



# WKSP

## Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude

### Teil II

Ergebnisbericht PreCon – wetterprognosegeführte  
Reglung von thermisch aktivierten Bauteilen

TU Braunschweig  
**Institut für Gebäude- und  
Solartechnik**  
Mühlenpfordtstr. 23  
D - 38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391 - 3555  
Fax: 0531 / 391 - 8125  
e-mail: igs@tu-bs.de  
www.tu-bs.de/institute/igs

Labor:  
Zimmerstr. 24b  
D - 38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3635  
Fax: 0531 / 391-3636

#### Gesamtleitung

TU Braunschweig  
Institut für Gebäude- und Solartechnik - IGS  
Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch (Institutsleiter)  
Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann (Projektleiter)  
Dipl.-Ing. Herdis Kipry  
Dipl.-Ing. Markus Peter  
Dipl.-Ing. Christian Sasse

#### Kooperationspartner



**Energie&Wetter**Service

meteocontrol GmbH  
Energie&Wetter'Service  
Spicherer Strasse 48, D-86157 Augsburg

Bearbeitung: Bettina Zoczek  
Ralph Cerny

#### Bundesförderung



#### Förderkennzeichen

0327364A

#### Laufzeit

Juli 2004 – Februar 2010  
(inkl. Aufstockung und Verlängerung)

#### Stand

November 2010

Der Forschungsbericht wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. (Förderkennzeichen: 0327364A) Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



## VORWORT

Immer häufiger kommen in modernen Bürogebäuden thermisch aktivierte Bauteile zum Heizen- und Kühlen zum Einsatz. Systemtemperaturen nahe der Raumtemperatur ermöglichen eine sinnvolle Nutzung dieser Systeme in Verbindung mit regenerativen Energien (u.a. Freie Kühlung über Rückkühlwerke, Nutzung oberflächennaher Geothermie).

Charakteristisch für diese sehr trägen Heiz- und Kühlsysteme ist eine zeitlich verzögerte Wärme- und Kältebereitstellung an den Raum. In der Praxis führen nicht dem momentanen Bedarf entsprechende Oberflächentemperaturen der thermisch aktivierten Bauteile oftmals zu Komfortproblemen. Besonders häufig treten diese Probleme in den Übergangszeiten im Frühling und im Herbst auf. Kurzfristige Wechsel zwischen Heizen und Kühlen haben entweder keine Auswirkungen auf den Raum oder wirken den thermischen Anforderungen sogar entgegen. In jedem Fall sind sie mit unnötigem Energieverbrauch verbunden.

Diesen Problemen entgegenzuwirken versucht man mit einer Regelung der Systeme über Vergangenheitswerte wie dem 24 oder 72 Stunden-Mittel der Außentemperatur. Erreicht wird dadurch ein Ausgleich kurzzeitiger Temperaturschwankungen (z.B. Tag- und Nachtschwankungen) und eine Anpassung des Betriebs an langfristige Temperaturänderungen. Auf einen plötzlichen Temperaturanstieg oder -abfall kann allerdings nicht reagiert werden.

Effizienter und komfortgerechter ließen sich Systeme zur thermischen Aktivierung von Speichermassen in Gebäuden mit Hilfe von Wetterprognosen betreiben. Mögliche Potentiale sind im Einzelnen:

- Steigerung der Energieeffizienz beim Betrieb der Anlagen durch präzise Auf- bzw. Entladung der Speichermassen entsprechend der zu erwartenden thermischen Lasten
- Reduzierung von Betriebskosten durch Nutzung von Ladezeiten in den Nachtstunden (Nutzung von Nachtтарifen, Vermeidung von Stromlastspitzen am Tage)
- Komfortverbesserung durch Optimierung der Heiz- und Kühlleistungen in Abstimmung auf die Wettersituation (z.B. Reduzierung von Überhitzungsstunden)
- Ausnutzung der maximal möglichen Kälteleistung durch taupunktorientierten Betrieb der Speichermassen
- Reduzierung der Leistungsanforderungen und damit der Investitionskosten für die Gebäudetechnik

Im Rahmen des Projekts PreCon – Predicted Control werden Anwendbarkeit und Potentiale einer wetterprognosegeführten Regelung für thermisch aktivierte Decken untersucht. Mit Hilfe von Gebäudesimulationen erfolgt in einem ersten Entwicklungsschritt eine Extraktion der regelungsrelevanten Wetterparameter und auf dieser Grundlage die Ausarbeitung von in der Gebäudeleittechnik einsetzbaren Regelalgorithmen. Eine mögliche Effizienz- und Komfortsteigerung soll durch Vergleichssimulationen einer konventionellen Regelung und einer wetterprognosegeführten Regelung ermittelt werden. Dazu werden in Kooperation mit der Firma meteocontrol GmbH aufgezeichnete Wetterdatensätze sowie Wetterprognosen in die Gebäudesimulationen implementiert.

Das Projekt PreCon ist Teil des Forschungsvorhabens WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude. Die Systeme zur Nutzung der thermischen Speicherfähigkeit des Gebäudeuntergrunds werden häufig mit thermisch aktivierten Decken gekoppelt. Nur bei einem gut aufeinander abgestimmten Betrieb beider Systeme kann das Erdreich optimal für eine saisonale Speicherung genutzt werden. Eine wetterprognosegeführte Regelung und infolge dessen ein kontrollierter und bedarfsgerechter Wärmeeintrag bzw. -entzug ist für diese Systeme von besonderer Bedeutung.



## INHALTSVERZEICHNIS

1.	Aufbereitung Stand des Wissens und der Technik .....	4
1.1.	Bisheriger Einsatz von Wettervorhersagen in der Regelung von Gebäuden und Anlagen.....	4
2.	Marktpotential von wetterprognosegeführter Regelung .....	12
3.	„PreCon“ - Gegenstand der Untersuchungen und Vorgehen .....	14
4.	Relevante meteorologische Größen und deren prognosemethode sowie -qualität.....	15
4.1.	Relevante meteorologische Größen zur Berechnung der Heiz- und Kühllasten.....	15
4.2.	Prognosemethoden sowie deren Fehlertoleranzen und Stationsfehler .....	15
4.3.	Charakterisierung von Wettersituationen und deren Prognosequalität .....	21
5.	Precon - freie kühlung .....	34
6.	Simulation - Wetterprognosegeführte Regelung für Betonkernaktivierungen.....	36
6.1.	Vergleich von Referenzwetterdaten, Wetterprognosen und standortspezifischen Messwerten.....	36
6.2.	Wetterprognosegeführte Regelstrategien zur Gebäudetemperierung.....	46
6.2.1.	Die Regelstrategien <i>PreCon</i> , <i>ForReg</i> und <i>Olesen</i> .....	47
6.3.	Simulation eines nach Süden und eines nach Norden orientierten Büros.....	48
6.3.1.	Gebäude, Beschreibung der Referenzbüros .....	49
6.3.2.	Weitere Referenzbedingungen.....	50
6.3.3.	Simulation des thermischen Verhaltens unterschiedlicher Gebäudevarianten...52	
6.3.4.	Bestimmung der gebäudespezifischen Koeffizienten für PreCon und ForReg...54	
6.3.5.	Koeffizientenbestimmung aus gemessenen Wetterdaten und Messwerten .....	57
6.4.	Auswertung und Ergebnisse der Simulationen .....	57
6.4.1.	Zuschlag zur Heiz- und Kühlenergie.....	57
6.4.2.	Operative (empfundene) Raumtemperatur .....	58
6.4.3.	Referenzauswertung Testreferenzjahr 04, „Nordostdeutsches Tiefland“ .....	59
6.4.4.	Wetterdaten und Prognosen Hamburg, Berlin und Mannheim.....	67
6.4.5.	Energieeffizienz der wetterprognosegeführten Regelstrategien.....	80
6.4.6.	Regelgüte und Komfort .....	83
6.5.	Zusammenfassung.....	86
7.	Kostenabschätzung für wetterprognosegeführte Regelungen .....	88
7.1.	Umfang der gelieferten Daten .....	88
7.2.	Datenübertragung .....	89
7.3.	Kostenabschätzung bei der Verwendungen von PreCon und ForReg .....	89
8.	Anhang.....	94
8.1.	Abkürzungen.....	94
8.2.	Quellen und Literatur zum Projekt .....	97
8.3.	Abbildungen .....	99

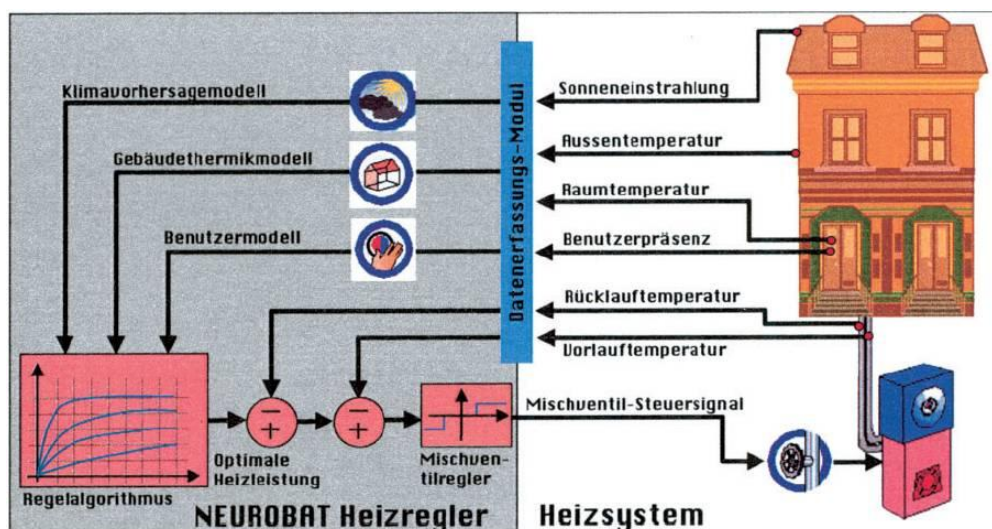
## 1. AUFBEREITUNG STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

### 1.1. Bisheriger Einsatz von Wettervorhersagen in der Regelung von Gebäuden und Anlagen

Bisher kommen Wetterprognosen in der Regelung von Gebäuden und Anlagen nur vereinzelt zum Einsatz. Zur Einbindung in die Regelung existieren im Wesentlichen zwei unterschiedliche Ansätze. So besteht einmal die Möglichkeit auf Basis von Vergangenheitswerten und mathematischen Modellen Vorhersagen im Regler selbst zu erzeugen. Alternativ können in regelmäßigen Intervallen Prognosen eines externen Wetterdienstes in den Regler eingelesen werden. Umfangreiche Betriebserfahrungen an realen Gebäuden gibt es bisher nicht.

Ein Regler, der auf Basis von Vergangenheitswerten Prognosen erzeugt, wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie (BfE) der Schweiz entwickelt.

- I. Das Schweizer Elektronik- und Mikrotechnikzentrum **CSME** hat in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurunternehmen ESTIA GmbH und dem Labor für Solarenergie und Gebäudephysik LESO-PB den auf künstlichen neuronalen Netzwerken basierenden **Regler NEUROBAT** entwickelt [3], siehe Abbildung 1. Mit dem Ziel der Energieeinsparung und Behaglichkeitssteigerung passt dieser Regler unter Verwendung lernfähiger Klima- und Gebäudemodelle die Heizleistung den klimatischen, gebäudetechnischen und nutzerspezifischen Bedingungen selbständig an. Ein "neuronales" Klimavorhersagemodul dient der „Wetterprognose“ und schätzt die zu erwartende Außentemperatur sowie Solarstrahlung auf Basis der zurückliegenden Messwerte. Eine Überführung des Reglers NEUROBAT in die Serienherstellung ist geplant. Im Testbetrieb mit Prototypen in Schweizer Pilotanlagen konnten Komfortsteigerungen sowie Energieeinsparungen von über 10 % erzielt werden [2].



**Abbildung 1:** Regelkonzept des NEUROBAT-Reglers: Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Raumtemperatur, Vor- und Rücklauftemperaturen stehen als Sensordaten zur Verfügung [1]



Lösungen, bei denen reale meteorologische Vorhersagen einfließen und die Vorhersagen nicht erst im Regler auf Basis von Vergangenheitswerten generiert werden müssen, gibt es beispielsweise von den GLT-Firmen Kieback&Peter, Siemens und Honeywell sowie von der Firma Meteoviva.

II. Das DDC-Softwaremenü „**M377 Don-AT-Wetter**“ der Firma **Kieback und Peter** [4] bietet die Möglichkeit, von einem Wetterdienstanbieter über ein Modem und eine Premium-Service-Verbindung Vorhersagen der Außenlufttemperatur im Stundenraster für die nächsten 24 Stunden anzufordern und im Speicher abzulegen. Da auch für die 24. Stunde eine Voreilung von 6 Stunden möglich sein soll, werden tatsächlich 30 Temperaturwerte übertragen. Zusätzlich stehen die Min- und Maxwerte sowie der Mittelwert für die nächsten 24 Stunden seit der letzten Abholung von Prognosedaten zur Verfügung. Die Auswahl der für den Einsatzort der DDC-Zentrale optimalen Wetterstation erfolgt über einen Parameter „Stationskennung“. Er kann über die Postleitzahl des Aufstellungsortes der DDC ermittelt und bei Bedarf über einen Korrekturwert angepasst werden.

Mögliche Anwendungen sind [4]:

- Ersatzwert bei zwischenzeitlichem Ausfall des Außentemperaturfühlers.
- Vorzeitiges Absenken der VL-Temperatur Heizung bei prognostiziertem Außentemperaturanstieg und vorzeitiger Wechsel der Heizung in den Standby-Betrieb bei Grenzwertüberschreitung der prognostizierten Außentemperatur.
- Aktivierung der Freien Nachtkühlung im Zeitraum „Sommer“ und setzen des Betriebszeitfensters um das prognostizierte Außentemperaturminimum in der zweiten Nachthälfte.
- Vorzeitige Energieauswahl für die Zuluftkühlung – Umschalten von Kältemaschinen auf freien Kühlbetrieb

III. a) **Siemens Building Technologies** (Siemens BT) in der Schweiz hat einen Regler sowie einen Regelalgorithmus zur Heizungsregelung über Außentemperaturprognosen entwickelt und in Simulationsstudien als auch im Feldtest erprobt [5].

Die Vorhersage der Außentemperatur kann entweder aus historischen Daten im Regler selbst erzeugt oder auch als externe Vorhersagen eines Wetterdienstanbieters über das Internet eingelesen werden. Bei der Bestimmung der prognostizierten Außentemperatur im Regler selbst wird das Temperaturprofil der letzten 24 Stunden auf die folgenden 24 Stunden übertragen. Für die ersten 6 Stunden der Prognose erfolgt darüber hinaus eine Korrektur unter Berücksichtigung der aktuell gemessenen Außentemperatur. Die Prognose wird in regelmäßigen Intervallen (z.B. alle 20 Minuten) wiederholt und aktualisiert [5], siehe Abbildung 2.

Neben der prognostizierten Außentemperatur sind die Soll-Raumtemperatur - welche sich beispielsweise aus einem Nutzerprofil ergibt - sowie gemessene oder berechnete Systemzustände weitere Eingangsgrößen des Reglers. Mit Hilfe der genannten drei Größen ermittelt der Regler die erforderliche Soll-Vorlauftemperatur zur Erfüllung der geforderten Randbedingungen bei minimalem Energieaufwand. Zum Ausgleich von Unsicherheiten im Modell und bei Störgrößen, wie z.B. Wetter und Nutzerverhalten, erfolgen im Prognosezeitraum periodische Korrekturen der Soll-Vorlauftemperatur, in die auch aktuell gemessene Systemzustände einfließen, siehe Abbildung 3.

