Kunsthalle in Emden

Analyse von Energieverbrauchsdaten und Beurteilung des Energiekonzeptes

Juli 2003

Hochschule Bremerhaven — Prof. Dr.-Ing. Peter Ritzenhoff
Dipl.-Ing. Thomas Schlingmann

schiller engineering — Dipl.-Ing. Heiko Schiller

11/95

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	12803	Referat	25	Fördersumme	2.000.000,00 DM

Antragstitel	Entwicklung und Erprobung neuartiger Energiekonzepte und Umwelttechniken an der Kunsthalle in Emden
Stichworte	Ökobau, Energie, Konzept, Demonstration, Beleuchtung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
5 Jahre	**1997**	**2002**	

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Kunsthalle in Emden Stiftung Henri und Eske Nannen Hinter dem Rahmen 13 26721 Emden	Tel Fax	04921 / 20995 04921 / 28667
		Projektleitung Frau Nannen	
		Bearbeiter Dieter Markus	

Kooperationspartner

- Architekten BDA Dipl.-Ing. Ingeborg Spengelin, Prof. Friedrich Spengelin GbR, Hannover
- Tages- und Kunstlichplanung: Dr.-Ing. Georg Roessler & Partner, Hamburg
- HLS-Planung: IGG, Frank Gebauer, Lilienthal Tel. 04298/30923
- Elektroplanung: Hochbauamt Stadt Emden
- Energiekonzept einschl. Simulation: NEK Beratende Ingenieure GmbH, Braunschweig Tel: 0531/866690

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die seit 17 Jahren bestehende Kunsthalle Emden ist um einen Erweiterungsbau ergänzt worden. Ziel des Projektes war die Reduzierung des Primärenergieverbrauches um über 50 % gegenüber einem vergleichbaren konventionell erstellten Gebäude. Als Randbedingung waren die konservatorischen Vorgaben ensprechend dem Internationalen Museumsstandard einzuhalten.
Die Erarbeitung der baulichen und technischen Optimierungen erfolgte in einem integralen Planungsprozeß unter Verwendung der Ergebnisse der vorab durchgeführten Simulationsrechnungen. Zur Umsetzung der planerischen Ansätze wurde ein Energiemanagementsystem implementiert. Die hierzu erforderliche Datenerfassung wird gleichzeitig für ein Informationsterminal zur Information der Besucher genutzt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Der integrale Planungsprozeß zur Erarbeitung des architektonischen und technischen Konzeptes wurde durch folgende Simulationsrechnungen unterstützt:

- Thermische Gebäude- und Anlagensimulation (Software TAS)
- Nutzung des geothermischen Energiepotentials (Software EED)
- Tageslichtsimulation (Software SIVIEW)

Zur Erreichung der o.a. Primärenergieeinsparung wurden folgende Maßnahmen untersucht:

- Erhöhung der Tageslichtnutzung durch Shedfenster, Lichtlenkung und hohe Reflexionszahlen
- Präzise Regelung des Tageslichteinfalls entsprechend der jeweils zulässigen Werte
- Einsatz effizienter Leuchten, Anlagen und Geräte
- Optimierung der Gebäudehülle in Hinblick auf geringen Heiz- und Kühlenergiebedarf
- Erschließung des geothermischen Energiepotentials durch Erdwärmesonden
- Überwiegende Deckung der Jahresheiz- und –kühlarbeit durch erdgekoppelte Wärmepumpen
- Saisonale Speicherung der überschüssigen, im Sommer anfallenden, Wärme der Kälteanlage
- Einsatz einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage im Altbau

Mit Hilfe der in das Informationsterminal integrierten Meßdatenerfassung und -darstellung erhalten Interessenten nachvollziehbare, aktuelle und aufbereitete Informationen zum Gebäude, zum Energie- und Lichtkonzept sowie zur aktuellen energetischen Situation.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden im Rahmen einer Untersuchung der Hochschule Bremerhaven, Prof. Ritzenhoff, meßtechnisch ausgewertet und analysiert.

Obwohl die grundsätzliche Eignung des gewählten Konzeptes nochmals bestätigt wurde, konnten durch die Untersuchung doch verschiedene Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden:

- Die Leistung der Wärmepumpen ist z. Zt. bezogen auf den derzeitigen Gebäudebestand, da die anstehende Altbausanierung noch nicht ausgeführt wurde, überdimensioniert.

- Das Temperaturniveau der Wärmeabnehmer, (RLT-Geräte und Bauteilbeheizung), liegt für die Wärmepumpen noch zu hoch. Im Zuge der Sanierungsmaßnahme soll das Temperaturniveau noch weiter gesenkt werden.

- Das System kann in gewissen Teilbereichen noch weiter regelungstechnisch optimiert werden. Dies gilt insbesondere für die RLT-Anlage und die Tageslichtnutzung. Die Einhaltung der sehr strengen konservatorischen Randbedingungen erweist sich als sehr großes Hemmnis bei der weiteren Energieeinsparung. So bestehen beispielsweise Probleme bei einer Erhöhung des Tageslichtanteils und Reduzierung der Luftmengen, da dies zu unzulässigen Schwankungen der Strahlungs- und Klimawerte führt.

- Eine Fehlfunktion des Schichtenspeichers führte während der meßtechnischen Begleitung zu ungünstigen Betriebzuständen im Hinblick auf die Effizienz des Brennwertkessels und der Wärmepumpen. Zwischenzeitlich arbeitet der Speicher korrekt, so daß mit einer deutlichen Verbesserung der Wirkungsgrade gerechnet werden kann.

Als schwierig stellt sich auch die Fixierung eines geeigneten Vergleichsmaßstabes für ein Referenzgebäude dar, da es keine einheitlichen Richtlinien für die Auslegung und den Betrieb von RLT- und Heizungsanlagen in Museen gibt. (In den Niederlanden wurden z. B. einheitliche Vorgaben für alle neuen Museen durch den Reichsgebäudedienst erarbeitet). Daher ist eine exakte Bewertung der erzielten Energieeinsparung problematisch. Das seiner Zeit gesteckte Ziel von 50% Einsparung wurde nach derzeitigem Erkenntnisstand nicht erreicht, allerdings wird trotzdem in erheblichem Umfang, gegenüber anderen Museen, deren Verbräuche bekannt sind, Energie eingespart. (Z. B. Neue Pinakothek in München).

Abschließend ist anzumerken, daß bei weniger beengten Grundstücksverhältnissen und einer angepaßten Dimensionierung der Wärmepumpen (ohne Reservepotential für vorgesehene Erweiterungen) weitere Einsparungen bei den Investitionskosten möglich sind.

Die Beteiligten sind jederzeit bereit, Interessenten zu beraten und bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Als Ansprechpartner steht das IGG aus Lilienthal und der Energiekonzeptberater vom Ing. Büro NEK zur Verfügung.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wird Besuchern über das Info-Terminal im Eingangsbereich sowie über das Internet unter www.kunsthalle-emden.de präsentiert.
Darüber hinaus gab es Veröffentlichungen in diversen Zeitungen und Zeitschriften, z. B. bbr-kanal & Rohrleitungsbau. (Geothermie am Beispiel der Kunsthalle Emden)
Ein in der Kunsthalle ausliegendes Merkblatt des Energiekonzeptes liegt vor.

Fazit

Das ehrgeizige Ziel einer 50%igen Energieeinsparung konnte nur teilweise erreicht werden.
Gründe dafür sind die z. Zt. noch zu geringen Wärmeabnahmen auf niedrigem Temperaturniveau und eine für den derzeitigen Gebäudebestand überdimensionierte Wärmepumpenleistung. Darüber hinaus gab es in der Inbetriebnahmephase Probleme mit dem Schichtenspeicher und der zugehörigen Regelungstechnik, die zwischenzeitlich behoben worden sind.
Grundsätzlich bedarf es weitergehender Untersuchungen auf dem Gebiet des Museumsbaus zur Schaffung von aussagefähigen Energie-Referenzwerten. Die Kunsthalle Emden hat hierzu eine Umfrage an andere Museen gestartet. Das realisierte Konzept mit Nutzung kostenloser Umweltwärme und –kälte kann jedoch nach wie vor als richtungsweisend betrachtet werden.

Inhaltsverzeichnis

1 AUFGABENSTELLUNG 4

2 BESCHREIBUNG DES ENERGIEKONZEPTES 5

2.1 Gebäudestruktur 5
2.2 Gebäudehülle 5
2.3 Wärme- und Kälteversorgung 6
2.4 Raumlufttechnik (RLT) 10
2.5 Raumheiz- und Raumkühlflächen 11
2.6 Beleuchtung 14

3 ZIELSTELLUNG UND PROGNOSE 15

4 AUSWERTUNG DER VERBRAUCHSDATEN 18

4.1 Beschreibung der Datenerfassung 18
4.2 Meteorologische Grundlagen 19
4.3 Heizwert und Primärenergiefaktoren 20
4.4 Strom und Gasbezug vor der Erweiterung 21
4.4.1 Gasbezug vor der Erweiterung 21
4.4.2 Strombezug vor der Erweiterung 22
4.5 Strom- und Gasbezug nach dem Umbau 23
4.5.1 Erdgasbezug 01.06.2001 – 31.05.2001 23
4.5.2 Strombezug 01.06.2001 – 31.05.2001 24
4.6 Aufteilung des Energieverbrauches auf Gebäudenutzung 26
4.6.1 Aufteilung des Stromverbrauches der Wärmepumpen 26
4.6.2 Energieverbrauch Gebäudeheizung 27
4.6.3 Energieverbrauch Gebäudekühlung 29
4.6.4 Stromverbrauch Raumlufttechnik (Luftförderung, Luftbefeuchtung) 30
4.6.5 Energieverbrauch Beleuchtung 30
4.6.6 Sonstige Stromverbraucher 32
4.7 Verbrauchskennwerte 34
4.8 Beurteilung der Verbrauchsdaten 35

5 BEURTEILUNG DES ENERGIEKONZEPTES 37

5.1 Gebäudehülle 37
5.1.1 Subjektive Beurteilung 37
5.2 Wärme- und Kälteversorgung 38

5.2.1 Subjektive Beurteilung 38
5.2.2 Messwertanalyse 39
5.3 Raumlufttechnik 41
5.3.1 Subjektive Beurteilung 41
5.3.2 Auswertung ausgewählter Prozessverläufe 42
5.3.3 Auswertung der Volumenstrom- / Luftqualitätsregelung 43
5.4 Beleuchtung 46
5.4.1 Subjektive Beurteilung 46

6 ZUSAMMENFASSUNG 48

7 LITERATUR 50

8 ANLAGEN 51

1 Aufgabenstellung

Mit dem Erweiterungsneubau der Kunsthalle Emden sollte ein energiesparendes Museumskonzept unter Nutzung regenerativer Energiequellen realisiert werden.

Gegenüber dem vorhandenen Altbau aus dem Jahr 1986 waren gleichzeitig höhere Anforderungen an die Beleuchtung und Raumluftqualität aus konservatorischer Sicht zu erfüllen.

Die Planungen verfolgten das Ziel, beiden Aspekten im Rahmen einer integralen Planung gleichermaßen gerecht zu werden. Gegenüber dem konventionellen Museumsbau sollte ein vorbildliches Beispiel der Verbindung von Ökonomie und Ökologie geschaffen werden.

Zur Unterstützung der integralen Planung wurde das Werkzeug Computersimulation begleitend eingesetzt.

Der Neubau wurde wegen seines Demonstrationscharakters von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Die vorliegende Untersuchung verfolgt das Ziel, die Umsetzung der ursprünglichen Planung und das Erreichen der Planungsergebnisse zu analysieren und zu dokumentieren.
Weiterhin war eventuelles Optimierungspotenzial aufzuzeigen, um der anstehenden Planung für die Sanierung des Altbaus Impulse zu geben.

Um diese Aufgabenstellung zu erfüllen, gliederte sich die Tätigkeit in folgende Teilschritte:

1. Bestandsaufnahme und Beschreibung der vorgefundenen Situation
2. Analyse des Energieverbrauchs auf Basis eines vorhandenen Zählerkonzeptes und ein Soll-Ist-Vergleich
3. Auswertung von Einzelmesswerten auf Basis eines vorhandenen Messdatenerfassungssystems zur Analyse des Betriebsverhaltens.

2 Beschreibung des Energiekonzeptes

2.1 Gebäudestruktur

Die Kunsthalle in Emden wurde im Jahr 1986 mit einem neu errichteten Gebäude im Zentrum von Emden eröffnet.
In den folgenden Jahren erforderten die zahlreichen Neuzugänge an Kunstwerken einen Erweiterungsbau, der die Ausstellungsfläche ungefähr verdoppelte sowie Platz für Depots und Werkstätten bietet.

Während das vorhandene Gebäude eher dem Stand des gehobenen Wohnungsbaus entsprach, sollte der Erweiterungsbau den gestiegenen konservatorischen Anforderungen gerecht werden.
Defizite bestanden bisher durch:

- sommerliche Überhitzung
- übermäßige UV-Einstrahlung
- unzureichende Raumluftqualität
- unkontrollierte Feuchteschwankungen
- zu hohem Primärenergiebedarf.

Ein ursprünglich fremdgenutzter Baukörper wurde als Verwaltungsgebäude in das Gesamtensemble einbezogen. Es entstand ein architektonisch homogener Gebäudekomplex, der in die umgebende Wohnbebauung behutsam eingepasst wurde.

Altbau	1.109 m^2
Verwaltung	622 m^2
Neubau	2.423 m^2
Summe	**4.154 m^2**

Tabelle 2.1: Nutzflächen der Gebäudeteile

2.2 Gebäudehülle

Beim Erweiterungsbau wurde das Ziel verfolgt, schon bei der Wahl der Baustoffe den Anforderungen aus Energieeinsparung und Raumklimastabilität bereits auf natürliche, passive Weise gerecht zu werden.

Die Außenwände bestehen aus zweischaligem Mauerwerk mit einer Wärmedämmschicht. Durch die Verwendung eines Innenputzes aus Kalkmörtel sowie Ziegelmauerwerk bei der raumseitigen Mauerwerksschicht wurde die Speicherfähigkeit für Wärme und Feuchtigkeit erhöht. Hierdurch können kurzzeitig auftretende Wärme- und Feuchtebelastungen gepuffert werden, was den Aufwand für die Klimatisierung mindert.

Die k-Werte der Außenwandkonstruktionen gehen über die Mindestanforderungen der Wärmeschutzverordnung hinaus und bilden die Grundlage für die Minimierung der Transmissionswärmeverluste.

	k-Wert
Außenwand EG – OG	0,26 W/(m^2 K)
Außenfenster Neubau	0,80 W/(m^2 K)
Shed-Dach Flachdach	0,20 W/(m^2 K) 0,23 W/(m^2 K)

Tabelle 2.2: Energetische Kennwerte der Gebäudehülle

Bei der Gestaltung der Dächer waren die hohen Anforderungen an die Beleuchtungsqualität der Ausstellungsflächen ausschlaggebend. So dominieren Shed-Dachkonstruktionen mit nach Norden ausgerichteten Fenstern, die Gleichmäßigkeit und Blendfreiheit bei der natürlichen Beleuchtung gewährleisten. Aus Gründen des UV-Schutzes der Kunstwerke kam Sonnenschutzglas (g-Wert 0,4) zum Einsatz.

Das architektonische Konzept führt aufgrund der starken Zergliederung zu einem größeren A/V-Verhältnis der Gebäudehülle, so dass sich der erhöhte Wärmeschutz besonders positiv auf den Jahresheizenergiebedarf auswirken dürfte.

2.3 Wärme- und Kälteversorgung

Als Folge der Erweiterung der Kunsthalle wurde die Energieversorgung mit dem Ziel umgestellt, zukünftig eine verstärkte Nutzung regenerativer Energien vorzunehmen.
Eine neuerrichtete Energiezentrale im Neubau übernimmt die Versorgung der Liegenschaft Kunsthalle mit Wärme und Klimakaltwasser. Davon ausgenommen ist die Wärmeversorgung des Gebäudeteils Verwaltung, in dem eine bestehende Heizkesselanlage weiter betrieben wird.

Im Mittelpunkt der Energieerzeugung steht eine Wärmepumpenanlage, deren Wärmequelle das umliegende Erdreich bildet.
Das Erdsondenfeld besteht aus 11 als Doppel-U-Rohr ausgeführten Sonden mit einer Tiefe von 250 m, so dass sich insgesamt eine Sondenlänge von 2.750 m ergibt. Geht man von einer Leistungsziffer im Heizfall COP = 4,0 aus, ist bei maximalem Wärmepumpenbetrieb von 4 x 56 kW eine Quellleistung von ca. 179 kW erforderlich. Dies entspräche einer spezifischen Leistung von ca. 65 W/m Erdsonde.

