbaren Klimaerwärmung in der Schweiz binnen der kommenden drei bis fünf Jahrzehnte*, steigenden thermischen Lasten (Büroautomation, dichtere Belegung) und zunehmendem Wärmeschutz im Bestand werden Lüftung und Kühlung von Wirtschaftsgebäuden zunehmend an Bedeutung erlangen. Diese Entwicklung sollte mehr bei Neubauten und Re-Investitionen in Gebäudetechnik beachtet werden, um unnötige Nachinvestitionen oder unnötig hohe Elektrizitätskosten zu vermeiden. Überhitzungsschutz (geringe interne Lasten, u.a. durch hocheffiziente Beleuchtung, moderate Glasflächen, Sonnenschutz und adäquate Regelstrategien) sowie bedarfsgeführte und hocheffiziente Gebäudekühlung unter Nutzung der thermodynamischen Möglichkeiten (dynamische und geringe Temperaturdifferenzen, Nutzung der freien Kälte der Luft und von Erdsonden) sind auf allen Ebenen zu fördern.
- (12) Da die Büroautomation zu einem ganz erheblichen Anteil zu den internen Lasten und zum Strombedarf in den Wirtschaftsgebäuden beiträgt, liegt es nahe, hier mehr als bisher auf Möglichkeiten der höheren Stromeffizienz zu achten. Infolge der globalisierten Märkte ist dies in den geeigneten Gruppen der IEA und der EU intensiver zu thematisieren.
- (13) Aufgabe von Forschung und Entwicklung sollte es sein, die Zusammenhänge zwischen Wärmeschutz, internen Lasten, Gebäudetechnik, Komfortnutzen und kostengünstigen Lösungen, die in dieser Arbeit mit aufwändigen Simulationsrechnungen erstellt wurden, in einfache, schnell rechnende Planungswerkzeuge umzugliessen.
- (14) Aufgreifen der hier erarbeiteten Ergebnisse in vorhandene energiewirtschaftliche Modelle zur Projektion des zukünftigen Energiebedarfs (insbesondere den Komfortaspekt bei steigenden internen Wärmelasten durch Büroautomation, die tendenziell steigenden Aussentemperaturen (Klimawandel) und die zunehmenden Komfortansprüche von Gebäudenutzern und gewünschte Produktivitätsfortschritte privater und öffentlicher Arbeitgeber).