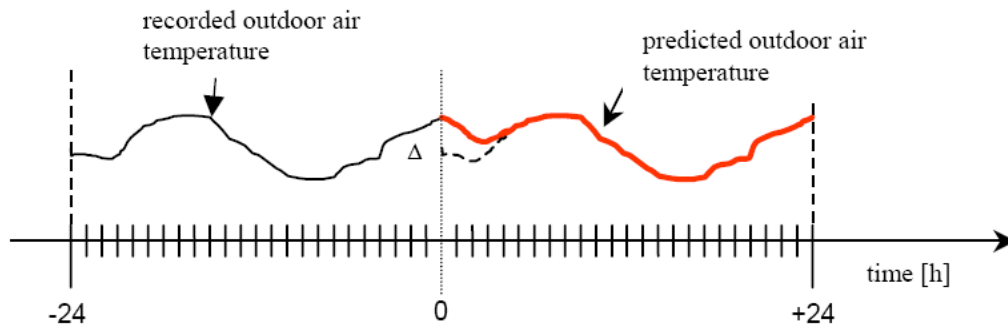


Abbildung 2: Wittervorhersage im Rahmen von predicted control [5]

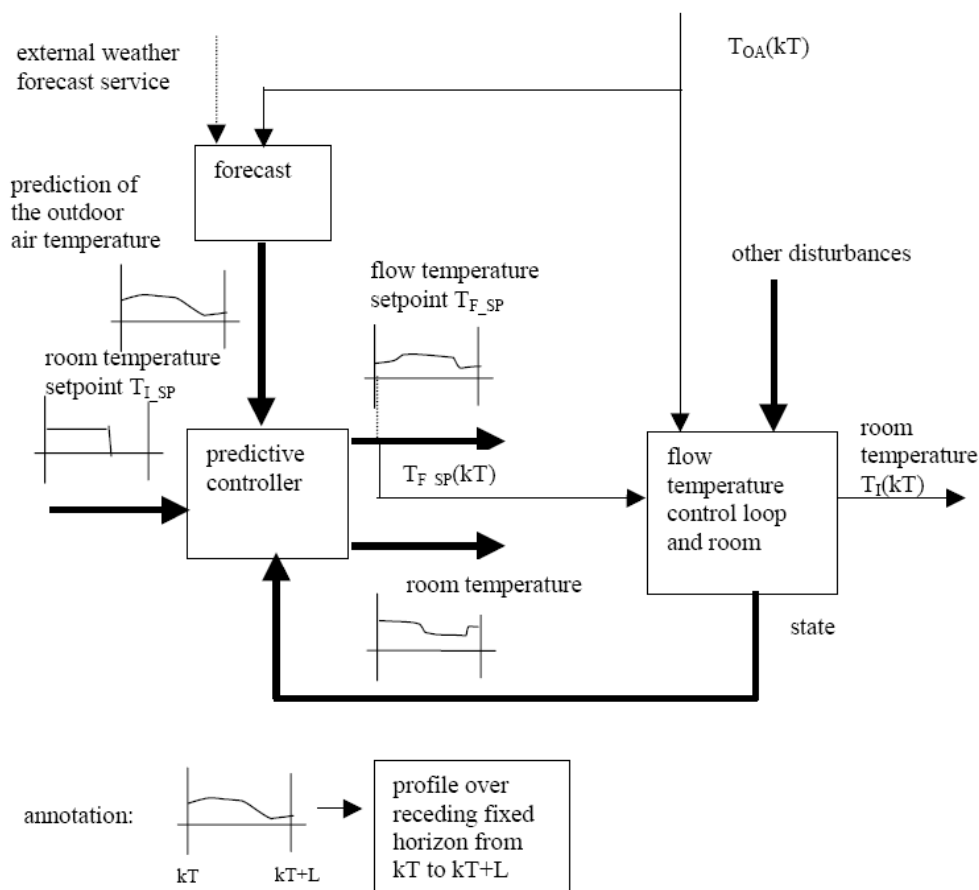


Abbildung 3: Basis Regelungskonzept für Predicted Control mit  $kT$  = Beginn des Optimierungszeitraums und  $L$  = Länge des Optimierungszeitraums; Siemens Building Technologies, Zug [5]

Wie die durchgeführten Simulationen sowie der Feldtest zeigen, werden die Ziele gleich bleibender Komfort, Nutzerakzeptanz, und einfache Anpassbarkeit mit der vorhersagegestützten Regelung erreicht. Aussagen zur Energieeinsparung können bisher nicht gemacht werden.

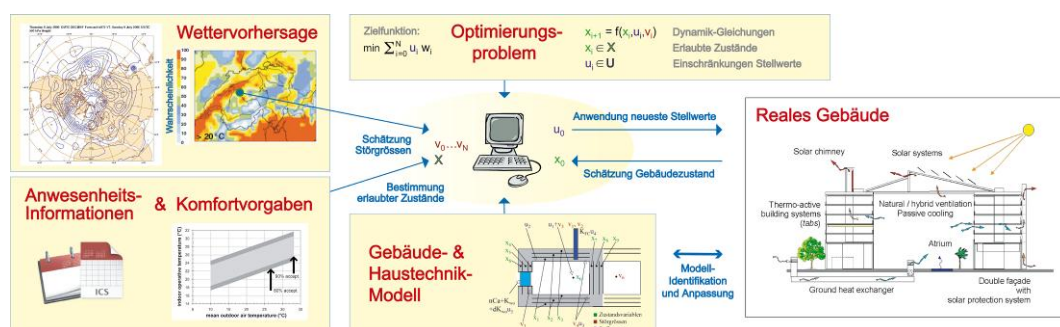
Neben den beschriebenen Funktionen bietet der Regler zukünftig weitere Möglichkeiten:

- Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei der Prognose
- Auf Vorhersagen basierende Warnungen (z.B. bei Frostgefahr)
- Erweiterung der Vorhersage der Außentemperatur auf die Solarstrahlung und Prognose der solaren Gewinne
- Vorhersage der Wärmegewinne im Raum

Eine weitere von Siemens Technology durchgeführte Studie hat ergeben, dass Wärmespeichersysteme wie thermisch aktivierte Bauteile besonders geeignet für eine Vorhersage gestützte Regelung sind. Die Nutzung der Speichermassen im Gebäude ermöglicht eine dem Bedarf vorausseilende Wärme- und Kälteerzeugung und somit den Einsatz regenerativer und weniger kostenintensiver Energie wie beispielsweise Freie Kühlung und Solarenergie [5].

Zwei Projekte zur Regelung von thermisch aktivierten Bauteilen über Außentemperaturprognosen wurden von Siemens Technologie in Zürich (Leonardo Bürogebäude, 2001 und Sunrise Tower, 2005) realisiert. Da es sich um rein kommerzielle Objekte handelt, gibt es jedoch keine Rückmeldungen und Erfahrungen hinsichtlich Funktionalität und Erfolg.

b) Seit Mai 2007 läuft das Forschungsprojekt OptiControl an dem sich Siemens BT beteiligt. Das Ziel von OptiControl ist es, die Innovationen aus den verschiedenen Regelungstechniken für die Wettervorhersage und der Gebäudetechnik zu kombinieren. Durch die starke Verkleinerung der Maschenweite der Prognosezellen von 7 auf 2,2 Kilometer ist die Qualität der Wetterdaten stark angestiegen. Es können nun stündlich bis zu 24 Parameter wie Temperatur, Windgeschwindigkeit oder Strahlung für die nächsten 24 bis 72 Stunden vorausgesagt werden. Diese Daten können via Internet direkt an die Gebäuderegulierung übermittelt werden, wo sie dann stochastisch angeglichen werden, um größere Prognoseabweichungen und daraus resultierende Komforteinbuße zu vermeiden [20], siehe Abbildung 4.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung der Eingaben und Abläufe bei der Verwendung von Wetter- und Belegungsvorhersagen für Optimal Building Climate Control (OptiControl) [20]

Die Entwicklung leistungsstarker und zugleich günstiger Prozessoren ermöglicht es bei der Anlagenregelung eine Vielzahl an Parametern einzubeziehen sowie das Erstellen eines Modells für das thermische Verhalten des Gebäudes. So sollen z.B. die Angaben über Wärmedurchgangskoeffizienten und Speicherkapazitäten der Wände in das Regelkonzept mit einfließen können. Angestrebt werden standardisierte Schnittstellen, um die Angaben direkt aus den CAD-Programmen der Architekten einlesen zu können. Zusammen mit der



Wettervorhersage für die folgenden drei Tage, den manuellen Vorgaben des Benutzers und den lokalen Messwerten für Innen- und Außentemperatur soll dann das optimale Heizprofil für das Gebäude berechnet werden.

Die Methode bedarf jedoch sehr viel Speicher und Rechenleistung, da alle 15 Minuten das System nachjustiert wird. Über die bisherigen Rechner konnte diese Leistung nicht realisiert werden.

Ein weiteres Ziel von OptiControl ist es, erste handfeste Aussagen über das Kosten-Nutzen-Verhältnis treffen zu können. Erste Simulationen zeigen ein Energieeinsparpotential von ca. 15% bei einem typischen Büroraum. Weitere vielfältige Szenarien und Raumarten sollen noch im Laufe des Projekts simuliert und bereitgestellt werden. Bis zum Projektende 2010 sollen verschiedene Prototypen der Regelungsgeräte realisiert und in Pionierobjekten getestet werden, um im Anschluss mit der Produktentwicklung zu beginnen [20].

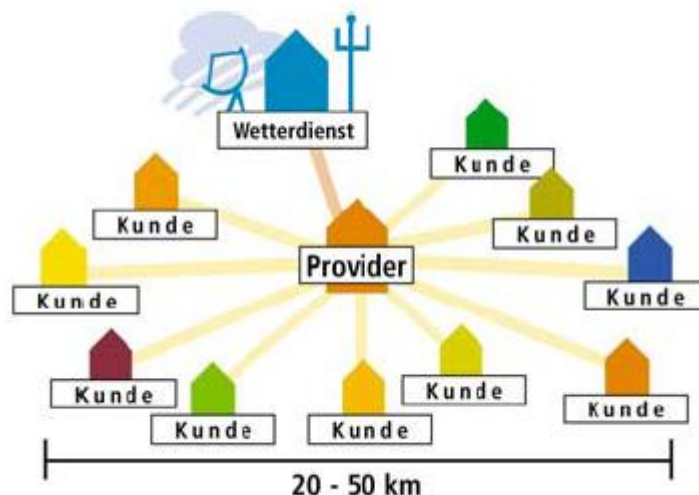
- IV. Zur wetterprognosegeführten Regelung bietet die Firma **Honeywell** zwei Lösungen an. Das Modul „**Weather Gain**“ wird zur außentemperaturgeführten Heizungsregelung in Skandinavien bereits erfolgreich eingesetzt. Ein der eigentlichen Heiz- und Kühlregelung vorgeschalteter zusätzlicher Regler rechnet mit Hilfe von Wetterprognosen die gemessene Außentemperatur in eine äquivalente Außentemperatur um. Die Methode zur Bestimmung der äquivalenten Außentemperatur basiert auf theoretischen Analysen der meteorologischen Bedingungen und auf dem Wärmeverhalten des Gebäudes. Einmal pro Tag wird von einem Service Center eine detaillierte Wetterprognose für die nächsten fünf Tage im Voraus an den Regler geschickt. Die Wetterprognose enthält auf den Standort abgestimmte stündliche Werte von Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Bei fehlenden Wetterdaten greift die bestehende Regelung. Geeignet ist das Modul für Wohn- und Zweckbauten wie Bürogebäude, Schulen und Krankenhäuser [6].

Als Kundenlösung für Pilotanlagen in den Niederlanden (Heerlen Hospital) und den USA wurde von Honeywell darüber hinaus das Modul „**Energy Manager**“ entwickelt. Über den „Energy Manager“ erfolgt eine Vorausberechnung des Energiebedarfs (Kälte, Wärme, Dampf oder Strom) sowie ein dem Bedarf entsprechendes vorzeitiges Starten und Stoppen der entsprechenden Anlagen.

Unter Berücksichtigung der Wetterprognose erfolgt die Bedarfsabschätzung über einen gebäude-, nutzungs- und anlagenspezifischen Algorithmus. Die Wetterdaten holt der Energy Manager als Textdateien im csv-Format von einem ftp-Server über das Internet ab. Die Prognosen werden zweimal täglich aktualisiert und enthalten für 72 Stunden im voraus Stundenwerte von Außentemperatur, Luftfeuchte und Taupunkttemperatur. Vorrangiges Ziel der wetterprognosegeführten Regelung ist die Energieeinsparungen sowie eine mögliche Steigerung der Behaglichkeit [6].

- V. Die Firma **Meteoviva** aus Aachen bietet ein eigenes patentiertes Verfahren zu Betriebsoptimierungen mittels **Wettervorhersage-Steuerungen (WVS)** an. Regionale Meteoviva-Rechenzentren erhalten Wettervorhersagedaten von einem professionellen Wetterdienst und berechnen mittels des Simulationswerkzeugs LACASA [7] für unterschiedliche Gebäude und Anlagen die optimalen Steuerwerte für die kommenden 96 Stunden.





**Abbildung 5:** Regionale Rechenzentren liefern auf Basis von Wetterprognosen generierte Steuerdaten zur optimierten Betriebsführung von Gebäuden und Anlagen [8]

Die Ermittlung der Steuerwerte erfolgt ein- bis zweimal täglich über ein mathematisches Rechenmodell, welches das physikalische thermodynamische Verhalten des realen Gebäudes inklusive der installierten Anlagentechnik beschreibt. Neben den Wettervorhersagedaten (Außentemperatur, solare Einstrahlung und Windverhältnisse) fließen interne Lasten und die Verfügbarkeit der Anlagentechnik über Zeitprofile in die Berechnung ein [7][5] und [8].

Abhängig von der technischen Infrastruktur des Gebäudes erfolgt der Datenaustausch zwischen Provider und einer MeteoVivaBox per Modem, GSM oder DSL-Internet. Die MeteoVivaBox wird direkt mit dem LON-Bus-System des Gebäudes gekoppelt und steuert so mit den vom Rechenzentrum gelieferten und gespeicherten Daten aktiv die Anlagentechnik. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit über die MeteoVivaBox aktuelle Daten einer lokalen Wetterstation, Raumtemperaturen und Anlagenzustände aufzuzeichnen, um so Abweichungen zwischen Prognose und Realität erkennen und die Regelung kontinuierlich optimieren zu können. Voraussetzung ist die Implementierbarkeit einer OPC-Schnittstelle. Für den Nutzer können Zählerstände, vorhergesagte und tatsächlich eingetretene Raumzustände über das Internetportal „Mein MeteaViva“ sichtbar gemacht werden [8].