In der nachfolgenden Tabelle ist die theoretische Heizlast der installierten Heizleistung gegenüber gestellt. Die Daten für Altbau und Verwaltung mussten wegen fehlender Planungsunterlagen aus den gemessenen Verbrauchswerten näherungsweise zurückgerechnet werden.

Für die Berechnung der Lufterhitzerleistung wurde nur der Vorerhitzer angesetzt, die Summe sämtlicher Vor- und Nacherhitzer ist größer. Der Vorerhitzer ist für Lufttemperaturen +5 °C / +22 °C ausgelegt - die Zonennacherhitzer von +10 °C / +22 °C. Da sowohl Wärmerückgewinnung (Austrittstemperatur laut Auslegung 10,9 °C) als auch Umluftbeimischung existieren, wird eine Leistungsvorhaltung für die Lufterwärmung 17 K insgesamt für ausreichend erachtet.

Heizlast		
Altbau (überschläglich)	[kW]	64,0
Verwaltung (überschläglich)	[kW]	30,0
Neubau (Planung)	[kW]	47,5
Lufterhitzer RLT	[kW]	98,0
Summe	[kW]	**239,5**
Installierte Heizleistung	[kW]	
Heizleistung Wärmepumpen (4 à 56 kW)	[kW]	224,0
Heizleistung Brennwertkessel	[kW]	322,0
Summe	[kW]	**546,0**

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung Heizlast – Heizleistung

Die in Tabelle 2.3 angegebene Heizlast enthält noch keine zusätzlichen Bedarfe, die durch eine zukünftige Erweiterung oder Sanierung entstehen können. Mittels einer dynamischen Gebäudesimulation wurde eine Heizlast von 181 kW (Neubau 85 kW, Altbau 92 kW) ermittelt /2/. Unter den Planungsbeteiligten bestand Einigkeit, dass von einer Heizlast von 290 kW auszugehen ist, welche die Versorgung auch bei einem noch nicht sanierten Altbau sicherstellen kann /8/. Installiert wurde ein Gas-Brennwertgerät mit 322 kW Nennwärmeleistung.

Zwei Wärmepumpen sollten primär zur Bereitstellung von Wärme und zwei zur Bereitstellung von Kälte vorgesehen werden. Da sie jedoch zur Wärmeversorgung beitragen können, beträgt die ge-

samte installierte Heizleistung 546 kW. Im Verwaltungsgebäude ist ein Heizkessel mit einer Nennwärmeleistung von 21 kW installiert.

Man kann erkennen, dass die installierte Heizleistung den momentanen Bedarf übersteigt. In der Kunsthalle sind jedoch weitere Bauvorhaben in Planung. Nach Aussage des Haustechnikplaners ergibt sich einer vorläufigen Schätzung entsprechend im Anschluss an die anstehende Erweiterung und Sanierung ein Gesamtwärmebedarf von 470 kW.
Die installierten Wärmepumpen dienen demnach derzeit einzig zur Einsparung von Primärenergie, sind jedoch zur Sicherstellung der Wärmeversorgung momentan nicht erforderlich. Eine vollständige Heizlastabdeckung des z.Z. existierenden, jedoch noch nicht komplett sanierten Gebäudekomplexes erscheint mit dem ausschließlichen Einsatz aller vier Wärmepumpen möglich.
Das auf Simulationsberechnungen basierende Konzept /1/ sah aus wirtschaftlichen Gründen vor, ca. 30 % der resultierenden Heizlastspitze von 181 kW mittels Wärmepumpen zu decken. Aus dem bivalent geplanten Betrieb der Anlage wurde dafür eine Deckung des Jahresheizenergiebedarfs durch die Wärmepumpen von ca. 75 % erwartet.

Die Wärmepumpen ermöglichen eine sogenannte „reversible" Betriebsweise, d. h. jede Wärmepumpe kann als Kältemaschine betrieben werden. Die hydraulische Einbindung der Kältemaschinen erfolgte in einem Vier-Leiter-Netz, so dass ein paralleler Heiz- und Kühlbetrieb mehrerer Maschinen möglich ist.

Kühllast		
Altbau	[kW]	-
Verwaltung	[kW]	-
Kühldecken Neubau	[kW]	5,9
Luftkühler RLT	[kW]	149,6
Summe	[kW]	**155,5**
Installierte Kühlleistung	[kW]	
Kühlleistung Wärmepumpen (4 à 55 kW)	[kW]	220,0
Summe	[kW]	**220,0**

Tabelle 2.4: Gegenüberstellung Kühllast – Kühlleistung

Die in Tabelle 2.4 angegebene Kühllast enthält noch keine zusätzlichen Bedarfe, die durch eine zukünftige Erweiterung oder Sanierung entstehen können. Diese zusätzlichen Bedarfe belaufen sich nach Aussage des Haustechnikplaners auf 95 kW. Die berechnete Kühllast resultiert aus der genannten Gebäudesimulation. Da entsprechend der Jahresdauerlinie der Kühlleistung nach /2/ die maximale Kühlleistung nur an wenigen Stunden im Jahr erforderlich ist, reicht im allgemeinen der Einsatz von 2 Wärmepumpen zur Kühlung aus. Zur Abdeckung des Spitzenbedarf steht ein Kaltwasserspeicher mit 2000 l Fassungsvermögen zur Verfügung.

Bei Betrieb aller 4 Maschinen für Kühlzwecke würde die installierte Kühlleistung zurzeit den Kühlleistungsbedarf um 42 % übersteigen.
Der Hauptkältebedarf resultiert aus den hohen Anforderungen an die Feuchtekonstanz der Ausstellungsflächen. Wegen der in extremen Sommersituationen kurzzeitig auftretenden Außenluftfeuchten müssen hohe Anschlussleistungen vorgehalten werden, die aus statistisch-meteorologischen Gründen nur selten maximal einzusetzen ist. Die vorgehaltene Kälteleistung deckt diesen Bedarf und bietet zusätzliche Reserven, sofern von einem störungsfreien Betrieb der Anlagen und der Erdwärmesonden ausgegangen werden kann.

Die Wärmeabnehmerseite der neuen Energiezentrale ist in einen sogenannten Hochtemperaturbereich (HT) und einen Niedertemperaturbereich (NT) strukturiert.

HT-Abnehmer:	Bauteiltemperierung Neubau
	z.Z. noch die Fußbodenheizung Altbau
	sonstige Raumheizflächen
	weitere Abnehmer nach Sanierung und Erweiterung des Altbau
NT-Abnehmer:	Heizregister RLT-Gerät

Alle Wärmeerzeuger speisen einen zentralen Schichtenspeicher, alle Abnehmer beziehen die Wärme aus dem Schichtenspeicher. Dieser hat zwei Aufgaben zu erfüllen.

1. Pufferfunktion: Verringerung der Schalthäufigkeit der Wärmepumpen
2. Verteilfunktion: Einspeisung von NT-Wärme in den HT-Kreis bei abgesenkter Vorlauftemperatur in der Übergangszeit.

Neben der Optimierung der Fahrkurven für die Temperaturregelung in den Heizkreisen kommt der Funktion des Schichtenspeichers somit eine zentrale Bedeutung zu. Seine ordnungsgemäße Funktion ist ausschlaggebend für den Deckungsanteil regenerativ erzeugter Wärme am Jahresheizenergiebedarf des Gebäudes.
Während des Untersuchungszeitraumes kam es aufgrund zu hoher Zuströmgeschwindigkeiten zu einer unerwünschten Durchmischung im Schichtenspeicher, die den gewünschten bivalenten Betrieb behinderte.
Eine gewisse Verbesserung trat durch Änderungen an der Fahrkurve des Brennwertkessels auf, die in den folgenden Abschnitten dokumentiert werden konnte. Der bivalente Betrieb wird seit Sommer 2002 durch eine Begrenzung der zugeführten Volumenströme, der Stillegung eines WP-Vorlaufes im HT-Rücklaufbereich des Schichtenspeichers sowie der Festlegung von Hysteresebereichen für die Schaltvorgänge der Wärmepumpen und des Brennwertkessels begünstigt. Eine gesonderte Betrachtung des Speicherverhaltens war im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, da die benötigten Messdaten von der Gebäudeleittechnik nicht bereit gestellt werden können.

2.4 Raumlufttechnik (RLT)

Mit dem Erweiterungsbau wurde neben den energetischen Ziele aus konservatorischen Gründen das Ziel verfolgt, höheren Anforderungen an das Raumklima gerecht zu werden. Da hierzu neben der Temperaturkonstanz auch die Feuchtekonstanz zählt, waren raumlufttechnische Anlagen unumgänglich.

In der neu geschaffenen Energiezentrale befindet sich ein kombiniertes Zu- und Abluftgerät, welches die thermodynamischen Funktionen Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten sicherstellt.

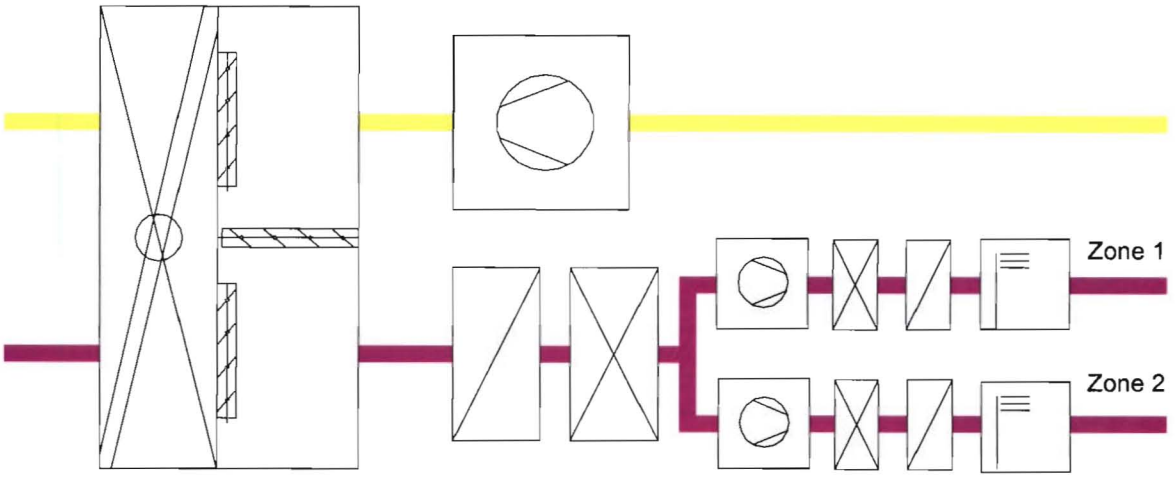


Bild 2.1: Schema RLT-Zentralgerät

Das Lüftungszentralgerät ist mit einem Zuluftvolumenstrom von ca. 16.450 m^3/h imstande, für zwei Zonen unterschiedliche Zuluftkonditionen sicherzustellen.

Die Zonen gliedern sich gemäß nachfolgender Tabelle. Die Luftvolumina ergeben sich aus der raumweisen Aufstellung entsprechend Anlage 5.

	Zone 1	Zone 2
Versorgungsbereich	Säle, Kabinette	Werkstätten, Magazin
Zuluftvolumenstrom [m^3/h]	10.680	5.770
Fläche	1.340	675
mittl. spezif. Volumenstrom [$m^3/(h\ m^2)$]	8,0	8,5

Tabelle 2.5: Versorgungsbereiche Raumlufttechnik

Aus Sicht der Energieversorgung für das RLT-Gerät sind besondere Aspekte nennenswert.

1. Der Vorkühler wird direkt mit Sole aus dem Erdreich versorgt und dient damit zur Nutzung von Umweltenergie.

2. Die Lufterhitzer sind für das Temperaturniveau 45°C / 35 °C ausgelegt und können damit ganzjährig Niedertemperaturwärme der Wärmepumpen abnehmen.
3. Der regenerative Wärmerückgewinner ist mit hygroskopischer Beschichtung ausgeführt und eignet sich neben dem Wärmerückgewinn auch zum Feuchterückgewinn.
4. Die Dampferzeugung zur Luftbefeuchtung erfolgt elektrisch. Aus primärenergetischer Sicht ist dies nachteilig. Angesichts der Anlagengröße ist die Elektrodampferzeugung allerdings die wirtschaftlichste Alternative, will man aus Gründen der Hygiene auf Verdunstungsbefeuchter verzichten.

Das Regelungskonzept der raumlufttechnischen Anlage ist sehr komplex und durch die Überlagerung mehrerer Funktionen gekennzeichnet.

1. Die Zulufttemperatur wird zentral vorgeregelt. Wärmerückgewinner, Sole-Vorkühler und Vorerhitzer werden dafür in Sequenz angefahren.
2. Nach der zonenweisen Trennung des Zuluftstromes erfolgt die Feinregelung von Zulufttemperatur und Zuluftfeuchte.
3. Die Raumtemperaturregelung im Kühlfall erfolgt durch Variabel-Volumenstromregler, die den Räumen direkt zugeordnet sind. Der Heizfall wird durch örtliche Heizflächen abgedeckt.
4. Die Raumluftqualität wird über CO_2-Sensoren erfasst und dient zur Steuerung der Außenluftklappe.
5. Die Ventilatordrehzahl wird durch den Einsatz von Frequenzumformern geregelt. Als Regelgröße fungiert der statische Druck im Kanalnetz.

Den Räumen wird die Zuluft über Sockelauslässe nach dem Quellluftprinzip zugeführt.
Bei vorgegebenem Luftvolumenstrom kann die Kühlleistung der RLT-Anlage durch die Differenz von Zuluft- und Ablufttemperatur beeinflusst werden.
DIN 1946 – 2 setzt Quellluft-Systemen im Komfortbereich wärmephysiologisch begründete Grenzen hinsichtlich der Kühlleistung:

- die Lufttemperatur in 0,1 m Höhe über dem Fußboden darf 21 °C nicht unterschreiten
- der vertikale Lufttemperaturanstieg darf höchstens 2 K je m Raumhöhe betragen.

Legt man z.B. bei einer Beaufschlagung mit 12 $m^3/(h\ m^2)$ eine maximal realisierbare Temperaturdifferenz von 5 K zugrunde, ergibt sich eine Kühllastabfuhr von max. 20 W/m^2.
Damit ist auch der Regelbereich für die Variabel-Volumenstromregelung begrenzt.

2.5 Raumheiz- und Raumkühlflächen

In den Ausstellungsflächen des Neubaus wurde ein neues Konzept bezüglich der Raumheizflächen verfolgt. Eine sogenannte „thermische Bauteilaktivierung" soll aufgrund des Selbstregeleffektes zur Klimakonstanz beitragen. Aus diesem Grund wurden im Sockelbereich der Außenwände Heizungsrohre aus Kupfer mit Durchmessern zwischen 15 und 22 mm integriert. Sie befinden sich unmittelbar über

den ebenfalls in die Sockel integrierten Quellluftauslässen und bestehen aus übereinander befindlichen Vor- und Rücklaufleitungen mit zusätzlichen Schleifen im Fenster bzw. Außenwandeckbereich.

Das Bauteiltemperiersystem wird über das Teil-Heiznetz versorgt, das in frühen Planungsunterlagen mit einer Temperaturspreizung von 80 °C / 60 °C angegeben war. Konkrete Betriebserfahrungen haben möglicherweise später zu geringeren Werten von 70 °C / 50 °C bzw. nach Aussage des Planers zu 65 °C / 45 °C bei -10°C Außentemperatur geführt.

Aus energetischer Sicht sind großflächige Heizsysteme grundsätzlich zu befürworten, da damit gegenüber konventionellen Heizkörpern niedrige Systemtemperaturen realisierbar sind.
Die grundsätzlich positiven Effekte von Flächenheizsystemen können allerdings mit der vorliegenden Auslegung und Dimensionierung nicht genutzt werden.

1. Vorlauftemperaturen von 80 °C können von Wärmepumpen nicht geliefert werden und machen eine zweite konventionelle Wärmeerzeugungsanlage erforderlich. Die vorhandene Anschlussleistung der Wärmepumpen erscheint dadurch überdimensioniert.
2. Durch Absenken der Vorlauftemperaturen in der Übergangszeit lässt sich bei optimaler Regelung regenerativ erzeugte Wärme in die Heizflächen einkoppeln. Eine wünschenswerte Maximierung des regenerativen Anteils am Jahresheizenergiebedarf stehen die hohen Auslegungstemperaturen im Wege.
3. Die Leistungsziffer (COP) der Wärmepumpen wird durch die Kondensationstemperatur in starkem Maße beeinflusst. Somit führen hohe Auslegungstemperaturen der Heizflächen gegenüber großflächigen Fußboden- oder Wandheizungen zu einem erhöhten Stromverbrauch.
4. Der gewünschte Selbstregeleffekt wird ebenfalls durch die Systemtemperaturen beeinflusst. Je geringer die Differenz zwischen Raumtemperatur und Oberflächentemperatur der Flächenheizung desto stärker wirken sich schwankende thermische Raumbelastungen auf die Leistungsabgabe des Systems aus. Der durchaus gewünschte Selbstregeleffekt wird durch die hohen Systemtemperaturen stark negativ beeinflusst.