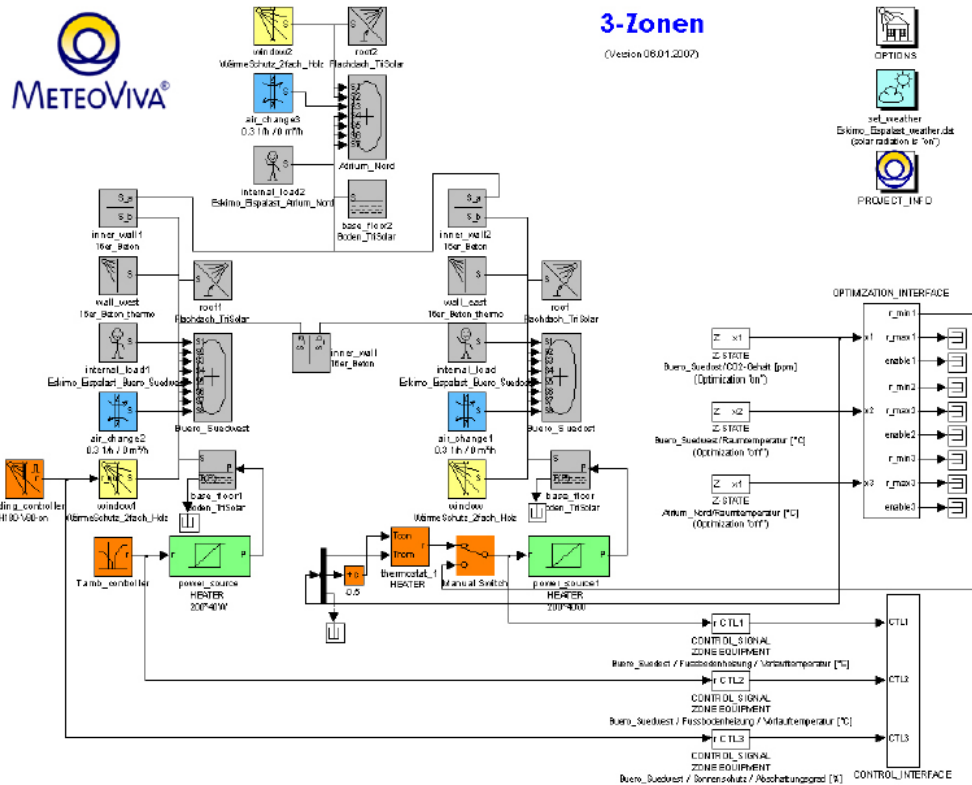


Abbildung 6: Simulationsmodell zur Vorausberechnung der thermodynamischen Verhältnisse des realen Systems [8]



Abbildung 7: MeteoVivaBox dient vor Ort der Übertragung von Mess- und Steuerdaten [8]

Besonders geeignet sind Systeme wie Fußbodenheizungen, thermisch aktivierte Bauteile und Gebäude mit großen thermischen Speichermassen, bei denen es infolge thermischer Trägheit zu unerwünschten Phasenverschiebungen zwischen Bedarf und Energiebereitstellung kommt. Vorteile gegenüber einer konventionellen Regelung sind:

- Steigerung des thermischen Komforts
- Energieeinsparung (10 bis 35 %)
- Verlängerung der Anlagenlebensdauer durch sanfte Betriebsweise



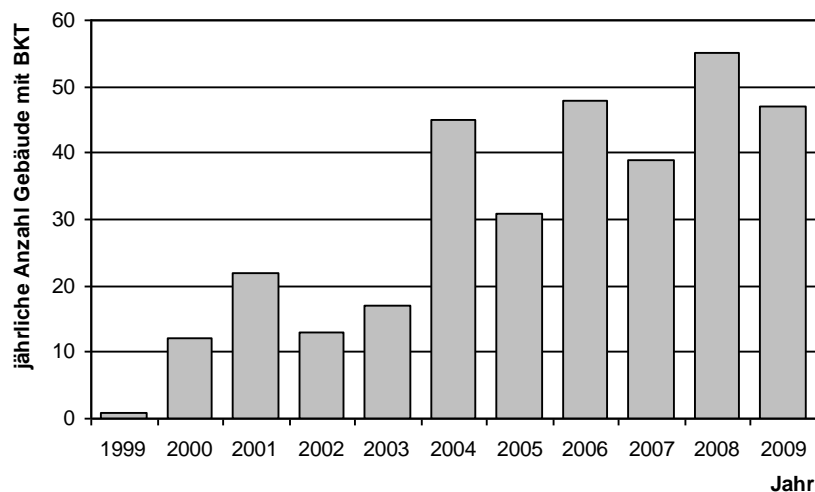
- Reduzierung der erforderlichen Anschlussleistung
- Minimierung des regelungstechnischen Aufwands vor Ort

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Wetterprognosen in der Regelung von Gebäuden und Anlagen bisher nur vereinzelt zum Einsatz kommen. Die Entwicklungs- und Forschungstätigkeiten in diesem Bereich spiegeln jedoch den Bedarf an einer vorausschauenden Regelung speziell für die immer häufiger zum Einsatz kommenden Systeme mit thermischen Speichermassen wieder. Die Eignung und Potentiale der wetterprognosegeführten Regelung für diese trägen Systeme belegen die dokumentierten Simulationsstudien und Feldtests. In den meisten Fällen beschränken sich die Prognosen allerdings auf die Außentemperatur. Der für die thermischen Gegebenheiten in einem Gebäude relevante Einfluss der Solarstrahlung findet bisher kaum Berücksichtigung. Generell ist die Prognose der Solarstrahlung im Vergleich zur Außentemperaturprognose deutlich schwieriger und die Einbindung in eine Regelung mit deutlich größeren Unsicherheiten verbunden. So besteht weiterhin Entwicklungsbedarf hinsichtlich zuverlässiger Verfahren und Lösungen für die wetterprognosegeführte Regelung von Gebäuden und Anlagen [7], [8] und [9].

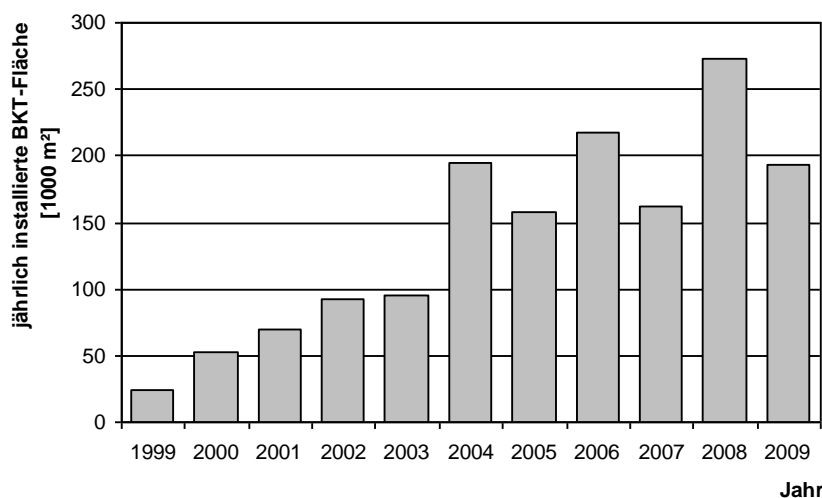
## 2. MARKTPOTENTIAL VON WETTERPROGNOSEGEFÜHRTER REGELUNG

Speziell im Bereich der Büro- und Verwaltungsgebäude werden Neubauten in den letzten Jahren vermehrt mit thermisch aktivierten Bauteilen (BKT) ausgestattet.

Im Rahmen einer eigenen Recherche mit Hilfe von zwei namhaften und großen Herstellern (Roth und Zent-Frenger) ergibt sich, dass ein starker Anstieg, geprägt jedoch mit zeitlichen Einbrüchen, seit 1999 besteht. In einem Zeitraum von 10 Jahren (1999 bis 2009) werden bei den beiden Firmen zusammen in Deutschland in 330 Gebäuden insgesamt rund 1.530.360 m<sup>2</sup> thermisch aktivierte Flächen in Büro- und Verwaltungsgebäuden realisiert, siehe Abbildung 8 und Abbildung 9.



**Abbildung 8:** Entwicklung der in Deutschland jährlich gebauten Büro- und Verwaltungsgebäude mit BKT, 1999 bis 2009



**Abbildung 9:** Entwicklung der in Deutschland jährlich installierten BKT-Fläche, 1999 bis 2009

An Abbildung 10 ist zu erkennen, dass seit 2002 die durchschnittlich installierte Fläche von 5.000 m<sup>2</sup> je Gebäude relativ konstant die folgenden Jahre beibehalten wird. Eine weitere Recherche zeigt Abbildung 11 [aus HLH Bd. 55 (2004) Nr.5, S.30]. Hier ist die Installation von thermisch aktivierten Bauteilen bereits seit 1990 verfolgt worden.

Die steigenden Zahlen und Umsetzungen von thermisch aktivierten Bauteilen in Deutschland zeigen, dass das Potential vorhanden ist, um wetterprognosegeführte Regelungen umzusetzen. Zudem ist festzustellen, dass die Akzeptanz von Bauteilaktivierungen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden und die Anforderung an die Reduzierung des Primärenergiebedarfs von Bürogebäuden immer weiter steigen. In Zukunft besteht ein erhöhter Forschungsbedarf bezüglich der Optimierung des kombinierten Betriebs von erdgekoppelten wärme- und kälte-technischen Anlagen mit thermisch trägen Bauteilen sowie der Umsetzung von energiesparenden Regelstrategien. Teilergebnisse aus diesem Projekt können hier wesentliche Beiträge zukünftiger anwendungsorientierter Forschung darstellen.

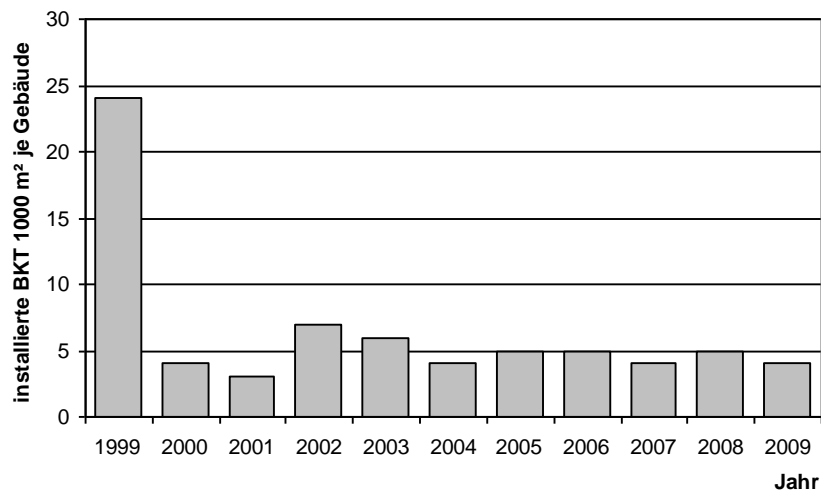


Abbildung 10: Durchschnittlich jährlich verbaute BKT pro Gebäude, 1999 bis 2009

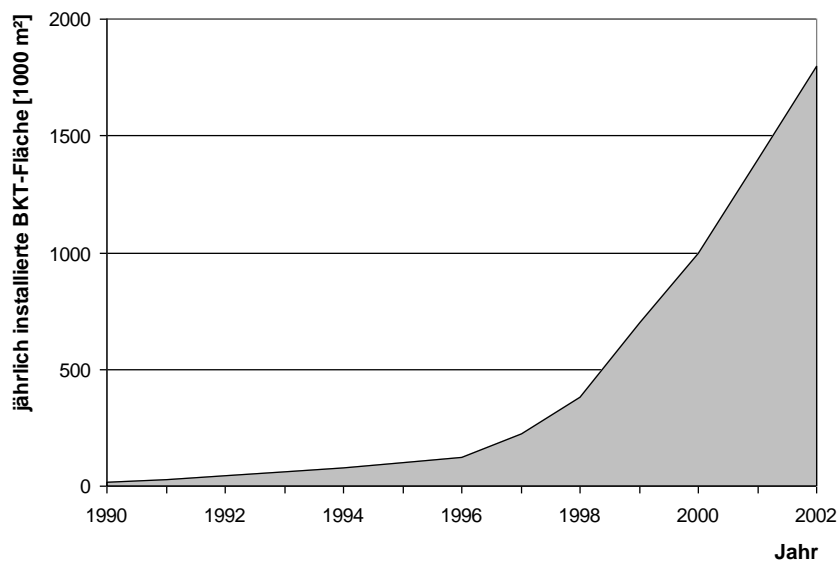


Abbildung 11: Entwicklung der installierten Fläche mit Bauteilaktivierung (deutschsprachiger Raum, [nach HLH Bd. 55 (2004) Nr.5, S.30])



### 3. „PreCon“ - GEGENSTAND DER UNTERSUCHUNGEN UND VORGEHEN

Mit PreCon (Predicted Control) soll eine Abschätzung der zu erwartenden Heiz- und Kühllasten mit Hilfe der prognostizierten Außentemperatur und Globalstrahlung bei vorgegebener Nutzung ermöglicht werden. Basierend auf den errechneten Heiz- und Kühllasten sind Vorkauftemperaturen für die Be- und Entladung der thermisch aktivierten Bauteile während der Nachtstunden abzuleiten. Ziel ist die Gewährleistung eines behaglichen Raumklimas am Folgetag in Verbindung mit einem optimierten Energieverbrauch (Nutzung Freie Kühlung in den Nachtstunden).

Die Entwicklung und Erfolgskontrolle eines auf Wetterprognosen basierenden Regelalgorithmus für thermisch aktivierte Decken (kurz: WPR-Algorithmus) beinhaltet im Wesentlichen die nachfolgenden Schritte:

- Bestimmung der für eine wetterprognosegeführte Regelung relevanten meteorologischen Größen.
- Beschreibung der Prognosemethode sowie Analyse von Fehlertoleranzen und Stationsfehlern als Bewertungsbasis für Auswirkungen von Prognosefehlern auf die wetterprognosegeführte Regelung.
- Charakterisierung von Wettersituationen und Darstellung von Hauptwetterlagen als Datenbasis zur Untersuchung des Einflusses von Hauptwetterlagen auf die wetterprognosegeführte Regelung hinsichtlich thermischem Komfort und Energieeinsparpotential.
- Entwicklung eines WPR-Algorithmus für Referenzbüros mit Nord-/ Südausrichtung auf der Basis von Referenzwetterdaten (Testreferenzjahr TRY von Potsdam)
- Simulation einer wetterprognosegeführten Regelung auf Basis einer optimalen Prognose (Prognose bestehend aus vordatierten Referenzwetterdaten vom Standort Potsdam) am Beispiel der Referenzbüros.
- Simulation der wetterprognosegeführten Regelung mit realen Prognosen und Messdaten der Jahre 2003 und 2004 am Beispiel der Referenzbüros für drei verschiedene Standorte (Mannheim, Hamburg und Berlin). Untersucht wird unter anderem die Übertragbarkeit des WPR-Algorithmus auf unterschiedliche Standorte.

Eine Bewertung der wetterprognosegeführten Regelung von thermisch aktivierten Decken erfolgt auf der Basis eines Vergleichs der Regelstrategien ForReg, PreCon und Olesen (siehe vgl. Kapitel 6.2.1). An jedem Standort werden mehrere Konfigurationen der Referenzbüros mit niedrigen, mittleren und hohen externen thermischen Lasten untersucht. So können typisiert für die gängigsten architektonischen Bürokonfigurationen die Auswirkungen von PreCon an allen drei Standorten vergleichbar abgebildet werden.



## 4. RELEVANTE METEOROLOGISCHE GRÖSSEN UND DEREN PROGNOSEMETHODE SOWIE -QUALITÄT

### 4.1. Relevante meteorologische Größen zur Berechnung der Heiz- und Kühllasten

Von den möglichen Klimaparametern, die von der Fa. meteocontrol zur Verfügung gestellt werden können, sollen im Folgenden diejenigen herausgegriffen werden, die für einen wetter-abhängigen Regelalgorithmus aufgrund ihres direkten Einflusses auf das Gebäude von größ-ter Relevanz sind.

Ein direkter Einfluss auf das Gebäude und somit dessen Wärmehaushalt kann für den Para-meter Temperatur festgehalten werden. Die Außenlufttemperatur  $T_{amb}$  beeinflusst die Wärme-gewinne und -verluste infolge Lüftung, Infiltration und Transmission. Die Lufttemperatur wird unter Ausschluss des Strahlungseinflusses - sowohl der Sonnenstrahlung als auch der Wär-mestrahlung der Umgebung - in zwei Metern Höhe gemessen.

Ein direkter Wärmegewinn über die Gebäudehülle kann auch beim Parameter Globalstrahlung angenommen werden.

Bei den Parametern Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge kann von einem indirekten Einfluss ausgegangen werden, der sich beispielsweise in Form von verän-derten Wärmeübergängen und damit veränderten Wärmegewinnen oder -verlusten durch eine gegebene Außentemperatur zeigt.

Weitere Parameter, wie zum Beispiel Luftfeuchte, Luftdruck oder Taupunkt können vernach-lässigt werden.

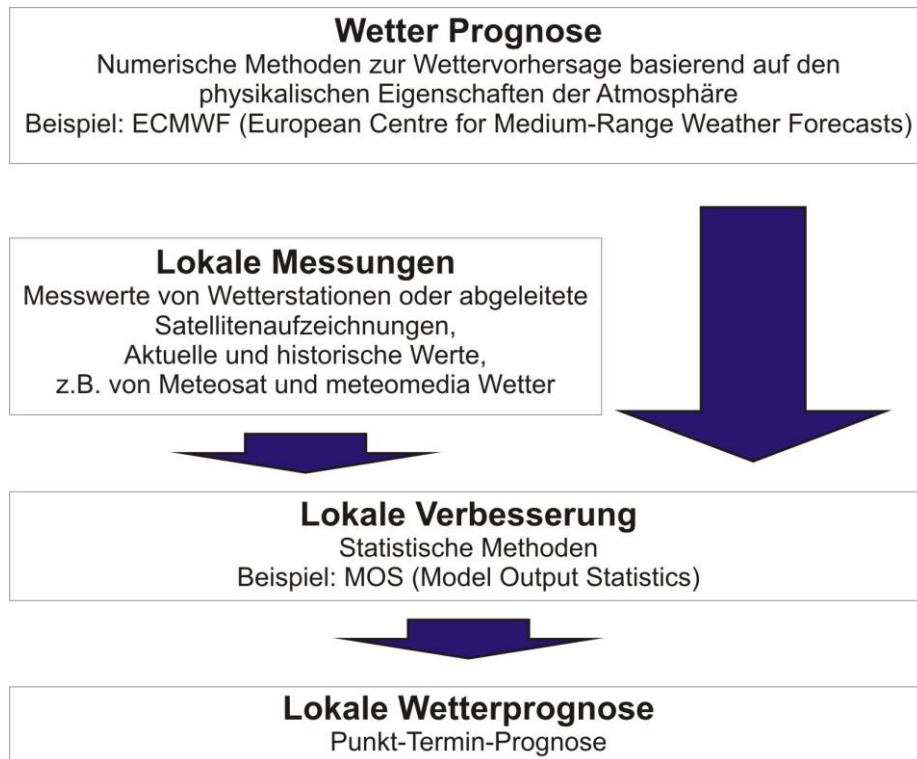
In den durchgeführten Simulationen wird zur Bestimmung der Heiz- und Kühllasten auf die Außenlufttemperatur und die horizontale Globalstrahlung an den jeweiligen Standorten zu-rückgegriffen, andere Einflussparameter werden nicht berücksichtigt.

### 4.2. Prognosemethoden sowie deren Fehlertoleranzen und Stationsfehler

Die Prognosedaten, die für die Simulationen herangezogen werden, basieren auf einer Me-thode, die mit der Abkürzung MOS („Model Output Statistics“) bezeichnet wird. Sie umschließt neben Daten eines Vorhersagemodells, die als Grundlage für statistische Beziehungen die-nen, sowohl lokale Messungen als auch lokale Statistiken. Durch die folgende symbolische Gleichung kann das MOS vereinfacht definiert werden:

MOS = Vorhersagemodell + lokale Messungen + lokale Statistik

In Abbildung 12 ist der Ablauf einer MOS-basierenden Wettervorhersage, die auf statistischen Annäherungen beruht, schematisch dargestellt:



**Abbildung 12:** Ablauf einer MOS basierenden Wettervorhersage

Im Falle des für die Firma meteomedia AG eigens entwickelten „Punkt-Termin-Prognose-Modells“, dem so genannten „meteomedia-Model Output Statistics (MM-MOS), dient das ECMWF-Modell – wie als Beispiel in oben angeführtem Schaubild – als Grundlage. Es handelt sich hierbei um ein Prognosemodell des European Centre for Medium Range Weather Forecast, 1973 gegründet von staatlichen Wetterdiensten zahlreicher europäischer Staaten mit dem Ziel, eine 10-tägige Vorhersage zu erstellen und die Prognosegüte stetig zu verbessern. Mit Hilfe dieses Modells können unter anderem zahlreiche Klimaparameter weltweit mit einer horizontalen Auflösung von  $0,5^\circ$  bzw.  $0,25^\circ$  (ca. 56 bzw. 28 km) und einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten berechnet und somit prognostiziert werden. In der Vertikalen umfasst das Modell 91 Schichten von der Erdoberfläche bis in eine Höhe von 80 km.

Die in das MOS mit eingehenden, aktuellen lokalen Messdaten können sowohl den Wetterstationen selbst, als auch Satellitendaten entstammen. Im Prinzip handelt es sich beim MOS um eine multiple Regressionsanalyse ausgewählter Faktoren, der als Ausgangswert – neben den Prognosedaten des ECMWF-Modells – die Zeitreihen der beobachteten Wetterparameter der einzelnen Stationen zugrunde liegen. Durch das MOS-Verfahren werden für jeden Zielort sowie für jede Jahreszeit jeweils eigene Regressionsgleichungen aufgestellt. Innerhalb der Gleichungen werden die zu vorhersagenden Variablen durch verschiedene Größen und in unterschiedlichem Maße beeinflusst, so dass bei der Aufstellung der MOS-Gleichungen eine spezielle Gewichtung der einzelnen Einflüsse erfolgt.

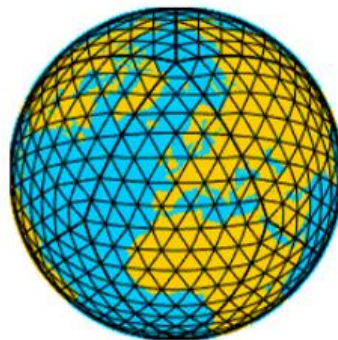
Nach einer anfänglichen Qualitätsüberprüfung der Synop-Daten (Werte von Wetterstationen) und der Einführung eines Glättungsfaktors erfolgt eine lineare Interpolation der Modell-Daten auf die geographische Position einer Wetterstation. An die dann durchzuführende Regressi-



onsanalyse schließt sich eine Korrekturanalyse an, wodurch Korrekturfaktoren der jeweiligen Messstandorte berücksichtigt werden, zum Beispiel die Beachtung von orographischen Bedingungen einer Wetterstation im gebirgigen Gelände.

Eine wichtige Voraussetzung für eine exakte Prognose ist die exakte Messung der Ausgangswerte. In einem globalen Beobachtungsnetz werden die meteorologischen Daten an einer Vielzahl von Messplattformen, wie Bodenmessstationen, Schiffen, Bojen, Radiosonden, Satelliten und Flugzeugen, gewonnen und anschließend über ein internationales Kommunikationsnetz zwischen den nationalen Wetterdiensten ausgetauscht.

Um nun die zukünftige Entwicklung des Wettergeschehens simulieren zu können, greift man auf physikalische Gesetzmäßigkeiten zurück, mit deren Hilfe die zeitlichen Änderungen der atmosphärischen Zustandsvariablen (z.B. Luftdruck, Wind, Temperatur) beschrieben werden können. Mit numerischen Verfahren können die Gleichungen näherungsweise gelöst werden. Dazu wird über die gesamte Erde ein Gitternetz gelegt, an dessen Gitterpunkten die Variablen bestimmt werden, wie die folgende Abbildung 13 veranschaulichen soll:

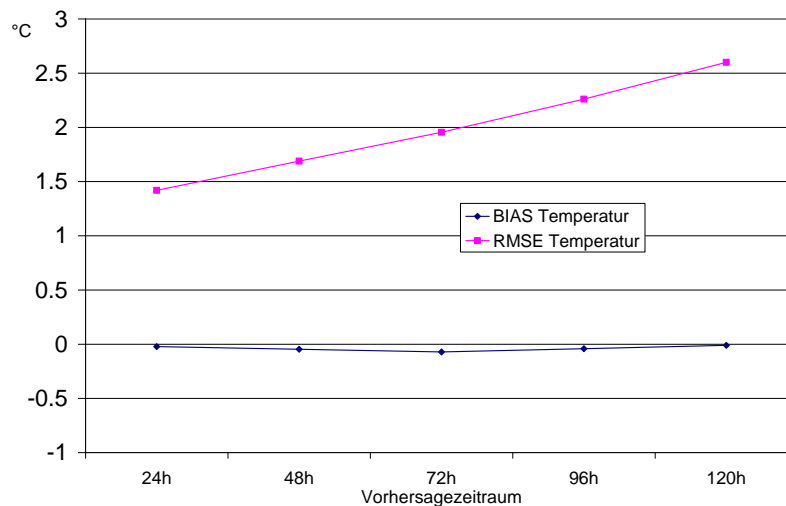


**Abbildung 13:** Beispiel eines Modellgitters

Das Prinzip der numerischen Wettervorhersage kann in folgende Schritte untergliedert werden: die weltweiten Beobachtungsdaten sind aufgrund der nicht einheitlichen Messstandards zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich. Mit Hilfe des so genannten Assimilationsverfahrens kann ein Abgleich der Daten und eine Transformation in das jeweilige Modellgitter erfolgen.

Der nächste Schritt ist die Erfassung von atmosphärischen Prozessen, die räumlich und zeitlich so kleinskalig sind, dass sie selbst bei fein auflösenden Modellgittern zwischen den Gitterpunkten liegen, wie beispielsweise Turbulenzen oder die Bildung und das Heranwachsen von Wolken- und Niederschlagspartikeln. Mit dem so genannten Parametrisierungsverfahren wird versucht, diese räumlich kleineren und schnelllebigeren Prozesse im Maßstab mit abzubilden, so dass diese extrem wetterrelevanten subskaligen Prozesse auch berücksichtigt werden können und eben nicht zwischen zwei Gitterpunkten verloren gehen. Um die Qualität der Wettervorhersage zu überprüfen, werden im Rahmen der Modellverifikation die Ergebnisse der Prognose mit dem tatsächlich eingetretenen Zustand der Atmosphäre mittels statistischer Maßzahlen routinemäßig verglichen. Zusätzlich kann durch eine Modelldiagnose, mit der die Simulationsqualität bezogen auf einen bestimmten Prozess bestimmt werden soll, das Modell ständig weiterentwickelt und verbessert werden (vgl. [www.dwd.de](http://www.dwd.de), 2005).

Für eine grundsätzliche Betrachtung des Prognosefehlers werden die im Rahmen des PreCon-Projekts relevanten Parameter Tagesmitteltemperatur und Globalstrahlung (ermittelt von meteosat<sup>1</sup>) herausgegriffen. Wie die folgende Abbildung 14 zeigt, schwankt der BIAS<sup>2</sup>, sprich der mittlere Prognosefehler der Temperatur, sowohl bei einem Prognosezeitraum von 24 Stunden als auch bei 120 Stunden um einen Wert von 0°C; der RMSE<sup>3</sup>, die Wurzel aus dem mittleren quadrierten Fehler, bewegt sich zwischen Werten von 1,4 bis 2,6°C.



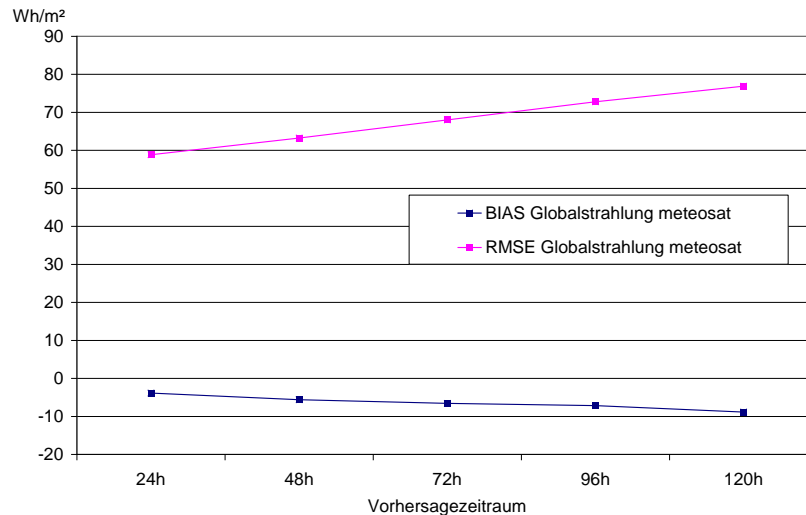
**Abbildung 14:** Mittlerer Fehler (BIAS) und Wurzel aus mittlerem quadriertem Fehler (RMSE) der Temperatur, gemittelt über 170 ausgewählte Stationen im Zeitraum Jan 2003-Jun 2005

Die Abbildung 15 veranschaulicht den BIAS der Globalstrahlung (meteosat). Dieser liegt zwischen einem Wert von -3,8 Wh/m<sup>2</sup> bei einem Vorhersagezeitraum von 24 Stunden, sinkt dann leicht aber kontinuierlich auf einen Wert von -8,8 Wh/m<sup>2</sup> bei einem Prognosezeitraum von 120 Stunden. Der RMSE reicht von 58,8 Wh/m<sup>2</sup> bis 79,8 Wh/m<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> meteosat (Meteorological satellite), geostationäre Wettersatelliten, die Wetterinformationen für die um den Nullmeridian liegenden Regionen der Erde liefern.

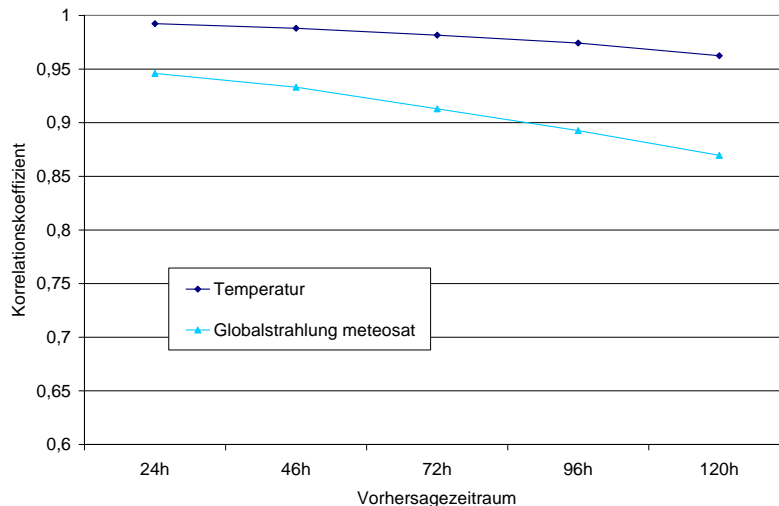
<sup>2</sup> Der BIAS wird aus der über einen Tag gemittelten Differenz zwischen Prognose- und Messwert berechnet und steht für allgemeine Aussagen über die Prognosequalität. Positive Werte des BIAS bedeuten, dass die berechnete Prognose höher liegt als der aktuelle Wert; ein negativer BIAS steht für eine Unterschätzung des Synop-Wertes.

<sup>3</sup> Der RMSE (root mean square error) ist die Wurzel aus dem quadrierten, mittleren Prognosefehler.



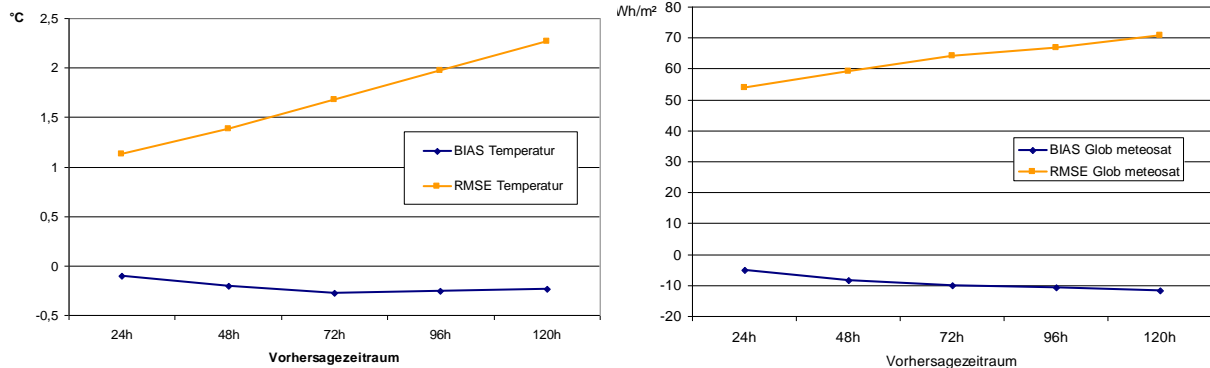
**Abbildung 15:** Mittlerer Fehler (BIAS) und Wurzel aus mittlerem quadriertem Fehler (RMSE) der Globalstrahlung (meteosat), gemittelt über 170 ausgewählte Stationen im Zeitraum Jan 2003- Jun 2005

Für eine Gegenüberstellung der Prognosequalität beider Parameter ist eine Darstellung der Korrelationskoeffizienten sinnvoll (Abbildung 16). Die Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten zeigt, dass die Prognose der Temperatur zu der Prognose der Globalstrahlung von höherer Qualität ist, jedoch ebenfalls mit zunehmendem Vorhersagezeitraum abnimmt.