Aus vorgenannten Gründen ist es nicht verständlich, dass die Fußbodenheizung des Altbaus, die einen originären Niedertemperaturabnehmer darstellt, über den Hochtemperatur-Verteilerkreis in die Wärmeversorgung eingebunden wird. Das Potential für die maximale Nutzung regenerativer Energien wird hierdurch eingeschränkt.

Die Kühllastabfuhr durch die als Quellluftsystem ausgeführte Lüftungsanlage ist aus Behaglichkeitsgründen begrenzt.
Zur Deckung von Kühllastspitzen gelangen daher zusätzlich Kühldeckenelemente vom Fabrikat Krantz Typ SKS im Sheddachbereich zum Einsatz. Die Besonderheit dieses Typs liegt in dem gesteigerten Konvektivanteil, der spezifische Kühlleistungen von mehr als 100 W/m^2 möglich macht.
Den Planungsunterlagen sind folgende Daten zu entnehmen:

- Anzahl Kühldeckenelemente: 22 St.

- Gesamtfläche aktiv: 51,5 m^2
- Kühlleistung gesamt: 5,85 kW.

Grundsätzlich ist der Einsatz von Kühldecken aus zwei Gründen zu befürworten:

1. der Energiebedarf zum Transport des Mediums Wasser ist deutlich geringer als beim Medium Luft
2. die hohen systembedingten Vorlauftemperaturen von Kühldecken (16 °C / 18 °C) eignen sich besonders für den Einsatz von Umweltenergie und „freier Kühlung"
3. die hohen Vorlauftemperaturen können zu günstigen Leistungsziffern (COP) bei der maschinellen Kälteerzeugung führen.

Der letztgenannte Vorteil kann nicht realisiert werden, da der vorgefundene Anschluss der Kühldecken aus dem Kaltwassernetz der RLT-Anlage (6 °C / 12 °C) mit versorgt wird. Aufgrund der geringen Kühldeckenfläche dürften die Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf gering sein.

Aus Sicht von Konservatoren stellt der Einsatz von Kühldecken über den Exponaten eine Gefahr für Wasserschäden an den Ausstellungsstücken dar und sollte daher vermieden werden.

2.6 Beleuchtung

Die Beleuchtung in einem Museum stellt ein wesentliches Gestaltungselement bei der Präsentation der Objekte dar. In der Kunsthalle Emden wurde das Ziel verfolgt, durch natürliche Beleuchtung den Tageslichtcharakter zu erhalten, und den Anteil der künstlichen Beleuchtung zu minimieren. Dennoch sind auch hinsichtlich der Beleuchtung besondere konservatorische Randbedingungen einzuhalten, die insbesondere durch das integrierte Verschattungssystem zu gewährleisten sind.

Neben der verstärkten Tageslichtnutzung dienen einzelne Seitenfenster vorwiegend zur Sichtverbindung der Besucher nach außen und haben nur einen vernachlässigbaren Beitrag zur Gesamtbeleuchtung.

Die zur Beleuchtung der Ausstellungsflächen wie auch der übrigen Gebäudeteile benötigte Energie verursacht einen großen Teil des Primärenergiebedarfes, weshalb besondere Anstrengungen zur Reduzierung desselben vorgenommen wurden.

In der Kunsthalle sind die Beleuchtungskonzepte zwischen Altbau und Neubau getrennt zu betrachten. Im Altbau liegt keine automatische Kunstlichtsteuerung vor. Die Fenster können über die teilweise innen angebrachten Jalousien verschattet werden. Über die ins Dach integrierten Lichtschächte wird Tageslicht ins Innere der alten Ausstellungsräume geleitet. Die nach Norden gerichteten Shedfenster sind von außen nicht verschattet.

In den Ausstellungsräumen des Erweiterungsbaus ist eine Beleuchtungsregelung installiert. Die Beleuchtungsstärke kann je nach Ausstellung über ein zentrales Sollwertprogramm vorab begrenzt werden. Die Sollwerte orientieren sich an den zulässigen Werten, die durch die Exponate vorgegeben sind. Hat diese Sollwertvorgabe stattgefunden, wird die Beleuchtung tageslichtabhängig angepasst. Die Anpassung erfolgt individuell für jeden einzelnen Raum. In den Decken integrierte Sensoren messen das Beleuchtungsniveau und regeln die Beleuchtungsstärke auf die Sollwerte ein. Weitere Sensoren bestimmen die Beleuchtungsstärke an den Decken in unmittelbarer Nähe der Shedfenster. Sie steuern die Lammellenstellung der Jalousien, um den Tageslichtanteil zu erhöhen oder ggf. eine übermäßige Lichteinwirkung auf die Exponate zu begrenzen.

Bei Begehungen der Kunsthalle fiel auf, dass die vorhandenen Jalousien weitestgehend geschlossen waren. Diese Beobachtung war sowohl an Tagen mit geringer bis keiner Bewölkung zu verzeichnen, wie auch an Tagen, an denen der Himmel mit Wolken dicht verhangen war. Die Verschattung ließ keinen Blick nach außen zu. Der Tageslichtnutzen ist dabei nicht ohne Weiteres erkennbar. Den durch die konservatorischen Rahmenbedingungen vorgegebenen Begrenzungen des Lichtangebotes auf den Exponaten musste an dieser Stelle möglicherweise Vorrang eingeräumt werden.

3 Zielstellung und Prognose

Mit Abschluss des Bauvorhabens wurde das Ziel verfolgt, gegenüber einem „Standardmuseumsbau" eine Primärenergieeinsparung von über 50 % zu erzielen.

Mit Primärenergie wird die für die Bereitstellung der jeweiligen Nutzenergien Strom und Wärme erforderliche Primärquelle bezeichnet. Im Falle der Wärmenutzung kann vereinfachend angenommen werden, dass der Energieinhalt von Gas zu 100% in Nutzwärme umgewandelt wird. Der Primärenergiefaktor beträgt damit 1. Zur Bereitstellung von Strom wird in Deutschland vielfach Kohle als Primärenergiequelle eingesetzt. Da lediglich etwa 1/3 des Energieinhaltes der Kohle in Strom umgewandelt wird, wird der Stromverbrauch mit einem Primärenergiefaktor von etwa 3 bewertet. Im weiteren Verlauf der Analyse wird als Primärenergiefaktor für Strom 2,86 angenommen.

Im Förderantrag nach /5/ wurde für ein Referenzgebäude ein jährlicher Primärenergiebedarf von 700 MWh angegeben, wobei keine Angaben zur Bilanzgrenze erfolgten. Dabei wurde ein spez. Heizenergieverbrauch von 40 kWh/(m^2 a) sowie ein spez. Stromverbrauch von 22 kWh/(m^2 a) angegeben. Der Wert für den Heizenergieverbrauch beruht voraussichtlich auf einem Druckfehler und sollte entsprechend den weiteren dort angegeben Werten vermutlich bei 85 kWh/(m^2 a) liegen.

Im weiteren Projektverlauf wurden verschiedene Simulationsrechnungen beauftragt. Die Konzeptoptimierung /1/ setzte auf die bereits angelaufene Planung auf. Es kamen Computersimulationen zum Einsatz, die folgende Schwerpunkte umfassten:

1. Dynamische Gebäudesimulation /2/.
2. Tageslichtsimulation /3/

Beide Simulationsuntersuchungen lieferten die Grundlage einer Konzeptoptimierung /1/, bei der die Auswirkungen unterschiedlicher Optimierungsschritte quantifiziert wurden.

Als Ergebnis der Simulationen bzw. der anschließenden Konzeptoptimierung ergab sich ein rechnerischer Primärenergiebedarf für Alt- und Neubau von 2.719 MWh. Dieser Fall wurde nach Angabe der Ingenieurgesellschaft, welche die Computersimulation vorgenommen hat, als „Standardausführung" bezeichnet. Bezogen auf den reinen Neubau wurde für die Standardausführung ein Primärenergiebedarf von 1.454 MWh veranschlagt. Für den Altbau beträgt der entsprechende Primärenergiebedarf demnach 1.265 MWh. Bei der hierbei angenommenen „Standardausführung" sind bereits energiesparende Komponenten enthalten, so dass es sich hierbei um eine anspruchsvolle Vergleichsgröße handelt. Gleichfalls sei darauf hingewiesen, dass Aussagen zur Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse wegen fehlender Kenntnis aller Berechnungsumstände nicht getroffen werden können.

Ausgehend von der „Standardplanung" wurden folgende Optimierungsschritte vorgeschlagen:

1. Erhöhter Dämmstandard
2. zusätzliche Erhöhung der Dämmstoffstärke auf 130 mm

3. zusätzlicher Einsatz einer RLT-Anlage mit variablem Volumenstrom
4. zusätzlicher Einsatz einer erdreichgekoppelten Wärmepumpe (70 % Deckung der Jahresheizarbeit zzgl. Kälteerzeugung)
5. zusätzliche tageslichtabhängige Regelung und effizientes Kunstlichtsystem
6. zusätzliche Erhöhung der Reflexionsgrade
7. zusätzliche Tageslichtnutzung durch Lichtlenkung.

Die Lichtlenkung durch Lichtschwerter entsprechend Variante 7 wurde nicht umgesetzt, da die optischen Effekte im Ausstellungsbereich des Museums nicht akzeptierbar sind. Für die realisierte Variante 6 gibt /1/ folgende Primärenergiebedarfswerte an:

- Altbau: 565,5 MWh
- Neubau: 680,5 MWh
- **Summe: 1.246,0 MWh.**

Für den Altbau steht eine Überprüfung des Ergebnisses noch aus, da die Arbeiten zur Sanierung noch nicht begonnen haben. Für den Neubau wurde eine Einsparung gegenüber dem „Standardfall" von 53 % vorhergesagt.

Auf der Homepage der Kunsthalle wird z.Zt. noch die Primärenergieeinsparung entsprechend Variante 7 (Reduzierung auf 1.222 MWh pro Jahr) angegeben.

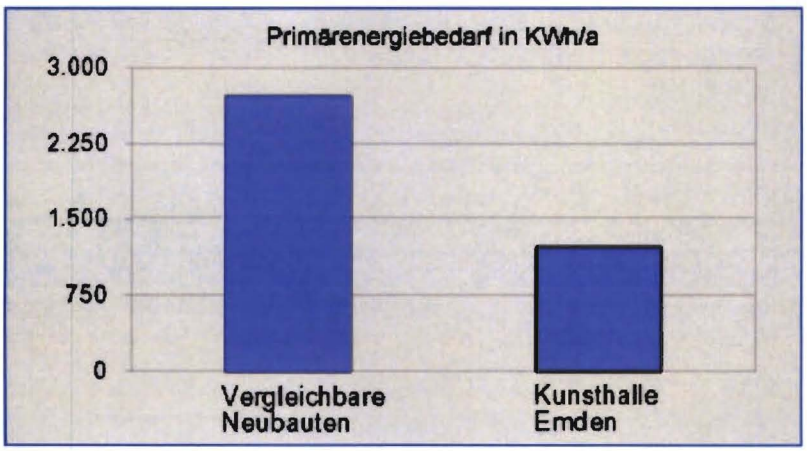


Bild 3.1: Primärenergieeinsparung entspr. Homepage

Die Werte des o.g. Förderantrages erscheinen als Referenzwerte sehr unrealistisch, da für den mittleren spez. Wärmeverbrauch nach der VDI-Richtlinie 3807 /7/ bereits bei typischen Verwaltungsgebäuden ein Wert von 110 kWh/(m^2 a) und für Gebäude im Bereich der wissenschaftlichen Forschung ein Wert von 155 kWh/(m^2 a) angegeben wird. Eine Berücksichtigung der konservatorischen Rahmenbedingungen eines Kunstmuseums ist darin nicht enthalten.

Mittlere Referenzwerte	Strom	Wärme	Einheit
Verwaltungsgebäude	17	110	kWh / (m^2 a)
Wiss. Forschung	15	155	kWh / (m^2 a)

Tabelle 3.1: Vergleichskennwerte nach VDI 3807

Im Bereich des Stromverbrauches wurden 22 kWh/(m^2 a) als Referenzfall bezeichnet. Dies erscheint im Vergleich mit Referenzwerten von Verwaltungsgebäuden realistisch, muss jedoch in Bezug zur Museumsumgebung bewertet werden.

Die Ergebnisse der Simulationen werden im folgenden als Referenzwerte herangezogen, wenngleich auch die Simulationsergebnisse einer kritischen Würdigung im Rahmen des Möglichen zu unterziehen sind.

4 Auswertung der Verbrauchsdaten

4.1 Beschreibung der Datenerfassung

Die Energieversorgungsanlage der Kunsthalle beinhaltet ein umfangreiches Verbrauchsdaten-Erfassungssystem. Die in nachfolgendem Bild dargestellten Einzelzähler dienen folgenden Aufgabenstellungen:

- Kontrollinstrumentarium für die angestrebte Energieeinsparung
- Online-Präsentation im Internet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung war das Messkonzept bereits realisiert, so dass kein Einfluss auf die Zähleranordnung genommen werden konnte. Vielmehr wurden die vorhandenen Zählerdaten und Trendaufzeichnungen der GLT genutzt.

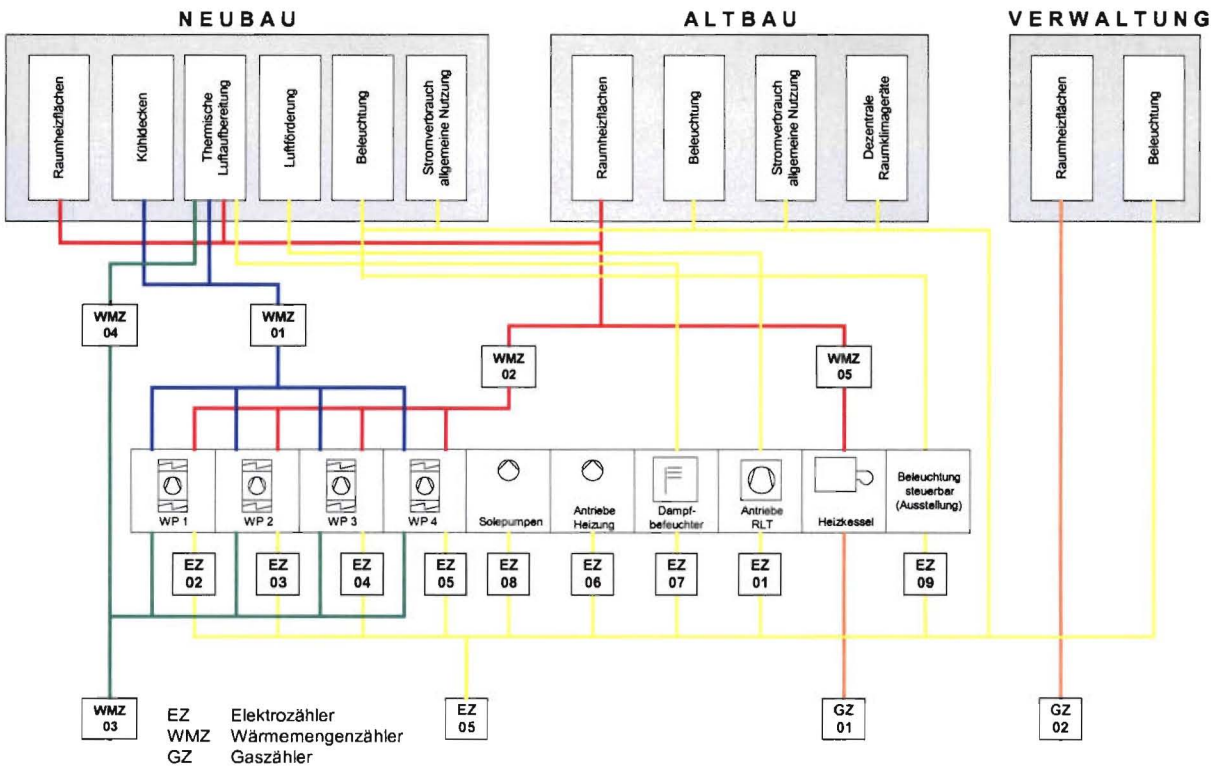


Bild 4.1: Schema Energieverbrauchszähler

Plausibilitätsprüfungen ergaben dass die Umwandlungsfaktoren einiger Stromzähler nicht bzw. falsch berücksichtigt wurden. In den nachfolgenden Auswertungen wurde dies korrigiert, die Internetdarstellung enthält teilweise fehlerhafte Daten.