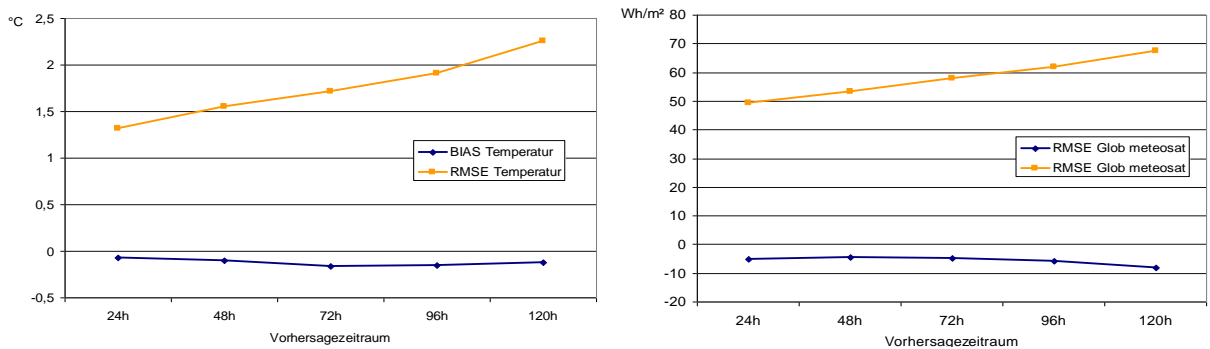


**Abbildung 16:** Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten der Parameter Temperatur und Globalstrahlung aller Stationen, Jan 2003-Jun 2005

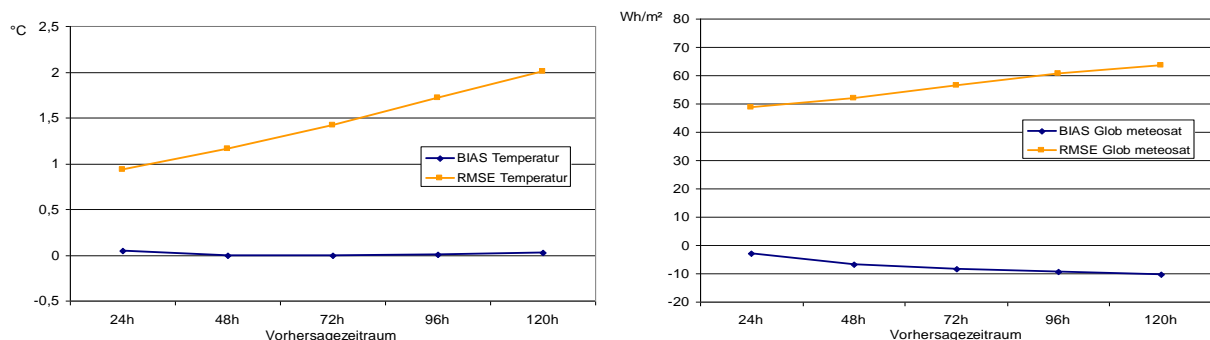
Da im Rahmen des PreCon-Projekts drei Gebäude an unterschiedlichen Standorten (Berlin, Hamburg, Mannheim) ausgewählt werden, beziehen sich die folgenden Betrachtungen (Abbildung 17 bis Abbildung 19) der Prognosefehler (BIAS und RMSE) der beiden Parameter speziell auf die Wetterdaten von Stationen in der näheren Umgebung dieser Standorte:



**Abbildung 17:** Mittlerer Fehler (BIAS) und Wurzel aus mittlerem quadrierten Fehler (RMSE) der Temperatur und der Globalstrahlung meteosat, Station 10384 Berlin-Tempelhof im Zeitraum Jan 2003-Jun 2005



**Abbildung 18:** Mittlerer Fehler (BIAS) und Wurzel aus mittlerem quadrierten Fehler (RMSE) der Temperatur und der Globalstrahlung meteosat, Station 10729 Mannheim im Zeitraum Jan 2003-Jun 2005



**Abbildung 19:** Mittlerer Fehler (BIAS) und Wurzel aus mittlerem quadrierten Fehler (RMSE) der Temperatur und der Globalstrahlung meteosat, Station 10145 Hamburg im Zeitraum Jan 2003-Jun 2005

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der RMSE bei allen drei ausgewählten Stationen sowohl beim Parameter Temperatur als auch bei der Globalstrahlung (meteosat) unter den Durchschnittswerten liegt (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 15). Die Prognosen für die gewählten drei Standorte sind demnach genauer als die in Abb. 14 und 15 diskutierten Durchschnittswerte aller Standorte. Der BIAS der Temperatur weicht demgegenüber nur geringfügig von den Durchschnittswerten ab.

### 4.3. Charakterisierung von Wettersituationen und deren Prognosequalität

Gemäß dem Ansatz des Predicted Control-Projekts werden neben der aktuellen Außentemperatur auch die prognostizierten Tagesmittelwerte der Temperatur sowie die prognostizierten Tagessummen der Globalstrahlung berücksichtigt. Demnach empfiehlt sich für die Charakterisierung von Wettersituationen, die eine besondere Auswirkung auf den Regelalgorithmus haben, eine Auswertung der Prognosequalität unter Beachtung der jeweiligen Großwetterlage vorzunehmen. Eine Großwetterlage kann definiert werden als „mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinander folgender Wetterlagen gleich bleiben, eben jene Züge, welche die Witterung in den einzelnen Teilgebieten des Großraums bedingen“ [12].

Die Prognosequalität der Parameter Lufttemperatur und Globalstrahlung durch meteosat von 170 Wetterstationen wird – aufgeteilt in vier verschiedene Naturräume Deutschlands – je Jahreszeit in Abhängigkeit vom jeweils vorherrschenden Großwettertypen untersucht. Die analog zur Wetterlagen-Klassifikation nach HESS und BREZOWSKY [15] definierten 29 Großwetterlagen werden aus Gründen der Vereinfachung für die statistischen Auswertungen zu zehn Großwettertypen zusammengefasst:

**Tabelle 1:** Übersicht über die Großwetterlagen Europas gemäß Hess und Brezowsky

Zirkulationsform	Großwettertyp (GWT)	Strömungsrichtung	Großwetterlage <sup>4</sup>	Wichtigste Luftmassen
<b>zonal</b>	Z	West	WA, WZ, WS, WW	maritim gemäßigten (Tropik) Luftmassen Polar- / Subpolarluft
<b>gemischt</b>	SW	Südwest	SEA, SWZ	maritim gemäßigte Tropikluft (sub-)tropische maritime Luft
	NW	Nordwest	NWA, NWZ	maritime Polarluft
	HM	Hoch Mitteleuropa	HM, BM	verschieden, übergehend in kontinentale Tropikluft
	TM	Tief Mitteleuropa	TM	verschieden
<b>meridional</b>	N	Nord	NA, NZ HNA, HNZ HB, TRM	maritime Polarluft (z.T. arktisch)
	NO	Nordost	NEA, NEZ	kontinentale Polarluft (z.T. arktisch)
	O	Ost	HFA, HFZ HNFA, HNFZ	kontinentale Polarluft (z.T. arktisch)
	SO	Südost	SEA, SEZ	kontinentale Tropikluft
	S	Süd	SA, SZ TB, TRW	(sub-)tropische maritime Luft kontinentale Tropikluft

<sup>4</sup> Siehe Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1 zeigt, welche Großwetterlagen (vgl. Abkürzungsverzeichnis) aufgrund ihrer charakteristischen Strömungsrichtung (zum Beispiel „West“ bei den vier Westlagen WA, WZ, WS und WW) und der dadurch nach Deutschland gebrachten typischen Luftmasse zu den einzelnen Großwettertypen zusammengefasst werden können. Die in Deutschland vorwiegend auftretenden Luftmassen und deren Eigenschaften können anhand Abbildung 20 verdeutlicht werden:

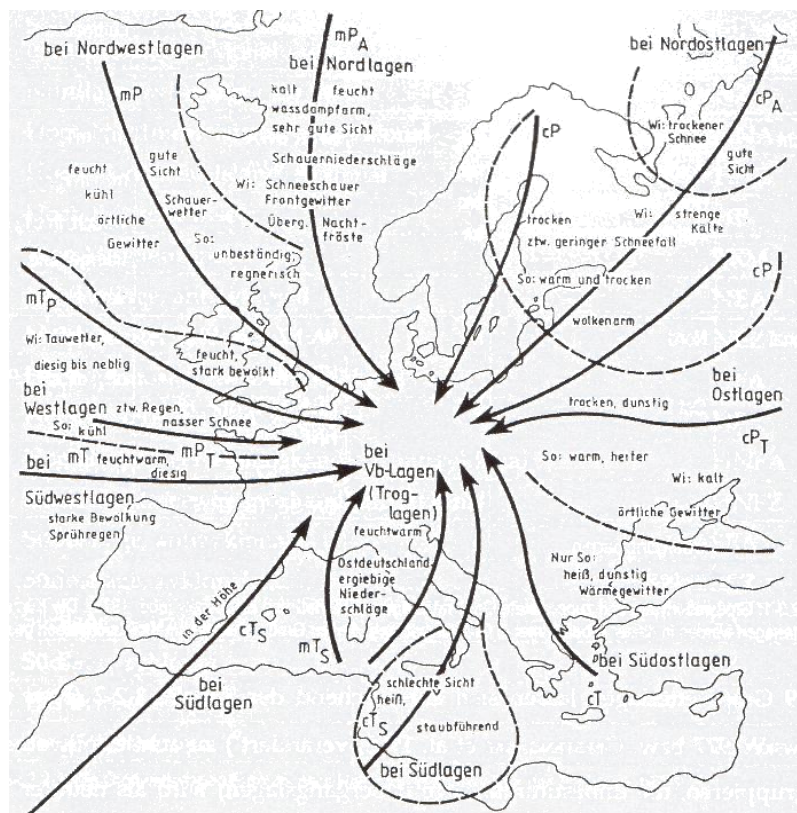
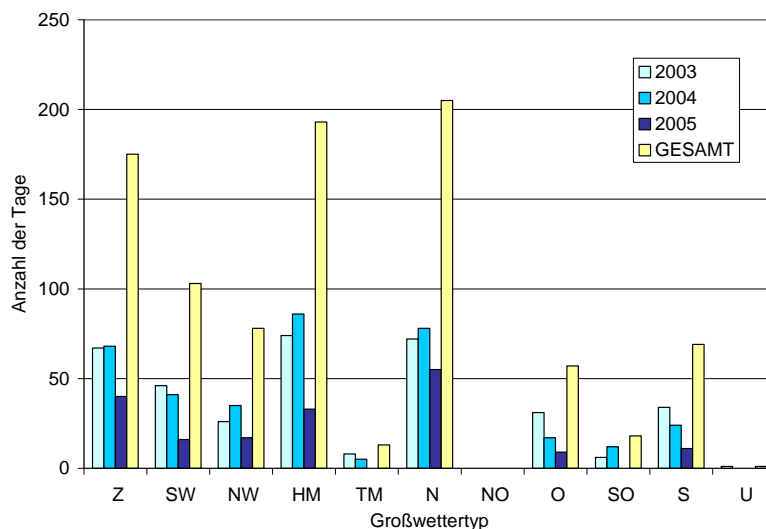


Abbildung 20: Die Luftmassen Europas und ihre Eigenschaften [14]

Wenn der Übergang von einer Großwetterlage in eine andere nicht schnell und eindeutig stattfindet, besteht die Möglichkeit von ein bis zwei Übergangstagen. Falls diese Tage aufgrund eines uneinheitlichen Druckbildes nicht der vorhergehenden oder der nachfolgenden Großwetterlage zugeordnet werden können, wird die neutrale Abkürzung „U“ für „unbestimmt“ verwendet, die jedoch in Tabelle 1 vernachlässigt werden kann.

Der untersuchte Zeitraum Januar 2003 bis Juni 2005 zeigt die folgende Häufigkeitsverteilung der Großwettertypen auf (Abbildung 21):



**Abbildung 21:** Häufigkeit der verschiedenen Großwettertypen im Untersuchungsraum Januar 2003-Juni 2005 (siehe Abkürzungsverzeichnis)

Die Aufgliederung des Untersuchungsraumes wird vorgenommen, um eventuell vorhandene, regionale Unterschiede innerhalb Deutschlands herausfiltern und gegebenenfalls die Differenzen anhand der geographischen Gegebenheiten interpretieren zu können. In Anlehnung an eine Aufgliederung Deutschlands nach unterschiedlichen Orographietypen [13], also Gebieten mit ähnlichen Erhebungen bzw. Oberflächenformen, wird der Untersuchungsraum in fünf Naturräume aufgeteilt:

#### Naturraum A:

- Norddeutsche Tiefebene, einschließlich Nordseeinseln, der Marschenküste und des norddeutschen Jung- und Altmoränengebietes
- sehr geringe mittlere Höhe bis maximal 85 m über NN mit Höhendifferenzen bis knapp über 100 m und keine oder nur sehr schwach ausgeprägte Hangneigungen

#### Naturraum B:

- Rheinisches Schiefergebirge, niedersächsisches und hessisches Bergland, der Harz sowie das Thüringer Becken und das Thüringisch-Sächsische Mittelgebirge
- hügelndartiger Charakter mit einer mittleren Höhe von 200 - 360 m über NN, maximale Höhendifferenz knapp über 300 m

#### Naturraum C:

- Süddeutsches bzw. Südwestdeutsches Stufenland, einschließlich des Saar-Nahe-Berglandes, des Oberrheinischen Tieflandes (Oberrheingraben), des Schwarzwaldes sowie des Oberpfälzisch-Bayrischen Waldes (Böhmerwald)
- Ein Teilbereich mit mittlerer Höhe zwischen 400 und 600 m über NN, maximaler Höhendifferenz von 250 m über NN, relativ geringer Reliefenergie trotz höheren Lagen
- Ein Teilbereich ähnlich wie Naturraum B mit hügelndartigem Charakter mit einer mittleren Höhe von 200-360 m über NN und maximaler Höhendifferenz knapp über 300 m

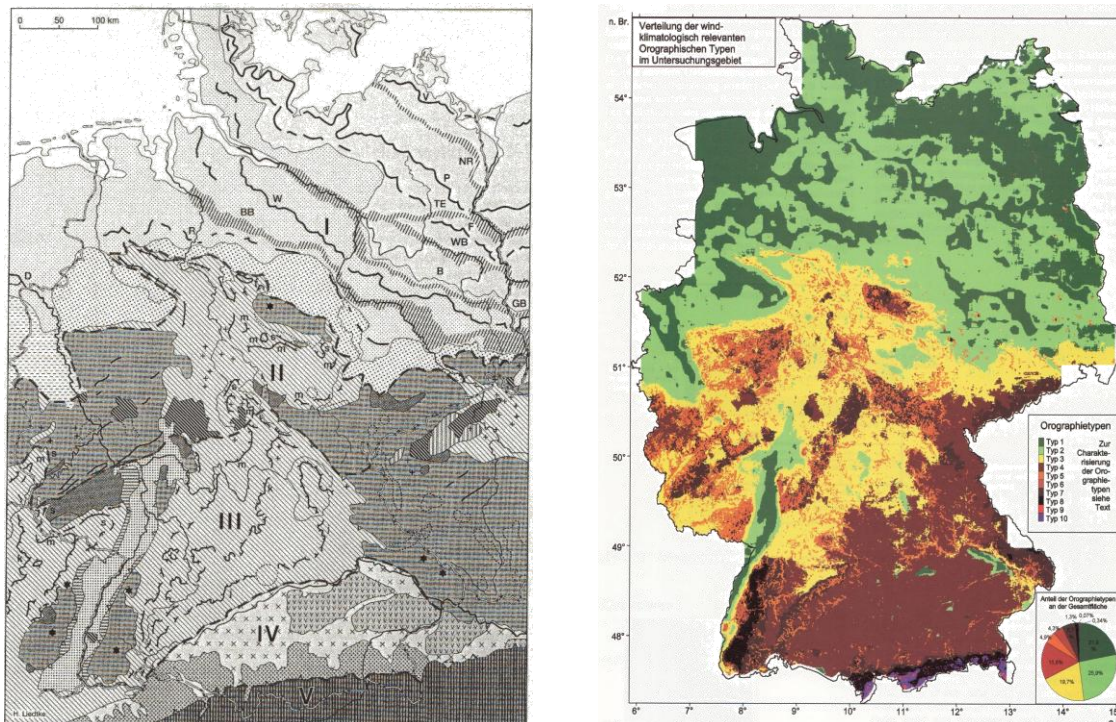
Naturraum D:

- Deutsches Alpenvorland
- mittlere Höhe zwischen 400 und 600 m über NN, maximale Höhendifferenz mit 250 m über NN, relativ geringe Reliefenergie trotz höheren Lagen

Naturraum E:

- Alpenraum
- maximale Höhendifferenzen in einer Größenordnung zwischen 630 m und ungefähr 1100 m, mittlere Höhe von 530 m bis 1047 m über NN

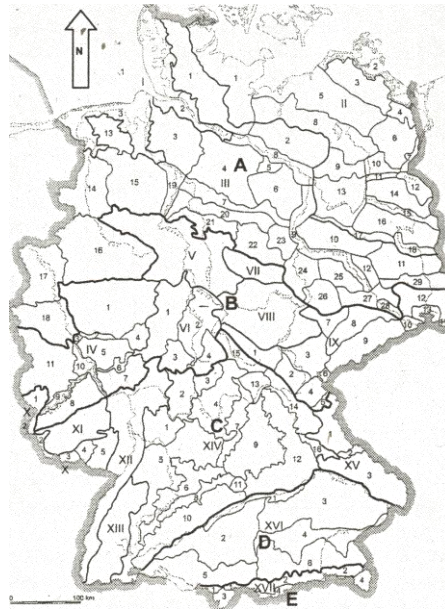
Diese Naturräume werden anhand verschiedener Orographietypen (gemäß BÜRGER [13]) im Vergleich mit Gebieten ähnlicher Oberflächenformen (gemäß naturräumlicher Gliederung nach LIEDTKE [17]) definiert; Abbildung 22 stellt diese gegenüber:



**Abbildung 22:** Verteilung der windklimatologisch relevanten Orographietypen in Deutschland und Gebiete ähnlicher Oberflächenformen in Deutschland [13] und [17]

Die Untergliederung des Untersuchungsraumes Deutschland kann durch eine Überlagerung der beiden Karten ungefähr wie folgt dargestellt werden:



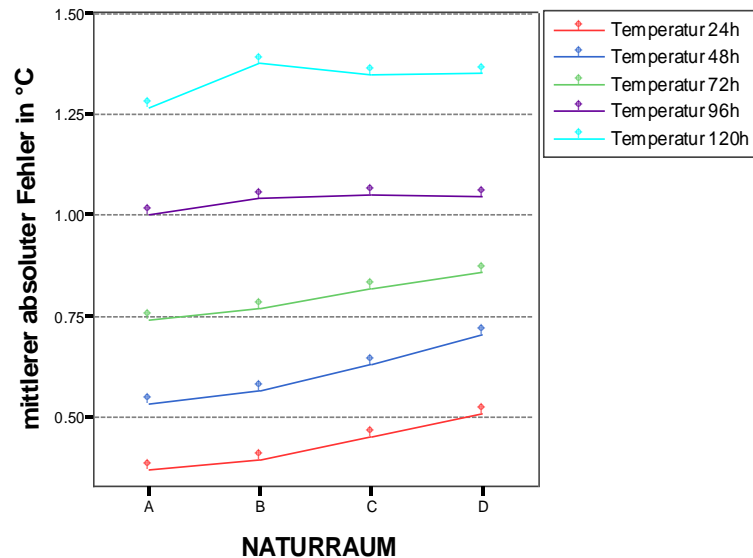


**Abbildung 23:** Einteilung des Untersuchungsraumes in 5 verschiedene Naturräume anhand deren orographischer Bedingungen

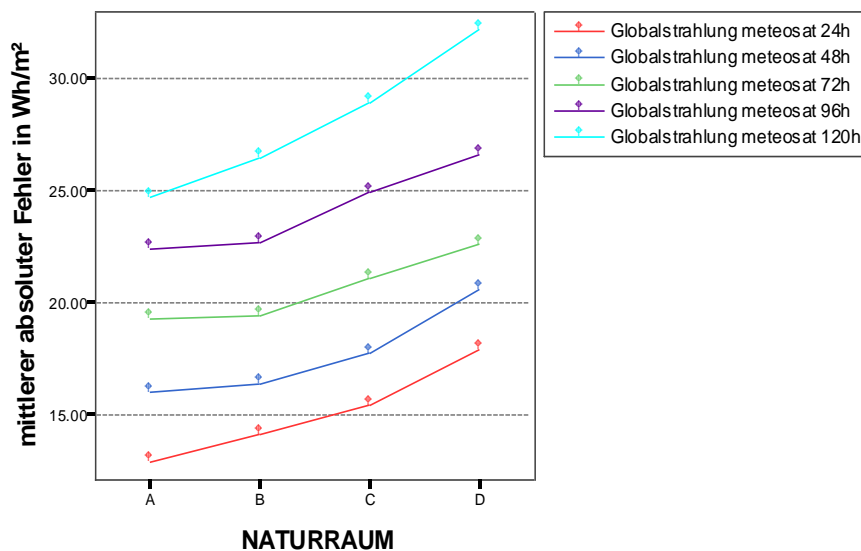
Aufgrund der extremen Orographie, die sich innerhalb nur weniger hundert Meter grundlegend ändern kann, der relativ geringen Messstationsdichte und der darauf zurückzuführenden Beeinträchtigung der Datenqualität werden die Alpen (Naturraum E) als Naturraum in den folgenden Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Bei einer Gesamtbetrachtung der untersuchten 170 Wetterstationen und deren Prognosefehler in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitraum zeigen sich regionale Unterschiede. Dass mit einem zunehmenden Vorhersagezeitraum die Größe des absoluten Prognosefehlers (sprich absoluter Wert des BIAS) anwächst, wird bereits unter 4.2 festgehalten. Auffallend bei dieser Betrachtungsweise sind jedoch die Qualitätsunterschiede zwischen den verschiedenen Naturräumen. So liefert der Naturraum A die jeweils besten Ergebnisse der Temperaturprognose mit einer stetigen Zunahme des Fehlers bis hin zum schlechtesten Wert im Naturraum D, siehe Abbildung 24.

Einen ähnlichen anwachsenden Verlauf des durchschnittlichen Fehlers vom Naturraum A zum Naturraum D, wie bei den in Abbildung 24 dargestellten Temperaturkurven lässt der Blick auf die Prognosefehler der Globalstrahlung (meteosat) je Naturraum erkennen (Abbildung 25). Betrachtet man jedoch die Differenzen zwischen A, B, C und D, so lässt sich eine stärkere unterschiedliche Entwicklung mit steigendem Vorhersagezeitraum erkennen: während im Naturraum A die Qualität von der 24 h- bis zur 120 h-Prognose in relativ gleichmäßigen Abständen abnimmt, werden die Distanzen beim Naturraum D mit fortschreitendem Vorhersagezeitraum immer größer.



**Abbildung 24:** mittlerer absoluter Prognosefehler der Temperatur, Mittelwerte je Naturraum und über den gesamten Untersuchungszeitraum



**Abbildung 25:** mittlerer absoluter Prognosefehler der Globalstrahlung (meteosat), Mittelwerte je Naturraum und über den gesamten Untersuchungszeitraum

Die Gründe für diese regionalen Unterschiede der Vorhersagequalität können zum einen in der differierenden Betriebszeit der Stationen in den einzelnen Naturräumen liegen. Denn je länger eine Messstation in Betrieb ist, desto besser ist erfahrungsgemäß die auf dem MOS basierende Berechnung der Prognose. Andererseits darf nicht außer Acht gelassen werden, dass auch die jeweilige Gesamtzahl der Stationen pro Naturraum erhebliche Unterschiede aufweist, was eine Interpretation der variierenden Prognosefehler natürlich erschwert. Auch die orographischen Gegebenheiten der einzelnen Naturräume haben einen Einfluss auf die



Qualität der Prognosen. Da es sich beim Naturraum A um das Norddeutsche Flachland mit kaum vorhandenen landschaftlichen Erhebungen handelt, spricht dies für eine höhere Qualität der Prognosen, insbesondere beim Parameter Temperatur, im Gegensatz zu den deutlich größeren Höhendifferenzen der Naturräume B und C.

Um nun die Prognosequalität eines Tages im Hinblick auf den vorherrschenden Großwettertyp zu untersuchen, hat sich ein clusteranalytisches Verfahren angeboten. Mit dieser statistischen Vorgehensweise, die auf der Bildung von möglichst homogenen Gruppen (Clustern) beruht, können Tage mit schlechten Temperatur- und/oder Globalstrahlungsprognosen herausgefiltert werden und anschließend geprüft werden, ob bestimmte Großwettertypen an jenen „schlechten“ Tagen häufiger oder sogar regelmäßig auftreten.

Aus statistischer Sicht ist es hierbei notwendig, die auszuwertende Datenmenge zu reduzieren, da sonst weder sinnvolle noch interpretierbare Ergebnisse zu erwarten sind. Aus diesem Grund werden die Prognosefehler sowohl über die vier genannten Naturräume gemittelt als auch nach Jahreszeiten aufgeteilt betrachtet. Die Einteilung der Monate in Jahreszeiten beruht dabei auf dem in Tabelle 2 dargestellten Schema:

**Tabelle 2 :** Einteilung der Monate in Jahreszeiten

Jahreszeit	Monate
Winter	Dezember, Januar, Februar
Frühling	März, April, Mai
Sommer	Juni, Juli, August
Herbst	September, Oktober, November

Nach der Bildung von möglichst homogenen Clustern sollen hiernach Ähnlichkeiten in der Verteilung der Großwettertypen innerhalb der gebildeten Cluster, also der zu einem Cluster zusammengefassten Tage mit bestimmten Prognosefehlern, gefunden werden. Zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl dienen das Dendrogramm und das Elbow-Kriterium als Werkzeuge (für weiterführende Literatur siehe [1]). Diese liegt in den meisten Fällen bei drei; das heißt, dass sich beispielsweise in Cluster 1 die Tage mit gut vorhergesagter Globalstrahlung und Temperatur befinden, sich im Cluster 2 nur die Tage mit guter Temperaturprognose sammeln und im Cluster 3 beide Prognosen schlecht sind. Die absoluten Häufigkeiten der verschiedenen Großwettertypen im Untersuchungsraum können nun - aufgesplittet nach Naturraum und Jahreszeit - mit der Anzahl der in jedem der drei Cluster vorkommenden Großwettertyp verglichen werden.

Wird in den folgenden Tabellen die Prognosequalität als „gut“ (bzw. „schlecht“) bezeichnet, so liegt der größte Teil der Tage eines Großwettertyps im „guten“ Cluster 1 (bzw. „schlechten“ Cluster 3); die Prognosequalität beider Parameter kann also als „gut“ (bzw. „schlecht“) bezeichnet werden, während die Anzahl der Tage mit schlechter (bzw. „guter“) Prognosequalität vernachlässigbar ist. An Tagen, die sich im Cluster 2 befinden, muss die Prognosequalität getrennt nach Parameter betrachtet werden. Sofern keine eindeutige Einstufung als schlecht bzw. gut möglich ist, wird versucht, die Prognosequalität zumindest tendenziell zu klassifizieren. Als „ausgeglichen“ werden Großwettertypen und deren typische Prognosequalität bezeichnet, wenn die Verteilung der Tage über die definierten Cluster so ausgeglichen ist, dass keine eindeutige Aussage möglich ist.

Die Ergebnisse des clusteranalytischen Verfahrens sind in den Tabelle 3 bis Tabelle 11 zusammengestellt:

**Tabelle 3:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps HM

HM	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A	tendenziell schlecht	gut	gut	tendenziell schlecht	relativ gut	gut	gut	tendenziell schlecht
	tendenziell schlecht	gut	tendenziell schlecht	gut	ausgeglichen		gut	tendenziell schlecht
C	gut	gut	gut	gut	schlecht	gut	gut	gut
	tendenziell schlecht	gut	gut	gut	gut	relativ gut	gut	gut

**Tabelle 4:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps N

N	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A	tendenziell schlecht	gut	gut	tendenziell schlecht	gut	gut	gut	gut
	ausgeglichen, tendenziell gut		tendenziell schlecht	gut	gut	gut	tendenziell schlecht	gut
C	gut	gut	gut	gut	relativ gut	relativ gut	gut	gut
	ausgeglichen		gut	gut	gut	gut	gut	gut

**Tabelle 5:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps NW

NW	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A	tendenziell schlecht	gut	gut	tendenziell schlecht	gut	relativ gut	gut	gut
	ausgeglichen, tendenziell gut		tendenziell schlecht	gut	ausgeglichen		tendenziell schlecht	gut
C	gut	gut	gut	gut	tendenziell schlecht	gut	tendenziell schlecht	gut
	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut

**Tabelle 6:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps O

O	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A	gut	schlecht	gut	tendenziell schlecht	gut	relativ gut	gut	gut
	gut	schlecht	gut	tendenziell schlecht	ausgeglichen		schlecht	gut
C	gut	schlecht	gut	tendenziell schlecht	tendenziell schlecht	gut	tendenziell schlecht	gut
	gut	schlecht	gut	tendenziell schlecht	gut	gut	tendenziell schlecht	gut

**Tabelle 7:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps S

S	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A	gut	schlecht	gut	gut	gut	tendenziell schlecht	relativ gut	relativ gut
	ausgeglichen		gut	gut	gut	tendenziell schlecht	ausgeglichen	
C	ausgeglichen		gut	tendenziell schlecht	gut	gut	ausgeglichen	
	ausgeglichen		gut	tendenziell schlecht	gut	gut	ausgeglichen	

**Tabelle 8:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps SO

SO Naturraum	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A	ausgeglichen		ausgeglichen		gut	tendenziell schlecht	gut	gut
B	ausgeglichen		ausgeglichen		gut	tendenziell schlecht	gut	schlecht
C	gut	schlecht	gut	gut	gut	gut	tendenziell schlecht	gut
D	gut	tendenziell schlecht	gut	gut	gut	gut	tendenziell schlecht	gut

**Tabelle 9:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps SW

SW Naturraum	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A			gut	tendenziell schlecht	ausgeglichen		gut	gut
B			tendenziell schlecht	gut	ausgeglichen		ausgeglichen	
C			ausgeglichen		ausgeglichen		ausgeglichen	
D			gut	gut	gut	tendenziell schlecht	gut	tendenziell schlecht

**Tabelle 10:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps TM

TM Naturraum	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A			tendenziell schlecht	gut	gut	tendenziell schlecht		
B			gut	gut	ausgeglichen			
C			gut	gut	relativ gut			
D			gut	gut	relativ gut			

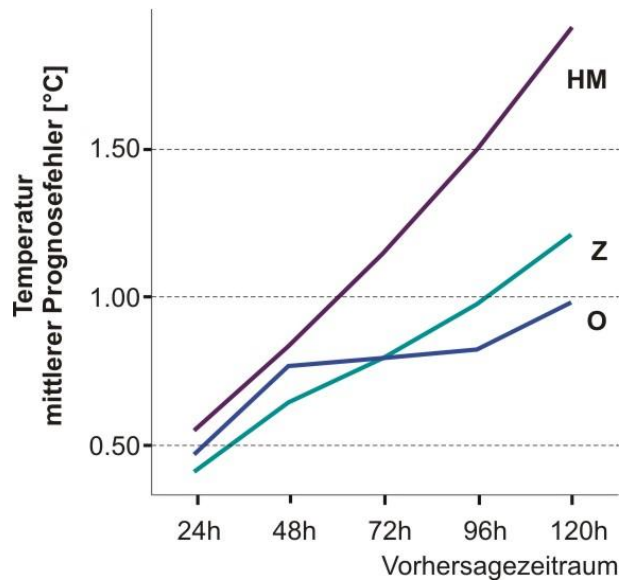
**Tabelle 11:** Beurteilung der Prognosequalität an Tagen des Großwettertyps Z

Z Naturraum	Winter		Frühling		Sommer		Herbst	
	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung	Temperatur	Globalstrahlung
A	leichte Tendenz zu schlecht	gut	gut	tendenziell schlecht	gut	gut	gut	gut
B	gut	gut	tendenziell schlecht	gut	gut	tendenziell schlecht	ausgeglichen	
C	gut	gut	relativ gut		tendenziell schlecht	gut	gut	gut
D	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Prognosequalität an Tagen unterschiedlicher Großwettertypen in Abhängigkeit von Jahreszeit und Naturraum stark variieren kann.

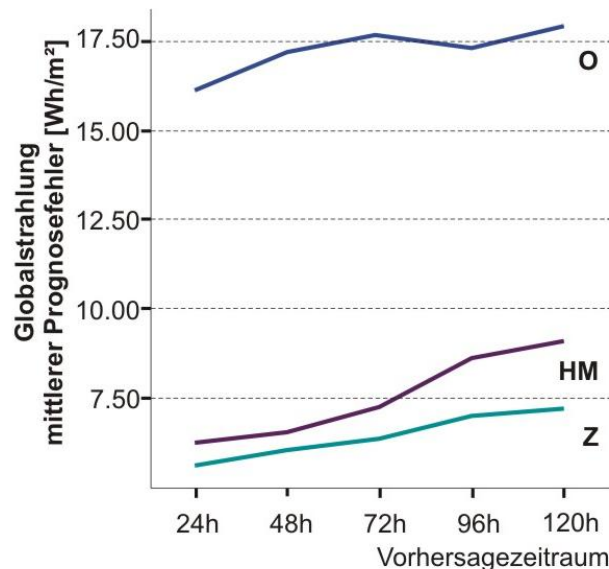
Tabelle 3 bis Tabelle 11 geben einen Überblick über die durch die Clusteranalyse gewonnenen Erkenntnisse – angeordnet nach den jeweiligen Großwettertypen – und zeigen eine Einschätzung der Prognosequalität je Jahreszeit und Naturraum. Zu beachten ist, dass in die Auswertung der Prognosequalität die jeweilige absolute Häufigkeit der einzelnen Großwettertypen nicht mit eingeflossen ist.