Der Wärmemengenzähler im Solenetz (in Bild 4.1 WMZ 03) wurde nicht in die Auswertung einbezogen, da sowohl Nutzwärme im Heizfall als auch Abwärme im Kühlfall gleichermaßen erfasst wurde.

4.2 Meteorologische Grundlagen

Die Bewertung der Energieverbrauchs-Kennzahlen eines einjährigen Betrachtungszeitraumes unterliegt witterungsbedingten Unwägbarkeiten. Mit Hilfe von Klimadaten, die der Deutsche Wetterdienst online zur Verfügung stellt, wurde das Ziel einer Witterungsbereinigung der Messwerte verfolgt.

Zur Verfügung standen folgende Daten des DWD:

1. Wetterstation Emden: Monatsmittelwerte der Außentemperatur 1997 – 2002
2. Wetterstation Bremen: Normalwerte der Außentemperatur (Mittelwert aus ca. 30 Jahren)

Die Normalwerte der Station Emden standen nicht zur Verfügung. Da für die Simulationsberechnungen die Wetterdaten des Testreferenzjahres 02 (DWD-Station: Bremerhaven) /4/ verwendet wurden, eignen sich die auf das Normalklima von Bremen umgerechneten Verbrauchsdaten gut für den Vergleich mit den Simulationsergebnissen.

Für die Bereinigung der Verbrauchswerte des Altbaus fehlen die Monatsmittelwerte der Jahre 1992 – 1997. Hier konnte nur eine Mittelwertbildung der Verbrauchsdaten aus 6 Jahren vorgenommen werden.

Monat	Normalwert Station: Bremen	2001 - 2002 Station: Emden
	[°C]	[°C]
Juni	*15,5*	*13,7*
Juli	*16,8*	*17,8*
August	*16,5*	*18,0*
September	**13,4**	**13,0**
Oktober	**9,6**	**13,6**
November	**5,1**	**7,0**
Dezember	**2,1**	**2,3**
Januar	**0,8**	**3,9**
Februar	**1,3**	**6,0**
März	**4,0**	**6,1**
April	**7,6**	**8,4**
Mai	*12,4*	*13,0*
Mittelwert Sep. - Apr. $t_{m,HP}$	5,5	7,5
Korrekturfaktor f_T	**1,00**	**1,16**

Tabelle 4.1: Vergleich der Monatsmitteltemperaturen mit Normalwerten

Zur Auswertung wurden die Monatsmittelwerte der Außentemperatur einer gedachten Heizperiode von September – April bei einer mittleren Innenraumtemperatur von 20 °C herangezogen.

Eine analoge Vorgehensweise wurde für die Umrechnung des Gasbezugs für die Kesselanlage der Verwaltung vorgenommen. Verbrauchsdaten liegen für den Zeitraum 07/98 – 07/2000 vor. Für diese Dauer ergibt sich eine mittlere Außentemperatur der Heizperiode von 7,13 °C, was zu nachfolgenden Korrekturfaktoren führt.

- Umrechnung auf Betrachtungszeitraum: 0,97
- Umrechnung auf Normwerte: 1,13.

4.3 Heizwert und Primärenergiefaktoren

Zur Umrechnung der Erdgasvolumina in Energieverbräuche war die Kenntnis des Heiz- bzw. Brennwertes erforderlich.
Die Stadtwerke Emden geben in den Online-Informationen für den Primärenergieträger Erdgas einen Brennwert H_o = 9,742 kWh/m^3 an. Für die nachfolgenden Betrachtungen erfolgt ein Bezug auf den Heizwert, der nach telefonischer Rückfrage mit H_u = 8,815 kWh/m^3 beträgt.

Aufgrund der bivalenten Wärmeversorgungsanlage ist eine zusammenfassende Darstellung der verschiedenen Primärenergieträger sinnvoll.
Um einen direkten Vergleich mit den Prognosen des Ursprungskonzeptes /1/ zu ermöglichen, wurden die identischen Primärenergiefaktoren verwendet:

- Strom: 2,86
- Erdgas: 1,00.

4.4 Strom und Gasbezug vor der Erweiterung

Die Betrachtung des Primärenergiebezugs vor der Erweiterung dient dem Ziel, den derzeit gemessenen Energieverbrauch verursachungsgerecht auf die einzelnen Baukörper umzulegen.
Da im Altbau und im Verwaltungsgebäude keine wesentlichen energierelevanten Änderungen stattgefunden haben, wird der frühere Verbrauch nach Witterungsbereinigung als Referenz herangezogen.

4.4.1 Gasbezug vor der Erweiterung

Der vor 1998 mit Heizwärme versorgte Altbau weist eine beheizte Fläche von 1.109 m^2 auf. Die Verbrauchsabrechnungen 1992 – 1997 ergaben einen spezifischen Primärenergieverbrauch von durchschnittlich 148,1 MWh bzw. 133,6 kWh/m^2.

Verbrauchsjahr	Verbrauch Erdgas L	Verbrauch Heizwert Hu
	m^3	kWh
1992	15.769	139.004
1993	18.563	163.633
1994	16.061	141.578
1995	13.023	114.798
1996	20.855	183.837
1997	16.554	145.924
Mittelwert	**16.804**	**148.129**
Abweichung oben	24%	
Abweichung unten	-23%	

Tabelle 4.2: Erdgasverbrauch Altbau vor Umstellung der Energieversorgung

Unterstellt man für den früheren Anlagenbetrieb einen Niedertemperaturheizkessel mit einer Aufwandszahl von 1,15, ergibt sich ein jährlicher Nutzenergiebedarf Heizwärme von 128.808 kWh. Dieser Wert findet Eingang in die Berechnung der Aufteilung des derzeitigen Primärenergieverbrauches der einzelnen Bauteile in Tabelle 4.8.

Eine Abschätzung der Heizlast des Altbaus ist möglich, wenn man von ca. 2.000 Vollaststunden der Kesselanlage ausgeht. Es ergibt sich eine Heizlast von ca. 64 kW bzw. 58 W/m^2.

4.4.2 Strombezug vor der Erweiterung

Die Stromabrechnungen der Jahre 1993 bis 1998 konnten ebenfalls ausgewertet werden. Sie beinhalten nur den Altbau - für das heutige Verwaltungsgebäude waren separate Zähler installiert.

Verbrauchsjahr	Verbrauch
	kWh
1993	78.300
1994	83.340
1995	85.880
1996	91.120
1997	92.580
1998	97.180
Mittelwert	**88.067**
Abweichung oben	10%
Abweichung unten	-11%

Tabelle 4.3: Stromverbrauch Altbau in der Vergangenheit

Aus dem durchschnittlichen Stromverbrauch der Vergangenheit lassen sich Rückschlüsse auf den Energieverbrauch der Beleuchtung schließen (siehe Abschnitt 4.6.5).

4.5 Strom- und Gasbezug nach dem Umbau

4.5.1 Erdgasbezug 01.06.2001 – 31.05.2001

Für den Erdgasbezug der Brennwertkesselanlage liegen zwei Verbrauchsmessungen vor.

1. Abrechnungen des Erdgasversorgungsunternehmen
2. Messwerte eines installierten Gaszählers.

Beide Ergebnisse weichen nur geringfügig voneinander ab. Die weitere Betrachtung wurde mit den Abrechnungswerten des Energieversorgers vorgenommen. Wegen der Überschneidung von Abrechnungs- und Betrachtungszeitraum war eine rechnerische Korrektur auf exakt 365 d/a durch Interpolation in Tabelle 4.4 erforderlich.

Beginn	Ende	Anzahl Tage	Zählerstand Beginn	Zählerstand Ende	Verbrauch Erdgas L		Verbrauch Heizwert H_u	
		d	m^3	m^3	m^3	m^3/d	kWh	kWh/d
01.04.01	13.06.01	74	41.116	45.750	4.634	63		
14.06.01	30.06.01	17	45.750	46.472	722	42		
01.07.01	14.09.01	76	46.472	49.233	2.761	36		
15.09.01	30.09.01	16	49.233	49.892	659	41		
01.10.01	31.12.01	92	49.892	61.536	11.644	127		
01.01.02	29.05.02	149	61.536	72.125	10.589	71		
Summe		**424**			**31.009**			
Mittelwert						**73**		
Korrektur Meßzeit								
1.6.01	**1.6.02**	**365**			**27.394**	**75**	**241.477**	**662**
Korrektur Witterung							**280.113**	**767**

Tabelle 4.4: Erdgasverbrauch Brennwertkessel

Das mit einem separaten Heizkessel versorgte Verwaltungsgebäude wurde über einen separaten Gaszähler abgerechnet. Die letzte Ablesung dokumentiert den Stand 12.08.2001.
Da der Abrechnungszeitraum für die Gaslieferung des Verwaltungsgebäudes nicht mit dem Betrachtungszeitraum identisch ist, musste hierfür in Tabelle 4.5 eine separate Witterungskorrektur vorgenommen werden.

1. Für den Betrachtungszeitraum 01.06.2001 – 31.05.2002 dient die Korrektur der Vergleichbarkeit mit dem gemessenen Verbrauch von Alt- und Neubau.
2. Die Umrechnung auf das Normaljahr dient dem Vergleich mit den Simulationsergebnissen nach dem Testreferenzjahr.

Beginn	Ende	Anzahl Tage	Verbrauch Erdgas L		Verbrauch Heizwert H_u	
		d	m^3	m^3/d	kWh	kWh/d
12.07.98	11.07.99	365	8.653	23,7		
12.07.99	31.12.99	173	3.079	17,8		
01.01.00	31.05.00	152	3.659	24,1		
01.06.00	11.07.00	41	283	6,9		
12.07.00	15.08.01	400	6.627	16,6		
Summe		**1.131**	**22.301**			
Mittelwert				**19,7**		
Korrektur Meßzeit						
1.6.01	**1.6.02**	**365**	**7.197**	**19,7**	**63.442**	**174**
Witterungskorrektur Betrachtungszeitraum					**61.539**	**169**
Witterungskorrektur Normwert					**71.689**	**196**

Tabelle 4.5: Erdgasverbrauch Heizkessel Verwaltung

Der Verwaltungsbereich weist eine beheizte Fläche von 622 m^2 auf. Es ergibt sich ein spezifischer Primärenergieverbrauch von durchschnittlich 115,8 kWh/m^2. Eine Abschätzung der Heizlast dieses Nutzungsbereiches ist möglich, wenn man von folgenden Daten ausgeht:

- Vollaststunden Wärmeversorgung: ca. 2.000 h/a
- Aufwandszahl Kesselanlage: ca. 1,15.

Es ergibt sich eine Heizlast von ca. 31 kW bzw. 50 W/m^2. Der witterungsbereinigte jährliche Nutzenergiebedarf ergibt unter Berücksichtigung der Aufwandszahl von 1,15 einen Wert von 62.338 kWh. Dieser Wert findet Eingang in die Berechnung der Aufteilung des derzeitigen Primärenergieverbrauches der einzelnen Bauteile in Tabelle 4.8.

4.5.2 Strombezug 01.06.2001 – 31.05.2001

Für die Ist-Situation wurden die Stromabrechnungen innerhalb des Betrachtungszeitraumes analysiert. Sie beinhalten nunmehr den Gesamtverbrauch der Gebäudeteile Altbau, Verwaltung und Neubau.

Beginn	Ende	Anzahl Tage	Verbrauch	
		d	kWh	kWh/d
1.6.01	30.6.01	30	45.300	1.510
1.7.01	31.7.01	31	47.600	1.535
1.8.01	31.8.01	31	52.400	1.690
1.9.01	30.9.01	30	50.200	1.673
1.10.01	31.10.01	31	49.400	1.594
1.11.01	30.11.01	30	45.600	1.520
1.12.01	31.12.01	31	49.900	1.610
1.1.02	30.1.02	30	51.700	1.723
31.1.02	28.2.02	29	43.500	1.500
1.3.02	31.3.02	31	45.100	1.455
1.4.02	30.4.02	30	41.800	1.393
1.5.02	31.5.02	31	45.800	1.477
Summe		**365**	**568.300**	
Mittelwert				**1.557,0**

Tabelle 4.6: Stromverbrauch Kunsthalle gesamt

Die Ablesezeiträume decken sich vollständig mit dem Betrachtungszeitraum, so dass keine weiteren Korrekturen notwendig sind.

Aus Tabelle 4.6 ergibt sich ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 568,3 MWh bzw. von 138,8 kWh/m^2.

4.6 Aufteilung des Energieverbrauches auf Gebäudenutzung

Der Erweiterungsbau unterscheidet sich hinsichtlich seiner energetischen Eigenschaften deutlich vom Altbau und dem Verwaltungsgebäude. Durch die Klimatisierung der Ausstellungsflächen wurde der Nutzwert erhöht. Dies hat trotz aller Energiesparmaßnahmen Einfluss auf den Energieverbrauch.
Mit der Errichtung des Neubaus erfolgte bereits die Umstellung und Zusammenfassung der gemeinsamen Wärmeversorgung.
Ein Nachweis des Projekterfolges lässt sich nur erbringen, wenn man die Verbrauchsdaten verursachungsgerecht auf die Bauteile umlegt.
Zur näheren Analyse wird weiterhin das Ziel verfolgt, die Energieverbräuche nach folgenden Nutzungsarten aufzuschlüsseln.:

- Primärenergieverbrauch Heizung
- Primärenergieverbrauch Kühlung
- Primärenergieverbrauch Beleuchtung
- Primärenergieverbrauch Ventilatoren
- Primärenergieverbrauch Luftbefeuchtung.

Eine Abschätzung zur Kostenverteilung der einzelnen Verbrauchergruppen, die aus den nachfolgenden Untersuchungen hervorgehen ist Anlage 6 zu entnehmen.

4.6.1 Aufteilung des Stromverbrauches der Wärmepumpen

Die Stromaufnahme der Wärmepumpen muss auf die Nutzungsarten Heizung und Kühlung verursachungsgerecht umgelegt werden. Dazu wurde nach folgendem Algorithmus in Tabelle 4.7 verfahren.

1. Aus der gesamten erzeugten thermischen Nutzenergie und dem Stromverbrauch ergibt sich eine mittlere Leistungsziffer COP = 5,01.
2. Um die unterschiedlichen Leistungsziffern für Heizbetrieb und Kühlbetrieb zu berücksichtigen, wurden Schätzungen oberhalb und unterhalb des mittleren COP vorgenommen, die das unterschiedliche Temperaturniveau zwischen Wärmesenke und Wärmequelle (Carnot-Wirkungsgrad) sowie die unterschiedliche Nutzung der Verdichterleistung bei beiden Betriebsweisen berücksichtigen.
3. Die Schätzwerte wurden so abgeglichen, dass rechnerischer und tatsächlicher Stromverbrauch identisch sind.

Erzeugte Wärmemenge $Q_{WP,H}$	kWh	199.177
Erzeugte Kältemenge $Q_{WP,K}$	kWh	345.216
Aufgenommene elektrische Arbeit $Q_{WP,S}$	kWh	108.761
Leistungsziffer thermisch $COP_{th,ges}$	-	5,01
Schätzung $COP_{th,H}$	-	4,24
Schätzung $COP_{th,H}$	-	5,59
Stromverbrauch Wärmeerzeugung	kWh	47.003
Stromverbrauch Kälteerzeugung	kWh	61.759
Summe elektrische Arbeit	kWh	108.762

Tabelle 4.7: Aufteilung des Stromverbrauchs der Wärmepumpen auf Nutzungsarten

Wenn man beim Heizbetrieb mit Wärmepumpen einen primärenergetischen Vorteil erzielen will, ist eine mittlere Leistungsziffer COP erforderlich, die deutlich größer als der Primärenergiefaktor von Strom (>2,9) zu sein hat.

4.6.2 Energieverbrauch Gebäudeheizung

Für die bereits vorhandene Kesselanlage der Verwaltung wird eine Gesamtaufwandszahl von 1,15 geschätzt. Dies war notwendig, um die Nutzenergieabnahme des Verwaltungsgebäudes aus dem witterungsbereinigten Gasverbrauch zurückzurechnen.

Somit ergibt sich nach Tabelle 4.8 ein Nutzenergieverbrauch Heizwärme von 463,7 MWh bzw. 111,6 kWh/m^2, der durch die Wärmepumpenanlage, den Brennwertkessel und den Niedertemperaturkessel der Verwaltung erzeugt wurde.

Dem steht ein Primärenergieeinsatz (Erdgas und Strom) von 462,8 MWh gegenüber.

Aus der Nutzenergieabnahme und dem Primärenergieeinsatz lässt sich eine Aufwandszahl der gesamten Wärmeerzeugung von 1,0 errechnen. Gegenüber einer konventionellen Wärmeerzeugungsanlage besteht nur ein geringer Vorteil.

	Energieverbrauch	Primärenergie-faktor	Primärenergie-verbrauch
	kWh	-	kWh
Nutzenergieabnahme Gebäude			
Verwaltung (ε = 1,15)	53.512		
Brennwertkessel	211.033		
Wärmepumpen	199.177		
Summe Alt- und Neubau	**463.722**		
Primärenergieaufnahme			
Erdgas Verwaltung	61.539	1,00	61.539
Erdgas Brennwertkessel	241.477	1,00	241.477
Strom Wärmepumpen	47.003	2,86	134.294
Strom Heizungsantriebe	1.298	2,86	3.709
Strom Solepumpen (Anteil 30,5 %)	7.628	2,86	21.794
Summe Alt- und Neubau			**462.813**
Aufwandszahl Wärmeerzeugung		**1,00**	
Primärenergieverbrauch Heizung (witterungsbereinigt)			**536.863**
Verbrauch Altbau+Verwaltung (witterungsbereinigt)			**190.771**
Fläche Altbau+Verwaltung		[m^2]	1.731
spez. Verbrauch Altbau+Verwaltung		[kWh/m^2]	110,2
Verbrauch Neubau (witterungsbereinigt)			**346.092**
Fläche Neubau		[m^2]	2.423
spez. Verbrauch Neubau		[kWh/m^2]	142,8

Tabelle 4.8: Primärenergieverbrauch Heizung

Die installierte Wärmepumpenleistung trägt entsprechend Tabelle 4.8 mit 43 % zur Deckung des jährlichen Heizenergiebedarfs bei.

Geht man davon aus, dass der Gasverbrauch für den Altbau und die Verwaltung der vorangegangenen Jahre einen repräsentativen Mittelwert ergibt, lässt sich mittels Witterungskorrektur eine Aufteilung des Primärenergieverbrauchs auf die unterschiedlichen Gebäudeteile vornehmen.
Dazu wurden die früheren Nutzenergie-Verbrauchsdaten für die Beheizung von Altbau und Verwaltung mit der neuen Aufwandszahl 1,0 bewertet.

Im Ergebnis zeigt sich eine Zunahme des spezifischen Primärenergiebedarfs für die Gebäudeheizung gegenüber den früheren unsanierten Flächen. Dabei ist die Überlagerung von zwei Effekten zu beachten:

1. Aus dem Wärmepumpenbetrieb mit einem mittleren COP von 4,24 resultiert grundsätzlich ein primärenergetischer Vorteil, der zurzeit aufgrund des geringen Deckungsanteils der Wärmepumpen an der Gesamterzeugung gering ausfällt.
2. Durch die mechanische Lüftung / Klimatisierung und der damit verbundenen Feuchteregelung ist für den Neubau von einem höheren Nutzenergiebedarf auszugehen, der den geringen Vorteil bei der Erzeugung aufwiegt.

4.6.3 Energieverbrauch Gebäudekühlung

Der Nutzenergieverbrauch für die Kühlung des Gebäudes setzt sich aus der von den Wärmepumpen erzeugten Kältemenge und der übertragenen Energie des Sole-Vorkühlers zusammen.
Der Aufwand hierzu entsteht aus dem Stromverbrauch von Wärmepumpen im Kühlfall und Solepumpen (anteilig). Die Erdreichkühlung wird nicht bewertet.

	Energieverbrauch	Primärenergie-faktor	Primärenergie-verbrauch
	kWh	-	kWh
Nutzenergieabnahme Gebäude			
Sole-Vorkühler	109.590		
Wärmepumpen	345.216		
Summe Neubau	**454.806**		
Primärenergieaufnahme			
Strom Wärmepumpen	61.759	2,86	176.454
Strom Solepumpen (Anteil 69,5 %)	17.382	2,86	49.663
Summe Neubau			**226.117**
Aufwandszahl Kälteerzeugung		**0,50**	
Fläche Neubau		[m^2]	2.423
spez. Primärenergieverbrauch Neubau		[kWh/m^2]	93,3

Tabelle 4.9: Primärenergieverbrauch Kühlung

Die primärenergetische Aufwandszahl von 0,50 ist als sehr günstig zu bezeichnen, und wird durch den Deckungsanteil des Sole-Vorkühlers von 24 % des Gesamtverbrauchs erzielt.

Eine separate Betrachtung zur Energieeffizienz lässt der Sole-Vorkühler zu. Laut Gerätestammkarte des Herstellers entsteht beim Auslegungsvolumenstrom ein luftseitiger Druckverlust von 111 Pa. Einen konstanten Volumenstrom vorausgesetzt, beträgt die elektrische Ventilatorleistung zur Deckung des Druckverlustes ca. 735 W.
Bei 8760 Betriebsstunden entsteht ein Primärenergiebedarf von 18.414 kWh p.a.. Ein primärenergetischer Gewinn stellt sich ein, wenn die übertragene, nutzbare Kühlenergie diesen Betrag übersteigt.

Dies kann bei einem gemessenen Kälteverbrauch von 109.590 kWh als gegeben angesehen werden. Ein Teil des Verbrauches kann bei weiteren Optimierungen der derzeitigen Regelung der RLT-Anlage möglicherweise noch reduziert werden, wie in Abschnitt 5.3.2 weiter ausgeführt wird.

4.6.4 Stromverbrauch Raumlufttechnik (Luftförderung, Luftbefeuchtung)

Den raumlufttechnischen Anlagen lässt sich der anteilige Stromverbrauch aufgrund des bestehenden Messkonzeptes direkt zuordnen. Die Zuordnung des Wärme- und Kälteverbrauches zur Außenluftkonditionierung ist dagegen nicht möglich. Vielmehr sind diese Verbräuche in den Aufstellungen der Abschnitte 4.5.2 und 4.5.3 bereits enthalten.

Stromverbrauch RLT	[kWh]	180.631
Anschlußleistung Ventilatoren (nur Zentralgerät)	[kW]	19
Vollbenutzungsstundenzahl	[h/a]	9.507
Primärenergieverbrauch Luftförderung	[kWh]	516.089
Stromverbrauch Dampfbefeuchter	[kWh]	57.701
Anschlußleistung Dampfbefeuchter	[kW]	45
Vollbenutzungsstundenzahl	[h/a]	1.297
Primärenergieverbrauch Befeuchtung	[kWh]	164.860

Tabelle 4.10: Primärenergieverbrauch Luftförderung, Luftbefeuchtung

Zur Plausibilitätsprüfung des Stromverbrauches RLT erfolgte eine Rückrechnung auf Vollbenutzungsstunden der Ventilatoren.
In den Verbrauchsdaten sind nicht näher betrachtete Kleinverbraucher wie

- WC-Ablüfter
- Abluftanlagen für Aufzüge, Werkstätten, Maschinenräume
- Stellantriebe, Schaltschränke

enthalten.

Mit einer theoretischen Zahl von mehr als 8.760 Vollbenutzungsstunden deutet der gemessene Verbrauch auf eine hohe Auslastung der Anlage hin. Für eine genauere Überprüfung sind jedoch die Anschlussleistungen und Laufzeiten der nicht erfassten Geräte noch zu berücksichtigen.

4.6.5 Energieverbrauch Beleuchtung

Der Verbrauchszähler für die Beleuchtung erfasst die variable, tageslichtabhängig gesteuerte Beleuchtungsenergie der Ausstellungsflächen im Neubau. Die allgemeine Grundbeleuchtung, sonstige Räume des Neubaus sowie der komplette Altbau wurden nicht separat gemessen.

Die zuzuordnende beleuchtete Nutzfläche des Erweiterungsbaus beträgt 905,9 m^2. Aus der Messung ergibt sich ein Nutzenergieverbrauch für Beleuchtung der Ausstellungsflächen von 54.232 kWh. Ergänzt um den nach Tabelle 4.11 geschätzten Betrag für die sonstigen Flächen des Neubaus mit 3.459 kWh ergibt sich ein Verbrauch von 57,7 MWh für den gesamten Erweiterungsbau.

Für den Referenzfall einer konventionellen Beleuchtungsplanung wurde in /1/ ein jährlicher Stromverbrauch von 78,3 MWh ermittelt. Dem gegenüber steht eine Prognose aus den Simulationsrechnungen von 22,1 MWh (Erweiterungsbau: Variante 6 – ohne Berücksichtigung der Lichtschwerter).

Der tatsächliche Verbrauch liegt damit ca. 160 % über den Erwartungen sowie 35 % unter dem Referenzfall. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei dem Gebäude um ein Museum handelt, das in erster Linie das angepasste in Szene setzen der Kunstwerke anstrebt. Der angestrebte Installationswert von 20 W/m^2 stellt ein hochgestecktes Ziel dar. Selbst in Bürogebäuden trifft man noch Installationsleistungen in dieser Größenordnung an. Selbst unter Berücksichtigung dieses Wertes würde bei einer Jahresvollbenutzung von 1100 Stunden bereits der Zielwert nach der Simulation erreicht werden.

Verbrauchsmessung Ausstellung Neubau	**54.232**	**kWh**
zuzuordnende Fläche	1.244	m^2
spezifischer Energieverbrauch Säale Neubau	43,6	kWh/m^2
Sonstige Flächen Neubau	1.179	m^2
spezifische Beleuchtungsleistung	5,9	W/m^2
Vollbeleuchtungsstunden	500	h/a
Verbrauch sonstige Flächen Neubau	**3.459**	**kWh**
Ausstellungsfläche Altbau	816	m^2
spezifischer Energieverbrauch (Neubau +40%)	61,0	kWh/m^2
Verbrauch Ausstellungsfläche Altbau	**49.803**	**kWh**
Sonstige Flächen Altbau	297	m^2
spezifische Beleuchtungsleistung	9,5	W/m^2
Vollbeleuchtungsstunden	500	h/a
Verbrauch sonstige Flächen Altbau	**1.417**	**kWh**
Fläche Verwaltung	622	m^2
spezifische Beleuchtungsleistung	7,6	W/m^2
Vollbeleuchtungsstunden	600	h/a
Verbrauch Verwaltung	**2.820**	**kWh**
Verbrauch Beleuchtung gesamt	111.730	kWh
Primärenergieverbrauch Beleuchtung	**319.229**	**kWh**

Tabelle 4.11: Primärenergieverbrauch Beleuchtung

Eine Hochrechnung auf den gesamten Gebäudekomplex ist nur mit weiteren Schätzungen und Annahmen möglich. Für die Ausstellungsflächen im Altbau wird unterstellt, dass ein um 40 % höherer spezifischer Jahresenergieverbrauch vorliegt. Für die übrigen Flächen im Altbau sowie in der Verwaltung wurden Anschlussleistungen und Vollbeleuchtungsstunden geschätzt.

Sämtliche Schätzungen wurden mit dem Gesamt-Stromverbrauch abgeglichen.

Der in der Simulation /1/ ermittelte Beleuchtungsenergiebedarf von 147,2 MWh/a für die Variante „Standard" Altbau erscheint unrealistisch hoch. Er kommt nur zustande, wenn maximale Betriebszeiten sowie nicht mehr dem Stand der Technik entsprechende Komponenten eingesetzt werden. Der dabei unterstellte Stand der Technik dürfte heute noch vorliegen, da bisher keine Umbaumaßnahmen erfolgten. Hinsichtlich der realen Betriebsweise ergeben sich Änderungen gegenüber der Simulation bei den angestrebten Beleuchtungsstärken sowie möglicherweise durch geringfügig reduzierte Betriebszeiten.

4.6.6 Sonstige Stromverbraucher

In der Gesamtzählung des Stromverbrauches ist die allgemeine Gebäudenutzung durch Maschinen, EDV, Küchen und ähnliches enthalten.

Nachfolgende Tabelle bildet die Differenz aus dem Gesamtstromverbrauch und den bisher zugeordneten Verbrauchsdaten für Energieversorgung, Beleuchtung, RLT.

Die separate Abschätzung führt über die Leistung vorhandener Einzelgeräte, deren Nutzungsdauer und Gleichzeitigkeit zu Ergebnissen in gleicher Größenordnung.

Die Differenzbildung nach Tabelle 4.12 kann daher als plausibel angesehen werden.

Verbrauch aus Stromabrechnung	568.300	kWh
Abzug Beleuchtung gesamt	111.730	kWh
Abzug Ventilatoren	180.631	kWh
Abzug Dampfbefeuchter	57.701	kWh
Abzug Wärmepumpen	108.761	kWh
Abzug Heizung	1.298	kWh
Abzug Solepumpen	25.010	kWh
Restliche Verbraucher	**83.169**	**kWh**
Bezugsfläche	4.154	m^2
spezifischer Verbrauch	20,0	kWh/m^2
durchschnittliche Leistung	2,3	W/m^2
spezifischer Primärenergieverbrauch	57,2	kWh/m^2

Tabelle 4.12: Primärenergieverbrauch Restverbraucher

Die Kalkulation ergibt eine durchschnittliche spezifische elektrische Leistung von 2,3 W/m^2 für das Gesamtjahr bzw. ca. 10 W/m^2 für die Büronutzungszeit. Die Randbedingungen des öffentlich-rechtlichen EnEV-Nachweises gehen bei reiner Büronutzung von 15 W/m^2 für die Nutzungszeit aus. Aufgrund des geringen Büro- und Werkstattanteils im vorliegenden Gebäude erscheinen die niedrigeren Werte ebenfalls plausibel.

4.7 Verbrauchskennwerte

Die vorangegangenen Untersuchungen und Auswertungen gestatten eine verursachungsgerechte Zuordnung des Primärenergiebezugs auf die unterschiedlichen Gebäudeteile und Nutzungsarten.

Bei der Heizung wurden witterungsbereinigte Werte eingesetzt. Die Gebäudeaufteilung erfolgte unter Verwendung des mittleren Gasverbrauchs der Jahre 1992 – 1997.

Die Angaben für die Beleuchtung des Altbaus enthalten Schätzungen, die durch die Gesamtverbrauchsmessungen gestützt sind.

Tabelle 4.13 fasst die Umlage der Verbrauchsdaten auf Bauteile und Nutzungsarten zusammen.

Nutzen	Kunsthalle gesamt		Neubau		Altbau + Verwaltung	
	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²
Heizung	536.863	129	346.092	143	190.771	110
Befeuchtung	164.860	40	164.860	68	-	-
Kühlung	226.117	54	226.117	93	-	-
Ventilatoren	516.089	124	516.089	213	-	-
Beleuchtung	319.229	77	164.831	68	154.400	89
Gesamt	**1.763.158**	**424**	**1.417.989**	**585**	**345.171**	**199**

Tabelle 4.13: Spezifische Kennziffern zum Primärenergieverbrauch

Zur Prüfung der Zahlen kann herangezogen werden, dass für den Altbau in der Vergangenheit folgender Primärenergiebezug gemessen wurde.

Erdgas Mittelwert 1992 – 1997:	148.129 kWh
Strom Mittelwert 1993 – 1998:	88.067 kWh
Primärenergie gesamt:	399.749 kWh

Bei einer ursprünglichen Fläche von 1.109 m² ergab sich ein spezifischer Wert von 360 kWh/m². Im Vergleich mit dem deutlich niedrigeren Ergebnis von 199 kWh/m² aus obiger Tabelle ist folgendes zu beachten:

1. Der Mittelwert aus Altbau und Verwaltung wird vor allem wegen der ungleich intensiven Beleuchtung beider Gebäude gedämpft.
2. Die allgemeinen Stromverbraucher sind in Tabelle 4.13 nicht enthalten. Auf den Altbau dürfte u. a. wegen der dezentralen Luftbefeuchter ein überproportional hoher Anteil entfallen.

4.8 Beurteilung der Verbrauchsdaten

Ein direkter Vergleich der Verbrauchsdaten mit den prognostizierten Werten aus der Simulation ist nur teilweise möglich, da die Umbaumaßnahmen für den Altbau noch ausstehen.
Zunächst steht einer Prognose von 1.246 MWh ein tatsächlicher Primärenergieverbrauch von 1.763 MWh für Heizung, Kühlung, RLT und Beleuchtung gegenüber.

Korrigiert man die Simulationsergebnisse bestmöglich auf den derzeitigen Gebäudezustand, ergibt sich ein Prognosewert von 1.291,4 MWh. Die Korrektur beinhaltet die in den Fußnoten zu Tabelle 4.14 aufgeführten Schritte.