Auch wenn für diese Art der Untersuchung eine längere Zeitreihe von großem Nutzen wäre, so können doch einige Zusammenhänge zwischen Großwettertyp und Prognosequalität herausgestellt werden. Entsprechend der Ergebnisse der Clusteranalyse besteht in den Wintermonaten beim Großwettertyp Hoch Mitteleuropa (HM) eine Tendenz zur Fehleinschätzung der Temperatur, was im Vergleich zu den Großwettertypen Ost (O) und Z (Westlagen) eindeutig zu erkennen ist, siehe Abbildung 26.



**Abbildung 26:** mittlerer Temperatur-Prognosefehler aller Naturräume im Winter nach Großwettertyp

Abbildung 27 veranschaulicht die schlechte Globalstrahlungsprognose an Tagen des Großwettertyps Ost (O) im Vergleich zu den Großwettertypen HM und Z, die eine sehr hohe Vorhersagequalität aufweisen.



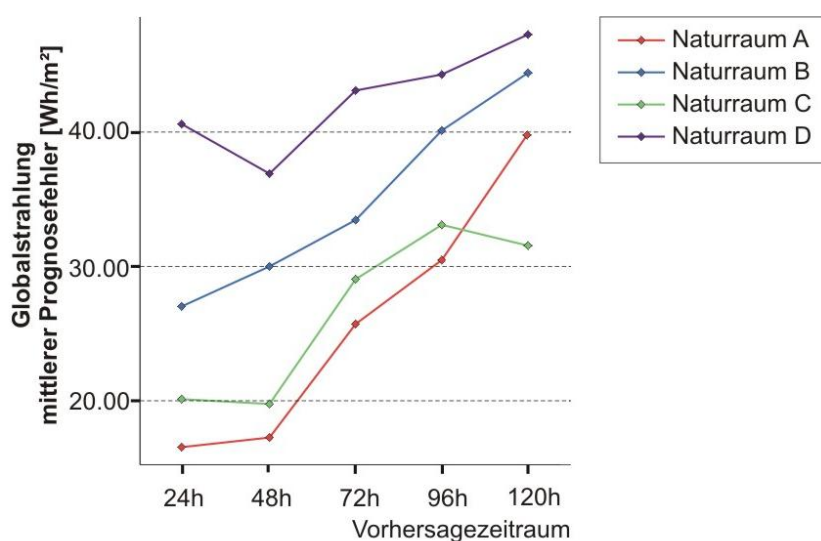
**Abbildung 27:** mittlerer Globalstrahlungs-Prognosefehler aller Naturräume im Winter nach Großwettertyp

Im Gegensatz zu den Wintermonaten, in denen die Naturräume relativ ähnliche Strukturen aufweisen, sind im Frühling regionale Unterschiede bezüglich der Prognosequalität festzustellen. Während an Tagen der Großwettertypen Hoch Mitteleuropa (HM), Nord (N) und Südwest (SW) die Prognosequalität zu schlechten Globalstrahlungsvorhersagen im Naturraum A neigt,

geht die Tendenz im Naturraum B genau bei denselben Großwettertypen in Richtung Fehlprognosen der Temperatur, was vermutlich auf die unterschiedliche Vorhersagequalität der Naturräume zurückzuführen ist. Einen für das gesamte Untersuchungsgebiet geltenden Rückschluss auf den jeweiligen Großwettertyp zu ziehen, wäre in diesem Fall nicht sehr sinnvoll. In den Naturräumen C und D fallen zwar die Tage dieser drei genannten Großwettertypen häufig in den „guten“ Cluster, so dass diese Großwettertypen mit einer guten Vorhersagbarkeit in Verbindung gebracht werden könnten, doch darf hierbei der absolute Wert der mittleren Fehler nicht außer Acht gelassen werden, der im Allgemeinen höher liegt als in den Naturräumen A und B. Dieser regionale Unterschied ist auch bei den Westlagen (Z) zu erkennen. Die Tage des Großwettertyps Süd (S) weisen zwar auch regionale Unterschiede auf, jedoch variieren hier nicht hauptsächlich Naturraum A und B, sondern tendieren die Naturräume C und D – im Gegensatz zu der sonst guten Prognosequalität bei diesem Typus – zur schlechten Globalstrahlungsprognose.

Beim Großwettertyp Tief Mitteleuropa (TM) scheint eine verhältnismäßig gute Vorhersagbarkeit vorzuliegen, obgleich hier das relativ seltene Auftreten mit zu berücksichtigen ist. Die geringe Anzahl an Tagen, aber auch die relativ ausgeglichene Gruppierung der Südost-Tage in den Naturräumen A und B lassen keine Beurteilung zu. Die Verteilung der Tage je Cluster in den Naturräumen C und D lassen jedoch auf eine verhältnismäßig gute Prognosequalität schließen.

Betrachtet man nun die gruppierten Tage des Großwettertypen Ost (O) in Abbildung 28, so zeichnet sich in allen vier Naturräumen eine Tendenz zur schlechten Globalstrahlungsprognose ab. In Abbildung 28 sind die durchschnittlichen Prognosefehler der Globalstrahlung an allen Tagen mit vorherrschender Ostlage aufgetragen. Neben den erwähnten Unterschieden des Qualitätsniveaus ist ersichtlich, dass der Fehler im Allgemeinen verhältnismäßig hoch liegt.



**Abbildung 28:** mittlerer Globalstrahlungs-Prognosefehler im Frühling an Tagen des Großwettertyps Ost



Beim Blick auf die Sommermonate ist auffallend, dass die Mittelwerte innerhalb eines Clusters in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitraum sehr stark variieren. Ab einem Vorhersagezeitraum von 96 Stunden steigt der mittlere Fehler meist enorm an, wobei diese Beobachtung sowohl bei dem Prognosefehler der Temperatur als auch bei der Globalstrahlung festzustellen ist.

Im Sommer des Naturraumes A ist dieser Effekt ansatzweise beim Verhalten der Temperaturprognose im Cluster 1 zu erkennen, während im Naturraum B und C dieser Effekt häufiger auftritt.

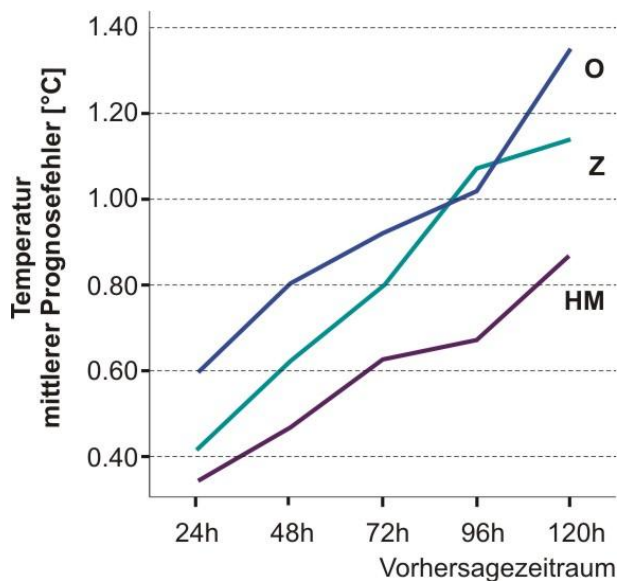
Während bei den beiden Großwettertypen Nord (N), Ost (O) und den Westlagen in allen vier Naturräumen eine relativ gute Vorhersagbarkeit vorzufinden ist, zeichnet sich bei den Großwettertypen Hoch Mitteleuropa (HM) sowie Nordwest (NW) trotz relativ ausgeglichener Gruppierung eine Tendenz zur verhältnismäßig schlechten Temperaturprognose ab, jedoch meist nur ab einem Vorhersagezeitraum von 72 Stunden. Beim Naturraum D ist bei allen Großwettertypen der Hauptanteil der Tage in den „guten“ Cluster gruppiert, wobei dieser zusätzlich unter dem Aspekt betrachtet werden muss, dass die Stationsanzahl sowie die tatsächliche Höhe der Fehlerwerte geringer ausfällt. Die Prognosequalität beim Großwettertyp Süd (S) zeigt sich im Allgemeinen als relativ gut, doch neigen die Globalstrahlungsvorhersagen in den Naturräumen A und B zu schlechten Ergebnissen.

Eine Aussage für den Großwettertypen Südwest (SW) und (TM) gestaltet sich als schwierig, da die Tendenzen je Naturraum in unterschiedliche Richtungen weisen bzw. die Tage der jeweiligen Großwettertypen zu gleichmäßig auf die drei Cluster verteilt sind.

Im Vergleich zum Frühling sind die Unterschiede im Herbst zwischen den verschiedenen Naturräumen relativ verhalten. So kann beispielsweise für West- wie auch für Nordlagen in drei von den vier Naturräumen eine allgemein gute Vorhersagbarkeit festgehalten werden, während sich beim Großwettertyp HM eine Tendenz zur schlechten Globalstrahlungsprognose abzeichnet, vor allem in den Naturräumen A und B.

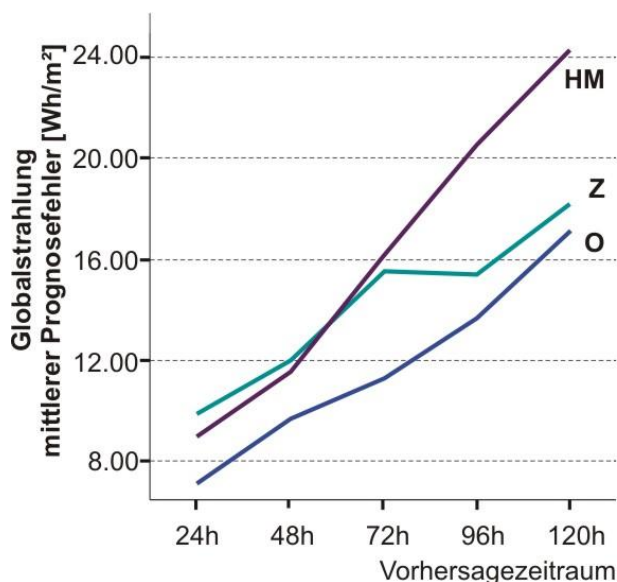
Die Prognosequalität beim Großwettertypen Nordwest (NW) ist allgemein als gut einzustufen. Festzuhalten ist jedoch eine leichte Tendenz zu schlechten Ergebnissen bei der Temperaturprognose in den Naturräumen B und C. Umgekehrte Verhältnisse zeigt die Clusterverteilung beim Großwettertyp Südwest (SW) mit sehr ausgeglichener Gruppierung in den Naturräumen B und C, jedoch einer relativ guten Prognosequalität in Regionen von A und D. Die Tage mit Ostlage weisen eine verhältnismäßig schlechte Temperaturprognose auf, was Abbildung 29 und Abbildung 30 verdeutlichen.





**Abbildung 29:** mittlerer Temperatur-Prognosefehler aller Naturräume im Herbst nach Großwettertyp

Bei den Temperaturprognosen liegt der mittlere Fehler an Tagen des Großwettertyps Ost über den Werten der Westlagen mit einer relativ guten Vorhersagbarkeit, bei den Globalstrahlungsprognosen hingegen darunter. Die Tage des Großwettertyps HM verhalten sich genau entgegengesetzt.



**Abbildung 30:** mittlerer Globalstrahlungs-Prognosefehler aller Naturräume im Herbst nach Großwettertyp

Für die Tage, an denen die Großwettertypen Süd (S) oder Südost (SO) vorherrschen, ist die Verteilung der Tage auf die Cluster zu ausgleichend, um eine Tendenz festhalten zu können.



## 5. PRECON - FREIE KÜHLUNG

Eine wetterprognosegeführte Regelung der thermisch aktivierten Bauteile ist dann besonders effektiv, wenn auf Nächte mit tiefen Temperaturen Tage mit hohen Außenlufttemperaturen folgen. Die Geschossdecken können dann energiesparend im "free-cooling" Modus (freier Kühlobetrieb (FK), Kühlung über Kühlturm) thermisch entladen werden.

Innerhalb einer Studie soll anhand des Standortes Berlin für das Jahr 2003 beispielhaft ermittelt werden, welcher Großwettertyp besonders gut geeignet ist, um eine freie Kühlung im Rahmen von PreCon umzusetzen. Es soll ermittelt werden in welchen vorherrschenden Großwettertypen in Berlin an den meisten Tagen die meisten Stunden die Voraussetzung einer FK erfüllen.

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Tagessumme der freien Kühlung mit PreCon [h/d] und den vorherrschenden Großwettertypen (GWT) in 2003 aufgelistet.

Im oberen Bereich von Tabelle 12 werden die absoluten Werte als Summe der Tage in einem bestimmten Großwettertyp mit einer bestimmten Anzahl an Stunden an denen eine freie Kühlung umgesetzt werden könnte aufgeführt.

Im unteren Teil der Tabelle wird eine prozentuale Aufteilung nach Großwettertypen und bezüglich der Gesamtanzahl der in 2003 aufgetretenen Großwettertypen dargestellt.

Generell zeigt sich durch die Studie, dass an knapp der Hälfte der Tage im Jahr 2003 am Standort Berlin eine freie Kühlung über einen Kühlturm umgesetzt werden könnte.

Für eine freie Kühlung mit PreCon sind die GWT Z, SW, NW, HM und N am besten geeignet. Der GWT NW, z.B., kommt aber nur zu einem 10tel im Jahr vor, die FK kann hier jedoch zu über der Hälfte der Tage umgesetzt werden. Weniger hilfreich für die Umsetzung einer freien Kühlung zeigen sich die GWT TM, O, SO, S und U.

Die Beispielstudie für Berlin zeigt, dass es in Verbindung mit einer wetterprognosegeführten Regelung sinnvoll und energieeffizient sein kann eine freie Kühlung über einen Kühlturm zusätzlich zu anderen Kälteerzeugern umzusetzen. Im Vorfeld der Umsetzung des Kühlkonzeptes sollte jedoch je Standort untersucht werden, welche GWT hauptsächlich vorliegen und ob diese geeignet sind.



**Tabelle 12:** Verteilung der möglichen Umsetzung einer freien Kühlung mit PreCon am Standort Berlin 2003; Anzahl Tage (oben) und Prozentuale Verteilung je GWT (unten)

Tagssumme freie Kühlung mit Precon [Betriebsstunden pro Tag [h/d]]	Anzahl Tage des Jahres 2003 mit Stunden freier Kühlung aufgeteilt nach GWT [d]										
	Z	SW	NW	HM	TM	N	NO	O	SO	S	U
0	45	21	12	40	3	49		26		27	
1						1					
2					1	1		1			
3			1	1							
4	1		1								
5				1							
6	6	6	4	9	1	6		1	4	1	1
7				1		1					
8	1	1				1					
9	1							1			
10											
11			1								
12	13	18	7	22	3	13		2	2	6	
<b>Gesamt-anzahl Stunden FK</b>	213	260	126	333	44	210	0	41	48	78	6
<b>Summe Tage in 2003</b>	67	46	26	74	8	72	0	31	6	34	1
<b>Summe Tage mit FK</b>	22	25	14	34	5	23	0	5	6	7	1
<b>Gesamtsumme 2003</b>	365										
<b>Gesamtsumme FK</b>	142										

Tagssumme freie Kühlung mit Precon [Betriebsstunden pro Tag [h/d]]	Prozentualer Anteil freier Kühlung je GWT [%]										
	Z	SW	NW	HM	TM	N	NO	O	SO	S	U
<b>proz. Anteil GWT an Jahr</b>	18,4	12,6	7,1	20,3	2,2	19,7	0,0	8,5	1,6	9,3	0,3
<b>Anteil FK an Jahr</b>	15,5	17,6	9,9	23,9	3,5	16,2	0,0	3,5	4,2	4,9	0,7
0	67,2	45,7	46,2	54,1	37,5	68,1		83,9	0,0	79,4	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4		0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	1,4		3,2	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	3,8	1,4	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0
4	1,5	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0
6	9,0	13,0	15,4	12,2	12,5	8,3		3,2	66,7	2,9	100,0
7	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	1,4		0,0	0,0	0,0	0,0
8	1,5	2,2	0,0	0,0	0,0	1,4		0,0	0,0	0,0	0,0
9	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		3,2	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0
12	19,4	39,1	26,9	29,7	37,5	18,1		6,5	33,3	17,6	0,0
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		100,0	100,0	100,0	100,0



## 6. SIMULATION - WETTERPROGNOSEGEFÜHRTE REGELUNG FÜR BETONKERNAKTIVIERUNGEN

Im Rahmen einer Simulationsstudie werden Möglichkeiten und Potentiale von wetterprognosegeführten Strategien zur Steuerung und Regelung von wasserbasierten Systemen zur Temperierung von Betondecken zu Heiz- und Kühlzwecken untersucht. In diesem Zusammenhang werden für drei deutsche Standorte mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen jeweils zwei Regelalgorithmen mit integrierten Funktionen zur Berücksichtigung von täglichen Wettervorhersagen mit einer etablierten und am Markt verbreiteten Regelstrategie verglichen. Als Ergebnis wird der resultierende Energiebedarf für die Beheizung bzw. Kühlung eines Büroraumes mit südlicher sowie des gleichen Büroraumes mit nördlicher Orientierung in Abhängigkeit der Regelalgorithmen gegenübergestellt. Neben den Energiebedarfswerten wird als weiteres Bewertungskriterium der Komfort in den Büroräumen an den unterschiedlichen Standort und bei Verwendung der unterschiedlichen Regelstrategien bewertet. Eine Minderung des Komforts wird dabei anhand der Zeiträume definiert, in denen die empfundene Raumtemperatur außerhalb eines definierten Sollbereiches liegt, indem sie diesen unterschreitet bzw. übersteigt. Die Abweichungen werden entsprechend der Größe ihres Betrages in Temperaturbereiche unterteilt und z. B. als "Überhitzungsstunden" dokumentiert.