		Simulation			IST-Verbrauch	Abweichung
		Gesamt		Korrektur (ohne RLT Altbau)	(witterungsbereinigt)	
Heizung	[MWh_{Pr}]	418,4	1)	418,4	536,9	28,3%
Befeuchtung	[MWh_{Pr}]	379,7	2)	231,1	164,9	-28,7%
Kühlung	[MWh_{Pr}]	91,9	3)	58,1	226,1	289,0%
Ventilatoren	[MWh_{Pr}]	164,0	4)	100,0	516,1	416,1%
Beleuchtung	[MWh_{Pr}]	192,0	5)	483,7	319,2	-34,0%
GESAMT	[MWh_{Pr}]	**1.246,0**		**1.291,4**	**1.763,2**	36,5%
allgem. Nutzung	[MWh_{Pr}]				237,6	
Summe	[MWh_{Pr}]				**2.000,8**	
					Primärenergiebezug (unbereinigt)	
Gasbezug	[MWh_{Pr}]				303,0	
Strombezug	[MWh_{Pr}]				1.623,7	
Summe	**[MWh_{Pr}]**				**1.926,7**	

1) Altbau + Neubau Variante 6, da Energiezentrale bereits Altbau mitversorgt und keine weiteren Wärmeschutzmaßnahmen geplant sind. Die Werte berücksichtigen einen Umrechnungsfaktor (Leistungsziffer + Primärenergiefaktor) von 0,8.

2) Nur Neubau Variante 6, da bisher keine RLT-Anlage im Altbau

3) Nur Neubau Variante 6, da bisher keine Kühlung im Altbau. Der Umrechnungsfaktor für Leistungsziffer der WP und Primärenergie ist enthalten.

4) Nur Neubau Variante 6, da bisher keine RLT-Anlage im Altbau

5) Altbau Standard (147,2 MWh_{el}) + Neubau Variante 6 (22,1 MWh_{el}), da im Altbau bisher keine Sanierung Beleuchtung erfolgte (vgl. Abschnitt 4.6.5)

Tabelle 4.14: Vergleich der Simulationsprognosen nach /1/ mit tatsächlichem Primärenergieverbrauch (Gesamtgebäude)

In Tabelle 4.15 wird der Neubau separat betrachtet. Die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelte Zuordnung des witterungsbereinigten Verbrauches kann direkt mit den Simulationsergebnissen /1/ nach der Variante 6 verglichen werden.

		Simulation Neubau	IST-Verbrauch Neubau (witterungsbereinigt)	Abweichung
Heizung	[MWh_{Pr}]	228,2	346,1	51,7%
Befeuchtung	[MWh_{Pr}]	231,1	164,9	-28,7%
Kühlung	[MWh_{Pr}]	58,1	226,1	289,0%
Ventilatoren	[MWh_{Pr}]	100,0	516,1	416,1%
Beleuchtung	[MWh_{Pr}]	63,1	164,8	161,0%
GESAMT	[MWh_{Pr}]	**680,6**	**1.418,0**	108,3%

Tabelle 4.15: Vergleich der Simulationsprognosen mit tatsächlichem Primärenergieverbrauch (nur Neubau)

Damit entfällt ca. 80 % des Primärenergiebedarfs für Klimatisierung und Beleuchtung auf das Neubaugebäude. Die Abweichungen zu den Prognosen aus der Simulation sind in den Einzelbereichen erheblich. Lediglich die Luftbefeuchtung ist weniger energieintensiv als berechnet. Der dem Neubau zugeordnete Gesamtprimärenergiebedarf übertrifft die Prognose um 108 %.

5 Beurteilung des Energiekonzeptes

Abschließend erfolgt eine Bewertung des vorgefundenen Energiekonzeptes. Die Bewertung erfolgt in zwei Schritten.

1. Durch eine subjektive Bewertung wird das Planungskonzept aufgrund einer theoretischen Analyse und subjektiver Erfahrungen beurteilt.
2. Im zweiten Schritt wurden Trendauswertungen zu Detailproblemen analysiert und Schwachstellen aufgezeigt. Bei der Trendauswertung wurde auf die Messdatenerfassung der vorhandenen Gebäudeleittechnik zurückgegriffen. Die Messdaten wurden einheitlich in der Zeit vom 14.05. – 29.05.2002 aufgezeichnet.

5.1 Gebäudehülle

5.1.1 Subjektive Beurteilung

Die Auswertung der Energieverbrauchsdaten lässt keine Unterscheidung zwischen Transmissionsverluste und Lüftungsheizbedarf zu. Die Ergebnisse deuten aber daraufhin, dass die Gebäudehülle nicht maßgeblich für die aufgezeigten Abweichung im Soll-Ist-Vergleich verantwortlich ist.

Die Wärmedämmung übertrifft die Anforderungen der damaligen Wärmeschutzverordnung.
Auch aus heutiger Sicht dürfte aufgrund der k-Werte der EnEV-Nachweis erfüllt werden.

Systembedingt führt die in die Außenwände integrierte Flächenheizung zu höheren Transmissionsverlusten gegenüber konventionellen Heizflächen. Neben den ungünstigen Systemtemperaturen sollte dies ein Grund sein, über die Beibehaltung der Fußbodenheizung im Altbau nachzudenken. Eine vorgeschaltete Bauteiltemperierung könnte möglicherweise in Betracht gezogen werden.

Weiteren Optimierungsschritten an der Gebäudehülle sind aufgrund der Nutzung Grenzen gesetzt. So konnte wegen des UV-Schutzes und den hohen Anforderungen an die Beleuchtung keine stärkere passive Solarenergienutzung (z. B. durch stärkere Transparenz nach Süden) angestrebt werden.

Durch die geplante Überdachung des Innenhofes kann ein positiver Wintergarteneffekt erwartet werden.

5.2 Wärme- und Kälteversorgung

5.2.1 Subjektive Beurteilung

Das vorgefundene Energieversorgungskonzept weicht von dem Ergebnis der Konzeptoptimierung /1/ ab. Die Wärmepumpenanlagen und das Erdsondenfeld wurden nach einem Geothermal Response Test /9, 10/ erheblich größer dimensioniert als ursprünglich vorgesehen.
Aufgrund der installierten Leistung könnte die Heizlast und die Kühllast des Gebäudes derzeit vollständig durch die Wärmepumpen erbracht werden. Die zusätzliche Kesselanlage würde für die Wärmeversorgung eine Redundanz von 100 % bedeuten. Das Gesamtsystem bietet Reserven für die geplanten RLT-Anlagen im Altbau.

Die Gebäudeheizung im Neubau wurde den Erfordernissen der Wärmepumpenanlage nicht gerecht . Hier wäre der Einsatz eines Niedertemperatur-Heizsystem sinnvoller gewesen, zumal die geplante Wandheizung dafür grundsätzlich hervorragende Voraussetzungen geboten hätte. Die Forderung der Wandheizung steht jedoch der Forderung der Konservatoren – auf wasserführende Rohre hinter den Exponaten zu verzichten – entgegen. Das Potential der Niedertemperatur-Abnahme aus der vorhandenen Fußbodenheizung im Altbau blieb unnötigerweise ungenutzt.

Dadurch wurden die Möglichkeiten zur maximalen Nutzung regenerativer Energiequellen systembedingt stark begrenzt und die Wirtschaftlichkeit insgesamt in Frage gestellt.

Unter den vorgenannten Umständen sollten alle regelungstechnischen Möglichkeiten genutzt werden, um in der Übergangszeit die Hochtemperatur-Abnehmer ausreichend mit Niedertemperaturwärme zu versorgen.

Die Verbrauchsdaten deuten darauf hin, dass dies nicht ausreichend erfolgte. Trotz 100 % Verfügbarkeit an Leistung konnte im Betrachtungszeitraum nur 43 % Deckung des Heizenergieverbrauchs mittels Wärmepumpenbetrieb erzielt werden.
Gegenüber einer Brennwertanlage mit Niedertemperaturheizung weist die primärenergetische Aufwandszahl von 1,0 nur einen geringen Vorteil auf.

Eine zentrale Rolle dürften die Probleme mit dem Schichtenspeicher gespielt haben, deren Behebung dringend erforderlich ist.

Die doppelte Nutzung der Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen ist grundsätzlich positiv zu bewerten, da durch die Einspeisung der Kondensationswärme in das Erdreich eine thermische Regeneration des Untergrundes stattfindet. Langfristige Temperaturverschiebungen im umgebenden Erdreich werden vermieden.

Betrachtet man das Erdreich als saisonalen Speicher, kann man in gewissem Umfang von einer Wärme-Kälte-Kopplung sprechen. Die erzielten Leistungsziffern im Heizfall liegen über den Schätzungen der Simulationsstudie.

Die erzielten Quelltemperaturen aus dem Erdreich erfüllten die prognostizierten Erwartungen /9, 10/. Nennenswerte saisonale Temperaturverschiebungen konnten nicht festgestellt werden. Allerdings muss hier die geringe Anlagenauslastung berücksichtigt werden.

5.2.2 Messwertanalyse

Die Regelstrategie für die Wärmeversorgungsanlage sollte zum Ziel haben, den Deckungsanteil der Wärmepumpen zu maximieren, da diese primärenergetisch effizienter als der Heizungskessel arbeiten.

Über den gemeinsamen Schichtenspeicher sollte theoretisch eine aus den Wärmepumpen stammenden Energie in die HT-Abnahme möglich sein, was mittlerweile realisiert sein soll. Dabei kommt der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung von Heizkessel und Wärmepumpen eine entscheidende Rolle zu.

Näher analysiert wurden die Trendaufzeichnungen in der Zeit vom 14.05. – 18.05.2002. In den ersten beiden Tagen befindet sich der Heizkessel im intermittierenden Betrieb. Die Vorlauftemperaturen am HT-Verteiler bewegen sich im Bereich 49 ... 55 °C.

An den unmittelbar darauffolgenden Tagen 16.05. – 18.05.2002 wird die Wärmeversorgung ausschließlich von den Wärmepumpen übernommen. Die Vorlauftemperaturen am HT-Verteiler bewegen sich im Bereich 42 ... 46 °C. Die Rücklauftemperaturen deuten auch an diesen Tagen auf Abnahme von HT-Wärme hin.
Die Außenlufttemperaturen liefern keine signifikanten Unterschiede, welche die unterschiedliche Betriebsweise innerhalb der ausgewerteten Periode erklären könnte. Mögliche Ursache könnten Parameteränderungen an der Regelung ggf. im Zuge der Schichtenseicher-Optimierungsversuche sein.

Die regelungstechnischen Verknüpfungen für das Zusammenspiel zwischen Heizkessel und Wärmepumpen waren zum Zeitpunkt der Messung im Mai hinsichtlich des bivalenten Betriebs weiter optimierungsbedürftig.

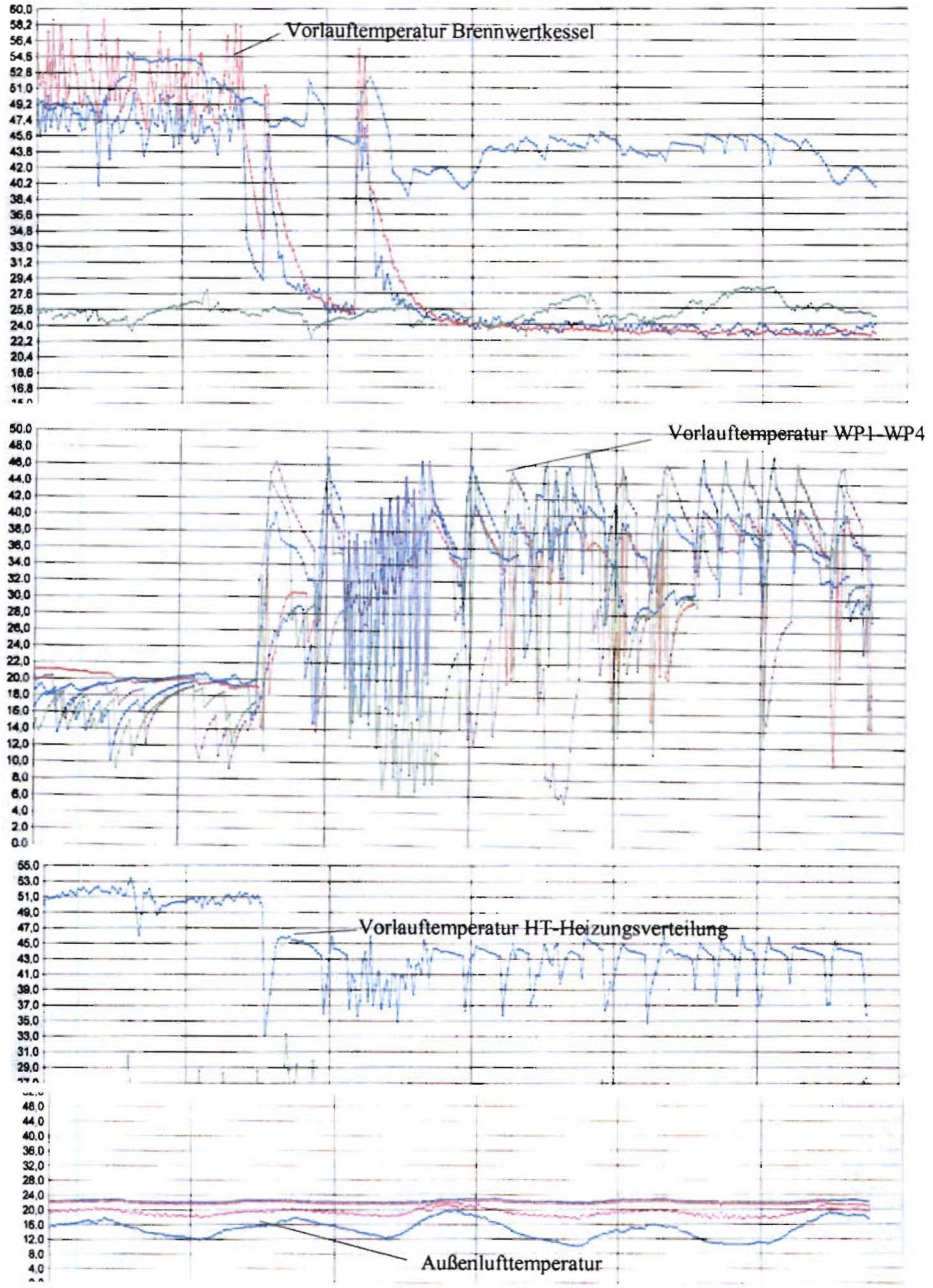


Bild 5.1: Trendaufzeichnungen Vorlauftemperaturregelung

5.3 Raumlufttechnik

5.3.1 Subjektive Beurteilung

Die umfangreiche Ausstattung mit Luftbehandlungs- und Regelungsfunktionen kann grundsätzlich einen energiesparenden Betrieb der raumlufttechnischen Anlage ermöglichen.
Allerdings sind die Funktionen und deren Wechselwirkungen sehr komplex und damit sensibel. Es bedarf einer optimal parametrierten Regelstrategie und Betriebsführung, um die vorhandenen Funktionen maximal zu nutzen.

Das Wärmerückgewinnungssystem weist neben dem hohen Rückgewinnungsgrad den wichtigen Vorteil des Feuchterückgewinns auf.
Der Be- und Entfeuchtung kommt aus energetischer Sicht eine besondere Bedeutung zu. Daher kann der Sole-Vorkühler sinnvoll eingesetzt werden. Dies ist besonders dann der Fall, wenn im Befeuchtungsfall die Außenluftrate bzw. der Feuchterückgewinn zu hohe Zulufttemperaturen nach der WRG bewirken, die dann energetisch günstig zurückgekühlt werden können.

Die Luftbefeuchtung mittels elektrisch erzeugtem Dampf ist primärenergieintensiv, aber aufgrund der Anlagengröße und angesichts der hygienischen Vorteile begründet.
Die Messwerte zeigen einen geringeren Energieverbrauch für die Luftbefeuchtung als prognostiziert.

Dagegen weichen die Verbrauchsdaten für die Kühlung und Luftförderung erheblich von den Simulationsergebnissen ab.
Geht man von einer benötigten Kälteleistung von 155,5 kW aus, ergibt der gemessene Kälteverbrauch (ohne Solekühler) eine Vollaststundenzahl von 2.220 h. Für ein RLT-Gesamtsystem, dass

- überwiegend auf der Basis Luft arbeitet,
- einen 100 % Außenluftbetrieb zulässt

ist dieser Wert deutlich zu hoch.
Vermutlichsteht der niedrige Energieaufwand für die Befeuchtung und der hohe Aufwand für Kühlung in einem wechselweisen Zusammenhang mit der WRG- bzw. Umluftregelung.

Ein weiterer Grund für die Auffälligkeiten liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit darin, dass die Variabel-Volumenstrom-Regelung noch nicht optimal arbeitet. Dies wird besonders im Stromverbrauch der Ventilatoren deutlich, der auf nahezu ständigen Vollastbetrieb hindeutet.

Aus rein energetischer Sicht ist die Zuluftführung nach dem Quellluft-Prinzip nachteilig, da die Zuluft mit höherer Temperatur dem Raum zugeführt wird als bei induktiven Auslässen. Dadurch ist die Kühlwirkung geringer und es entsteht durch das Nachwärmen ein höherer Energieaufwand für die Luftentfeuchtung. Bei der Sanierung des Altbaus sollte über induzierende Auslässe nachgedacht werden, die eine niedrigere bzw. variablere Zulufttemperatur zuließen. Nach Aussage des Planers wird darauf

jedoch aus konservatorischen Gründen verzichtet, da die Quellluftsysteme mehr den Forderungen der Nutzer nach natürlicher Klimatisierung entsprechen.

5.3.2 Auswertung ausgewählter Prozessverläufe

Aus den durch die Gebäudeleittechnik aufgezeichneten Prozessdaten über ca. 2 Wochen im Mai 2002 wurden der kälteste und wärmste Außenluftzustand näher analysiert. Wetterbedingt traten in dieser Zeit sowohl ein Heiz-/Befeuchtungsfall als auch ein Kühl-/Entfeuchtungsfall auf.

Datenpunkt GLT	kältester Außenluft-zustand		wärmster Außenluft-zustand	
	Tag:	16.05.2002	Tag:	21.05.2002
	Uhrzeit:	05:00	Uhrzeit:	16:00
	t	ϕ	t	ϕ
Außenluft	9,0	95,0%	24,0	54,0%
WRG	18,0		22,5	
Zuluft zentral	15,0		19,5	
Zuluft Kanal 1	19,5	55,8%	19,5	60,5%
Zuluft Kanal 2	19,5	58,0%	19,5	62,5%
Abluft zentral	21,5	52,4%	22,1	54,1%
	Stellsignal		Stellsignal	
WRG	0%		0%	
Außenluftklappe	100%		20%	
Solekühler	100%		100%	
Vorerhitzer	0%		0%	
Zonenerhitzer 1	30%		69%	
Zonenkühler 1	0%		100%	
Zonenerhitzer 2	52%		52%	
Zonenkühler 2	0%		100%	

Tabelle 5.1: Darstellung ausgewählter Betriebspunkte aus der thermischen Luftaufbereitung

Heizfall

Der Heizfall ist im Bild 5.2 rot dargestellt. Die Stellsignale für Außenluftklappe und Wärmerückgewinnung werden mit 0% ausgewiesen. Dies wäre energetisch unsinnig und würde auch nicht die gemessene Temperatur von 18,0 °C nach der WRG erklären.
Der Sole-Vorkühler ist mit maximaler Leistung in Betrieb. Dies ist im Sinne der Regelungsbeschreibung richtig, da die zentrale Zulufttemperatur nach einem Sollwert von 15,0 °C geregelt wird.

Energetisch ist der Parameter keineswegs optimal, da in den nachfolgenden Zonenregelkreisen ein Sollwert von 20,0 °C eingestellt war. Die übertragene Kühlleistung muss daher durch die Nacherhitzer wieder aufgebracht werden.
Hier ergibt sich ein regelungstechnisches Optimierungspotential durch die Verknüpfung der beiden Zulufttemperatur-Sollwerte. Die daraus resultierende Heiz-Mehrleistung beträgt ca. 5 kW/K.

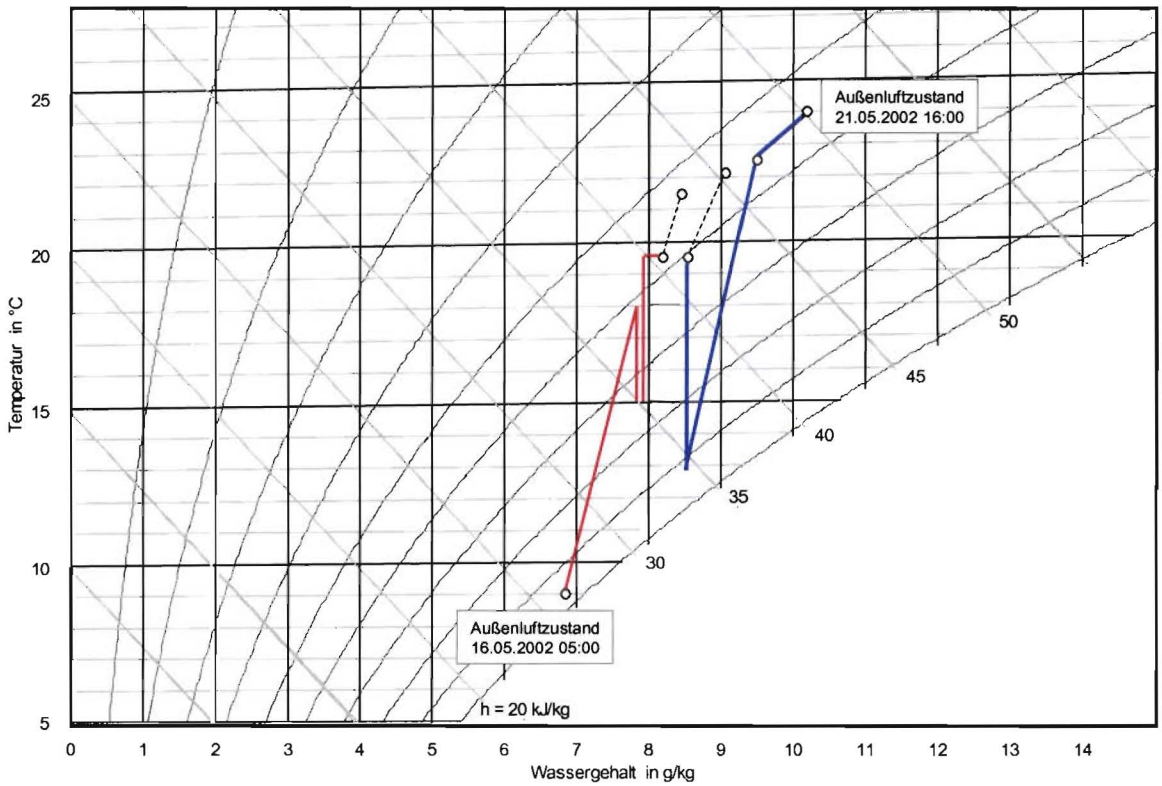


Bild 5.2: Darstellung ausgewählter Prozessverläufe der thermischen Luftaufbereitung

Kühlfall

Für den Kühlfall ist ein bestimmungsgemäßer Betrieb in Bild 5.2 erkennbar. Die Außenluftklappe ist bei einem Mindestwert von 20 % geschlossen, da die Außenluftenthalpie größer als die Raumluftenthalpie ist. Energetisch ist die Übersteuerung der Luftqualitätsregelung sinnvoll, wobei laut Regelungsbeschreibung dieser Betriebsfall erst bei Außenluftfeuchten > 60 % eintreten dürfte.
Der energieintensive Entfeuchtungsprozess wird im h,x-Diagramm sichtbar. Die Zonenkühlerventile haben 100 % zur Entfeuchtung geöffnet, die Zonennacherhitzer sind zum Nachwärmen ebenfalls in Betrieb.

5.3.3 Auswertung der Volumenstrom- / Luftqualitätsregelung

Das Stellsignal der Außenluftklappe weist starke Schwankungen auf. Diese wirken sich kaum auf den Messwert „Luftqualität" aus.

Betrachtet man den Verlauf der Stellsignale für die Frequenzumformer der Zuluftventilatoren, fällt die geringe Variabilität auf. Die mittleren Signale lagen während der Messung bei ca. 90 % (Zuluftkanal 1)

bzw. 83 % (Zuluftkanal 2). Um den Mittelwert schwankten die Abweichungen ca. ± 4 %. Im Signalverlauf für Zuluftkanal 2 ist eine 24 h – Periode erkennbar.
Größere Volumenstromabweichungen traten in der Nacht vom 27.05. – 28.05.2002 auf. Die Erklärung besteht hier in einer ungewöhnlichen, vermutlich störungsbedingten Zulufttemperaturabsenkung auf ca. 10 °C.

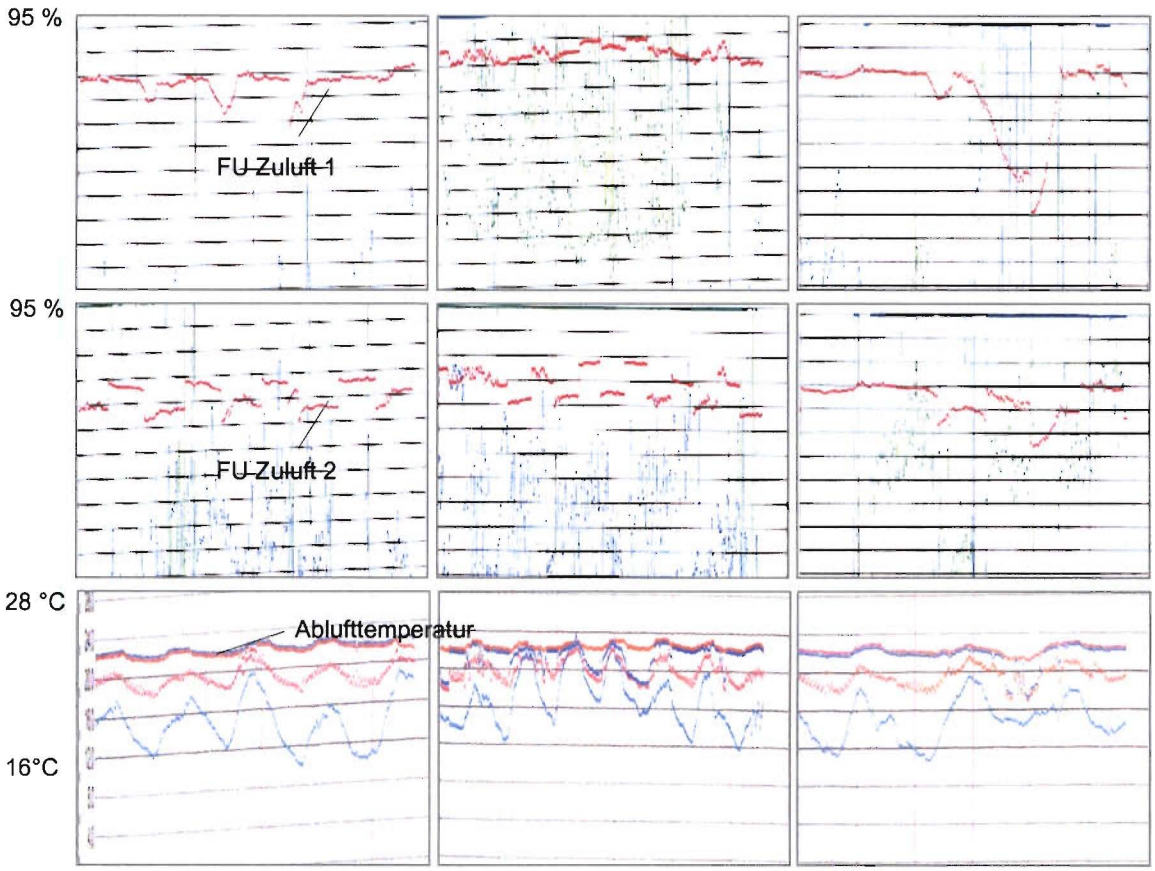


Bild 5.3: Trendaufzeichnung Variabel-Volumenstrom-Regelung

Nicht erklärbar ist, weshalb innerhalb der Hauptbetriebszeit das Signal wiederholend abfällt. Aufgrund der dann einsetzenden Kühllasten wird bei durchgehend konstantem Raumtemperatur-Sollwert ein entgegengesetztes Verhalten erwartet.

Optimierungsbedürftig erscheint ebenfalls die Luftqualitätsregelung. Das Sensorsignal zeigt insgesamt geringe Schwankungen im Bereich zwischen 55 ... 65 %, wobei zum Zeitpunkt der Messungen ein Sollwert von 50 % eingestellt war. In der Zeit vom 20.05. – 23.05. trat die größte Absenkung des Sensorsignals auf. Die Trendaufzeichnung zeigt parallel dazu ein Schließen der Außenluftklappen auf den Mindestwert von 20 %. Hier wurde ein entgegengesetztes Verhalten erwartet.

Laut Regelungsbeschreibung findet eine Übersteuerung der Luftqualitätsregelung bei Außenluftfeuchten > 60 % statt. Dieses Verhalten spiegelt sich nicht in den Trendaufzeichnungen wider. Aus energetischer Sicht ist die Vorgabe eines Grenzwertes für die relative Feuchte auch nicht sinnvoll.

Vielmehr sollte die absolute Feuchte (Wasserdampfgehalt) oder die Außenluftenthalpie als Steuergröße verwendet werden.

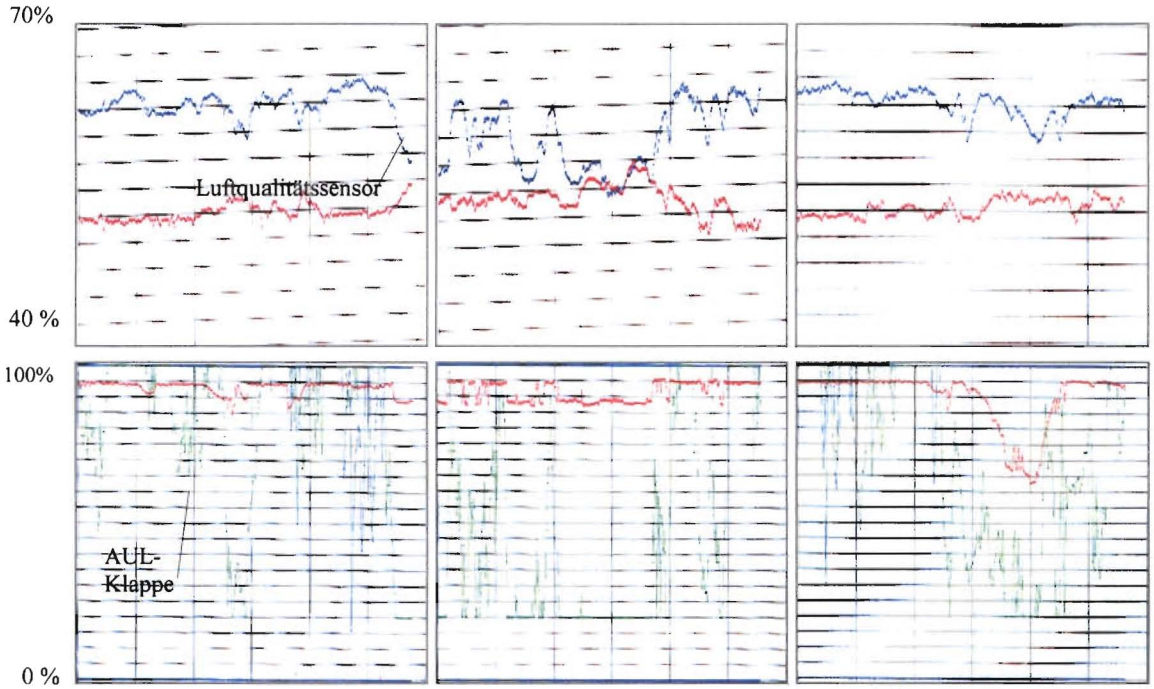


Bild 5.4: Trendaufzeichnung Luftqualitätsregelung

5.4 Beleuchtung

5.4.1 Subjektive Beurteilung

Der Ansatz die Kunsthalle im Sinne der Ausstellungsgegenstände als Tageslichtgebäude zu konzipieren, wirkt sich günstig auf den Energieverbrauch aus.

Die eingesetzten Beleuchtungsanlagen stellen einschließlich der installierten Regeleinrichtungen eine Voraussetzung für einen energiesparenden Betrieb dar. Hinzu kommen aufwändige Tageslichtnutzungskonzepte, durch die ein erhöhter Tageslichtanteil in die Ausstellungsräume gelangen soll.

Die durch geeignete Wahl der Leuchtkörper erreichte Anschlussleistung von unter 17W/m^2 entsprechend dem Planungsstand ist für den gewählten Anwendungszweck ein günstiger Wert. Eine Überprüfung dieses Wertes anhand von Messungen hat eine nur geringfügig höhere Anschlussleistung von 18 W/m^2 ergeben.

Jedoch ist festzustellen, dass die zur Tageslichtregelung vorhandenen Jalousien meist geschlossen sind und damit den energetischen Einspareffekt durch die Regelung nicht erkennen lassen. Dies wurde an mehreren Tagen auch mit wechselnden Tageslichtverhältnissen beobachtet (vgl. Bild 5.5).

Bild 5.5: Innen- und Außenansicht von Beleuchtungseinsatz und Jalousienutzung am Tag

Hintergrund für die nicht konsequente Umsetzung der Tageslichtkonzepte sind die durch die konservatorischen Rahmenbedingungen begrenzten Beleuchtungsstärken auf den Exponaten. Entsprechende Messungen haben ergeben, dass bei geöffneten Jalousien das Einhalten der maximal zulässigen Beleuchtungsstärken nicht gewährleistet werden kann.

Die Verbrauchswerte beim Altbau liegen unterhalb der in der Simulation ermittelten Bedarfe für den Referenzfall, die aus energetischer Sicht jedoch mit sehr ungünstigen Randbedingungen ermittelt wurden. Das bei der geplanten energetischen Sanierung zu erwartenden Einsparpotential wird als hoch eingeschätzt.

Eine exakte Analyse der Stromverbräuche durch die Beleuchtung wird durch die wechselnden Beleuchtungssituationen bei neuen Ausstellungen erschwert.

6 Zusammenfassung

In den vorgefundenen Anlagen zur Energieversorgung wurde das aus einer vorangestellten Optimierungsphase stammende Ursprungskonzept weitgehend umgesetzt.
Im Bereich der zwischen Wärme- und Kältebereitstellung umschaltbaren Wärmepumpen kam es zu einer deutlichen Erhöhung der installierten Anschlussleistung, die wirtschaftlich nicht begründet werden kann.

Die im Rahmen der Planung aus konservatorischen Gesichtspunkten eingesetzte Bauteiltemperierung muss bei niedrigeren Außentemperaturen mit höheren Systemtemperaturen als eine Flächenheizung betrieben werden. Die daraus resultierende mangelhafte Abstimmung zwischen den Anlagen zur Energieabnahme (Raumheiz- und Kühlflächen) und der Energieversorgungsanlage in bezug auf die Systemtemperaturen ist zu kritisieren. Dadurch wird die maximale Nutzung regenerativer Energiequellen nicht erreicht. Einer Verbesserung dieser Situation durch nachträgliche Betriebsoptimierung sind daher Grenzen gesetzt.

Die witterungsbereinigten Verbrauchsdaten der untersuchten Periode 06/2001 – 05/2002 weichen in erheblichem Umfang von der prognostizierten Zielstellung ab. Die Vorgaben und Annahmen, die mit Hilfe der Simulationsrechnungen zur Festlegung der Zielwerte geführt haben, können hier nicht bewertet werden. Sie führten jedoch möglicherweise zu überzogenen Erwartungen.

Für den Altbau, dessen Sanierung noch aussteht, sind nur eingeschränkte Aussagen zum Soll-Ist-Vergleich möglich.
Die Auswertungen zeigen aber, dass durch die Klimatisierung mit einer Zunahme des spezifischen Primärenergieverbrauchs zu rechnen ist.

Für den Erweiterungsneubau ergeben sich folgende Verbrauchsdaten für den Primärenergieeinsatz zur Klimatisierung und Beleuchtung:

- Soll-Verbrauch „Referenzgebäude“: 1.454 MWh
- Soll-Verbrauch „optimiertes Gebäude“: 681 MWh
- Ist-Verbrauch: 1.418 MWh.

Der hohe Ist-Verbrauch ist nur zum Teil auf konzeptionell bedingte Fehler zurückzuführen. Starke Abweichungen treten im Bereich der RLT-Anlage bezogen auf die in der Simulation zugrunde gelegte Standardanlage auf. Aufgrund der vorhandenen Ausstattung der RLT-Anlage mit Komponenten und Regelungsmöglichkeiten für einen energieminimierten Betrieb wird gerade hier noch Optimierungspotential gesehen. Dies betrifft die Algorithmen und Strategien der DDC-Regelung – d. h. wesentlich die

Software und deren Parametrierung. Weitere Energieeinsparungen können durch den seit Sommer 2002 überarbeiteten Schichtenspeicher für die bivalente Betriebsweise erwartet werden.

Weiteres Potential betrifft die Abstimmung der Regelung zur Verschiebung von Niedertemperaturwärme in die Hochtemperaturabnehmer-Heizkreise bei höheren Außentemperaturen. Voraussetzung hierfür ist der ordnungsgemäße Betrieb des Schichtenspeichers sowie die Feinoptimierung der einzelnen Fahrkurven.

Bei der Beleuchtung werden noch Einsparungen gegenüber dem derzeitigen Stand erwartet, wenngleich das Potential insgesamt aufgrund der konservatorischen Anforderungen begrenzt leibt. Hier haben die optimale Präsentation der Kunstwerke und deren Schutz vor UV-Strahlung Priorität gegenüber einer stärkeren Tageslichtnutzung. Es wird angezweifelt, ob die ungünstigen Ansätze für das „Standardgebäude" bei der Simulation der Realität entsprechen. Der Einfluss baulicher Maßnahmen zur Tageslichtnutzung wurde in der Konzeptphase vermutlich zu optimistisch bewertet.

Da die getroffenen Annahmen bei der Gebäudesimulation /2/, deren Ergebnisse zu Referenzzwecken herangezogen wurden, nicht bekannt sind, können konkrete Prognosen zur Höhe möglicher Einsparungen nicht vorgenommen werden. Die Einsparpotenziale auf der Basis der formulierten Vorschläge sind nur mit Hilfe von weiteren rechnerischen Untersuchungen zu quantifizieren.

7 Literatur

/1/ Konzeptoptimierung Kunsthalle Emden; NEK Ingenieurgesellschaft mbH; November 1998

/2/ Thermische und energetische Untersuchungen für das Bauvorhaben: Erweiterung der Kunsthalle in Emden mittels Computersimulation; NEK Ingenieurgesellschaft mbH; Juni 1998

/3/ Tageslichtbetrachtung Kunsthalle Emden; NEK Ingenieurgesellschaft mbH; Juni 1998

/4/ BMFT Forschungsbericht T 86-051, Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland, 1986

/5/ Spengelin, Friedrich: Kunsthalle Emden – Erweiterung und Nachrüstung des Altbaus, Revidierter Förderantrag; Dezember 1997

/6/ Schlingmann, Thomas: Evaluation und energetische Analyse als Grundlage für Optimierungen von Alt- und Neubau der Kunsthalle Emden; Diplomarbeit an der Hochschule Bremerhaven; August 2002

/7/ VDI 3807 Bl. 2: Energieverbrauchskennwerte für Gebäude – Heizenergie- und Stromverbrauchskennwerte, Beuth Verlag GmbH 06/1998

/8/ Tillmann, Aktenvermerk Nr. 10, 3.3.1999

/9/ Geothermal Response Test 01.02.2000 Aetna Energiesysteme

/10/ EWS-Überprüfung und Dimensionierung Aetna Energiesysteme 10.02.2000

8 Anlagen

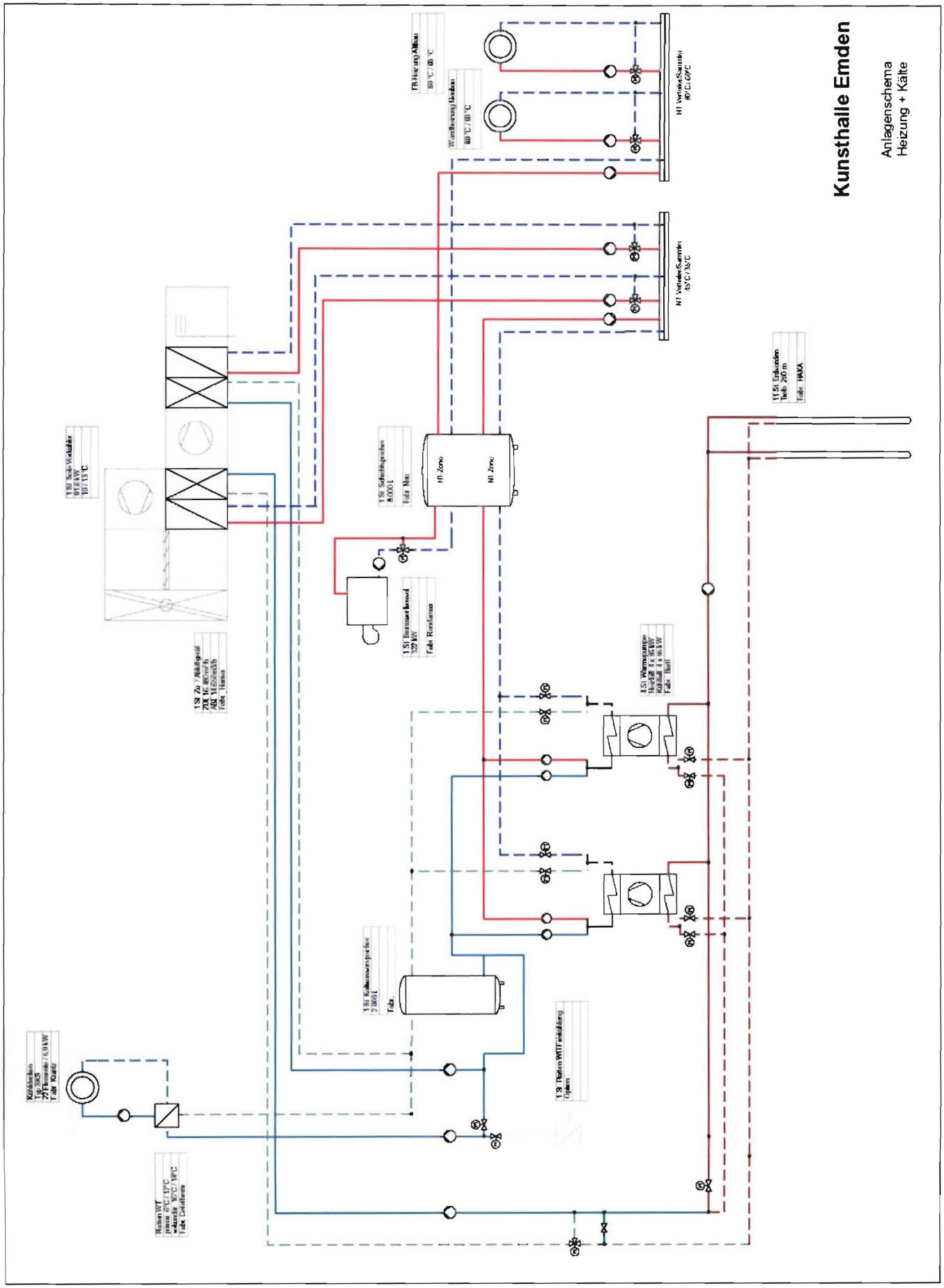
auf beiliegender CD-ROM sind nachfolgende Anlagen in Dateiform enthalten:

Anlage 1	Vereinfachtes Anlagenschaltbild der Wärme- und Kälteerzeugungsanlage
Anlage 2	Trendaufzeichnung der Gebäudeleittechnik
Anlage 3	Bericht zur Analyse der Energieverbrauchsdaten
Anlage 4	Diplomarbeit von Herrn Schlingmann

Anlagen auf nachfolgende Seiten:

Anlage 1	Vereinfachtes Anlagenschaltbild der Wärme- und Kälteerzeugungsanlage
Anlage 5	Raumbuchauszug für den Neubau
Anlage 6	Schätzung der Energiekosten

Anlage 1


Kunsthalle Emden
Anlagenschema
Heizung + Kälte
HT Zone
HT Zone

Anlage 5

Raumbuchauszug für den Erweiterungsbau mit Flächen, Raumvolumina, geförderten Luftvolumina und Zuluft-Volumenstrom pro m^2.

Raumbezeichnung	Etage	Fläche aus HL-Berech	Raum-volumen	V_{ZU} ZONE 1	Fläche	Zuluft-Strom	V_{ZU} ZONE 2	Fläche	Zuluft-Strom
		m²	m³	m³/h	m²	m³/(m² h)	m³/h	m²	m³/(m² h)
0.00 Fluchttreppe	EG	8,7	15,5	-			-		
0.00 Treppe EG	EG	15,8	52,0	-			-		
0.01 Fluchttreppe	EG	16,0	25,6	-			-		
0.16 Kabinett KN 1	EG	109,7	319,9	1.500	110	13,7	-		
0.24 Kabinett KN 2	EG	47,5	137,8	550	48	11,6	-		
0.30 Annahme	EG	55,6	164,0	-			350	56	6,3
0.32 Magazine MN 2	EG	108,0	313,2	-			1.050	108	9,7
0.34 Rest. Werkstatt	EG	52,5	152,3	-			800	53	15,2
0.36 Rest. Büro	EG	11,9	34,5	-			-		
0.38 Magazin MN 1	EG	122,2	354,3	-			900	122	7,4
0.39 Tonwerkstatt	EG	25,6	74,4	-			300	26	11,7
0.40 Werkstatt	EG	28,6	82,9	-			400	29	14,0
0.41 PUMI	EG	1,6	4,6	-			-		
0.42 Sonderwerkstatt	EG	11,1	32,2	-			300	11	27,0
0.43 Damen WC	EG	2,2	6,3	-			-		
0.44 Herren WC	EG	2,2	6,3	-			-		
1.01Fluchttreppe DG	1.OG	22,8	44,7	-			-		
1.01Treppe KG	1.UG	21,2	71,0	-			-		
1.03 Magazin MN 3	1.UG	58,3	167,5	-			350	58	6,0
1.03 Vorraum	1.UG	48,9	140,9	-			300	49	6,1
1.04 Magazin MN4	1.UG	64,9	187,8	-			400	65	6,2
1.06 Magazin MN5	1.UG	98,8	301,1	-			620	99	6,3
1.11 Keller	1.UG	166,4	482,1	700	166	4,2	-		
Technikkeller	1.UG	155,5	544,3	-			-		
Aufzug	1.UG	10,4	-	-			-		
Aufzug Technikraum	1.UG	4,0	-	-			-		
1.00 Fluchttreppe OG	1.OG	22,0	69,2	-			-		
1.14 Kabinett KN 3	1.OG	133,6	333,2	1.250	134	9,4	-		
1.16 Kabinett KN 4	1.OG	46,9	136,1	550	47	11,7	-		
1.18 Saal SN 1	1.OG	213,6	608,8	1.250	214	5,9	-		
1.19 Treppe OG	1.OG	23,5	58,7	-			-		
1.20 Saal SN 3	1.OG	153,1	440,2	1.000	153	6,5	-		
1.22 Saal SN 2	1.OG	127,4	420,3	1.050	127	8,2	-		
1.24 Saal SN 4	1.OG	114,0	390,3	1.050	114	9,2	-		
1.26 Saal SN 5	1.OG	227,9	741,7	1.780	228	7,8	-		
Empore EN 1 (ü. SNI 2)	DG	21,0	-	-			-		
Empore EN 2 (ü. SN 4)	DG	23,3	-	-			-		
Empore EN 3 (ü. SN 5)	DG	25,6	-	-			-		
Treppe	DG	20,7	-	-			-		
Summen		**2423,0**	**6913,7**	**10.680**	**1.340**	**8,0**	**5.770**	**675**	**8,6**

Anlage 6

Aufteilung der Energiekosten auf die einzelnen Verbrauchergruppen.
Als Kostenbasis diesen angenommene Kilowattstundenpreise für Strom und Wärme.

ANNAHMEN					
Stromkosten:	0,20	DM/kWh	0,10	€/kWh	
Heizkosten:	0,07	DM/kWh	0,04	€/kWh	
VERBRÄUCHE					
	kWh	**DM/kWh**	**DM gesamt**	**€ gesamt**	%
Wärme					
Erdgas Verwaltung	61.539	0,07	4.307,73	2.202,51	3,2
Erdgas Brennwertkessel	241.477	0,07	16.903,39	8.642,57	12,5
Strom Wärmepumpen	47.003	0,20	9.400,60	4.806,45	7,0
Strom Heizungsantriebe	1.298	0,20	259,60	132,73	0,2
Strom Solepumpen (Anteil 30,5 %)	7.628	0,20	1.525,61	780,03	1,1
			32.396,93	**16.564,29**	**24,0**
RLT					
Luftförderung	180.631	0,20	36.126,20	18.471,03	26,8
Befeuchtung	57.701	0,20	11.540,20	5.900,41	8,6
			47.666,40	**24.371,44**	**35,3**
Kälte					
Strom Wärmepumpen	61.759	0,20	12.351,80	6.315,38	9,2
Strom Solepumpen (Anteil 69,5 %)	17.382	0,20	3.476,40	1.777,46	2,6
			15.828,20	**8.092,83**	**11,7**
Restliche Stromverbraucher					
Beleuchtung	111.730	0,20	22.346,00	11.425,33	16,6
sonstige	83.169	0,20	16.633,80	8.504,73	12,3
			38.979,80	**19.930,06**	**28,9**
GESAMT			**134.871,33**	**68.958,62**	**100,0**