Zur grundsätzlichen Einschätzung der vorliegenden Verfahren Wetterprognosen in Regelstrategien zur Temperierung von Betondecken zu implementieren sowie zur Bewertung der Möglichkeiten die im Rahmen der Verfahren für Referenzbedingungen ermittelten Gebäudeparameter für beliebige Standorte zu verwenden, werden zunächst allgemeine Untersuchungen an Referenzwetterdaten und Wetterdaten aus Messungen für unterschiedliche Standorte durchgeführt. Als Referenzwetterdatensatz wird das vom Deutschen Wetterdienst im Jahr 2004 herausgegebene Testreferenzjahres TRY 04 "Nordostdeutsches Tiefland" mit dem Repräsentanzstandort Potsdam verwendet. Für die Jahre 2003 und 2004 werden die täglichen Wettervorhersagen für die Orte Berlin, Hamburg und Mannheim mit dem tatsächlich an den Standorten gemessenen Wetter verglichen und den Daten des Testreferenzjahres TRY 04 gegenübergestellt.

### 6.1. Vergleich von Referenzwetterdaten, Wetterprognosen und standortsspezifischen Messwerten

Referenzwetterdaten, Wetterprognosen und standortsspezifische Messwerte bilden eine wesentliche Grundlage der hier untersuchten, wetterprognosegeführten Regelungen zur Beheizung bzw. Kühlung von Bürogebäuden.

Zur Bewertung der Regelstrategien sind die Abweichungen der standortsspezifischen Wetterdaten von den zur Bestimmung der Gebäudekennwerte herangezogenen Wetterdaten – hier Testreferenzjahr TRY0 04, Potsdam – zu berücksichtigen. Für die möglichst allgemeine Anwendbarkeit einer wetterprognosegeführten Regelung nach den vorliegenden Regelstrategien wäre eine größtmöglich zulässige Bandbreite möglicher Abweichungen von Wetterdaten an den Gebäudestandorten gegenüber den zur Bestimmung der Gebäudekennwerte herangezogenen Wetterdaten wünschenswert. Aus diesem Grund wird im Folgenden zunächst das Testreferenzjahr TRY 04 (Potsdam) mit den gemessenen Wetterdaten an den Standorten Berlin, Hamburg und Mannheim aus den Jahren 2003 und 2004 verglichen und ausgewertet. Um den Einfluss von Prognosefehlern im Rahmen der Wettervorhersagen auf die Güte der Regelung mit den untersuchenden Regelstrategien zu bestimmen und bewerten zu können, werden

zudem die Prognosen für die jeweiligen Standorte den zugehörigen gemessenen Wetterdaten gegenübergestellt.

Der Vergleich des Testreferenzjahres TRY 04 mit Messwerten sowie Prognosen und Messwerten erfolgt auf der Basis von Tageswerten der mittleren Außenlufttemperaturen sowie den täglichen Globalstrahlungssummen. Dazu werden die Differenzen der Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur sowie der täglichen Summen der Globalstrahlung für jedes Kalenderjahr aufsummiert.

Für die Betrachtung der Abweichung des Testreferenzjahrs von den Messwerten gilt:

$$\text{Abweichung TRY von gemessener Außenlufttemperatur } [-] = \sum_i^{365} |\theta_{\text{gem},i} - \theta_{\text{TRY},i}| [\text{K}]$$

$$\text{Abweichung TRY von gemessener Globalstrahlungssumme } e [-] = \sum_i^{365} |E_{\text{gem},i} - E_{\text{TRY},i}| [\text{kWh}]$$

Für die Abweichung der Prognosen von den Messwerten gilt analog:

$$\text{Abweichung Prognose von gemessener Außenlufttemperatur } [-] = \sum_i^{365} |\theta_{\text{gem},i} - \theta_{\text{prog},i}| [\text{K}]$$

$$\text{Abweichung Prognose von gemessener Globalstrahlungssumme } e [-] = \sum_i^{365} |E_{\text{gem},i} - E_{\text{prog},i}| [\text{kWh}]$$

mit:

$\theta_{\text{gem},i}$	gemessene, mittlere Außenlufttemperatur des Tages $i$ [°C]
$\theta_{\text{TRY},i}$	mittlere Außenlufttemperatur des Tages $i$ entsprechend TRY 04 [°C]
$\theta_{\text{prog},i}$	für den Tag $i$ prognostizierte, mittlere Außenlufttemperatur [°C]
$E_{\text{gem},i}$	gemessene Globalstrahlungssumme des Tages $i$ [kWh/d]
$E_{\text{TRY},i}$	Globalstrahlungssumme des Tages $i$ entsprechend TRY 04 [kWh/d]
$E_{\text{prog},i}$	für den Tag $i$ prognostizierte Globalstrahlungssumme [kWh/d]

Die oben beschriebenen Jahressummen der täglichen Abweichungen dividiert durch die Anzahl der Tage pro Jahr ergeben die über das betreffende Jahr gemittelte Abweichung der Außenlufttemperatur bzw. der Globalstrahlungssumme gegenüber den Werten des Testreferenzjahres TRY 04 und den zugehörigen Prognosen.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der Tabelle 13 und Tabelle 14 zusammengefasst. Eine graphische Gegenüberstellung der Tageswerte der mittleren Lufttemperatur und der täglichen Globalstrahlungssumme für das Testreferenzjahr 04 sowie die Prognosen und die zugehörigen Messwerte für die Standorte Berlin, Hamburg und Mannheim für die Jahre 2003 und 2004 sind in der Abbildung 31 bis Abbildung 42 enthalten.

Neben den Messwerten und Abweichungen der Prognosen enthält Tabelle 15 die Heiz- und Kühlgradstunden der Raumluftechnischen Anlagen (RLT) bei einer Konditionierung der Zuluft auf die Raum-Solltemperatur von 23 °C.

**Tabelle 13:** Gegenüberstellung Testreferenzjahr TRY 04 (Potsdam) mit realen Wetterdaten der Jahre 2003 und 2004 an den Standorten Berlin, Hamburg und Mannheim

Abweichung TRY 04 Potsdam zu Standorten		Abweichung TRY04 von Messung					
		Jahresmittel Lufttemperatur	Jahressumme Globalstrahlung	Jahressumme Abweichungen Tagesmittel Lufttemperatur	Mittlere tägliche Abweichung Tagesmittel Lufttemperatur	Jahressumme Abweichungen Tagesumme Globalstrahlung	Mittlere tägliche Abweichung Tagesumme Globalstrahlung
			$\Sigma E_{gem,i}$	$\Sigma   \theta_{gem,r} - \theta_{TRY,i}  $	$\Sigma   \theta_{gem,r} - \theta_{TRY,i}   / 365d$	$\Sigma   E_{gem,r} - E_{TRY,i}  $	$\Sigma   E_{gem,r} - E_{TRY,i}   / 365 d$
		°C	kWh/a	$\Sigma(K/d)$	K	$\Sigma(kWh/d)$	kWh
<b>TRY 04 Potsdam</b>		8,81	994				
<b>Berlin</b>	2003	10,19	1143	1514	4,1	475	1,301
	2004	9,88	1014	1400	3,8	448	1,227
<b>Hamburg</b>	2003	10,06	1118	1438	3,9	466	1,277
	2004	9,52	995	1306	3,6	430	1,178
<b>Mannheim</b>	2003	13,37	1284	2051	5,6	552	1,512
	2004	11,77	1135	1615	4,4	501	1,373

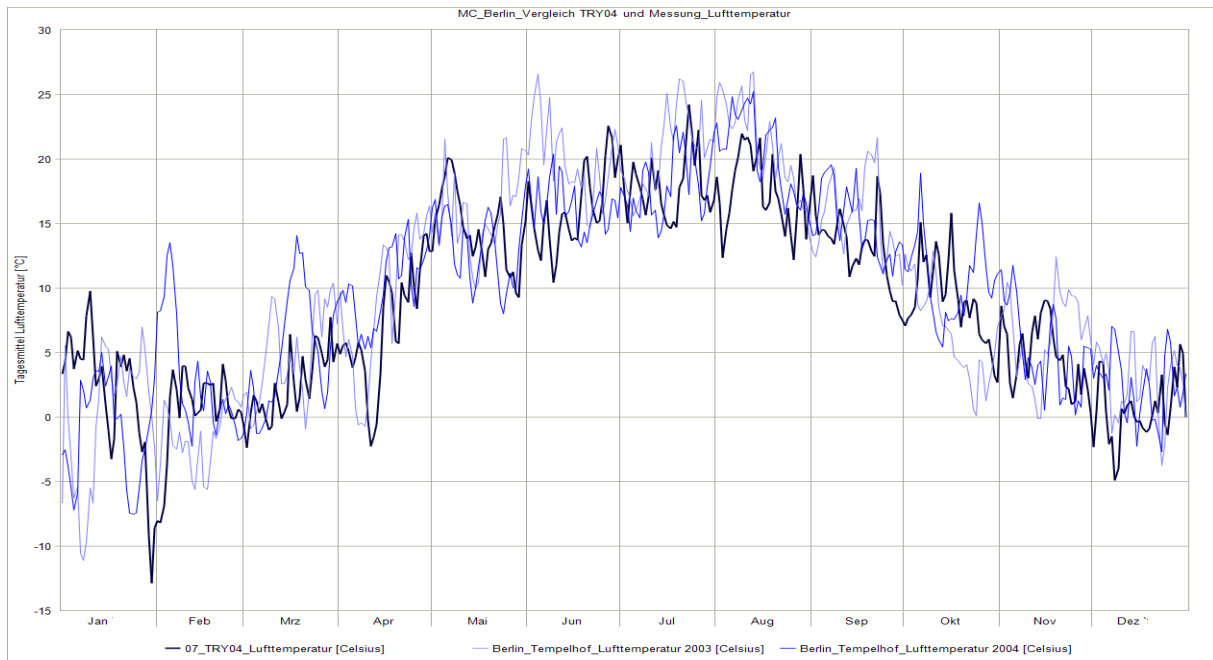
**Tabelle 14:** Vergleich Messung und Prognose von Tageswerten der mittlere Lufttemperatur und der Globalstrahlungssumme der Standorte Berlin, Hamburg und Mannheim 2003 und 2004

Abweichung Messung und Prognose		Messung		Abweichung Prognose von Messung			
		Jahresmittel Lufttemperatur	Jahressumme Globalstrahlung	Jahressumme Abweichung Ta- gesmittel Lufttemperatur	Mittlere tägliche Abweichung Tagesmittel Lufttemperatur	Jahressumme Abweichungen Tagessumme Globalstrahlung	Mittlere tägliche Abweichung Tagessumme Globalstrahlung
			$\Sigma E_{gem,i}$	$\Sigma   \theta_{gem,r} - \theta_{prog,i}  $	$\Sigma   \theta_{gem,r} - \theta_{prog,i}   / 365 \text{ d}$	$\Sigma   E_{gem,r} - E_{prog,i}  $	$\Sigma   E_{gem,r} - E_{prog,i}   / 365 \text{ d}$
		°C	KWh/a	$\Sigma(\text{K/d})$	K	$\Sigma(\text{kWh/d})$	kWh
Berlin	2003	10,19	1143	285	0,78	268	0,734
	2004	9,88	1014	264	0,72	206	0,564
Hamburg	2003	10,06	1118	346	0,95	265	0,726
	2004	9,52	995	251	0,69	209	0,572
Mannheim	2003	13,37	1284	394	1,08	264	0,723
	2004	11,77	1135	315	0,86	235	0,644

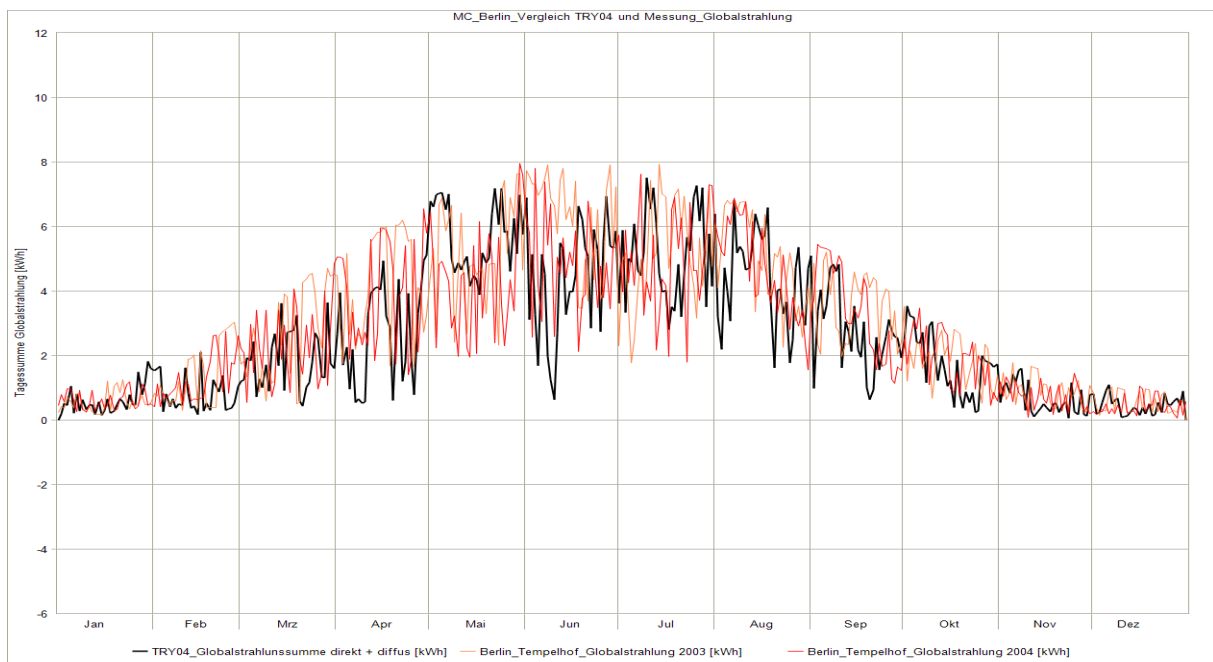
**Tabelle 15:** Heiz- und Kühlgradstunden RLT bei einer Konditionierung der Zuluft auf 23 °C, werktags von 8:00 bis 18:00 Uhr aus Messwerten 2003 und 2004 abgeleitete für die Standorte Berlin, Hamburg und Mannheim

RLT		Heizgradstunden < 23 °C	Kühlgradstunden > 23 °C
		Kh/a	Kh/a
Berlin	2003	29.259	1.560
	2004	29.753	713
Hamburg	2003	29.229	1.080
	2004	30.772	390
Mannheim	2003	22.025	4.455
	2004	24.540	1.627

## BERLIN

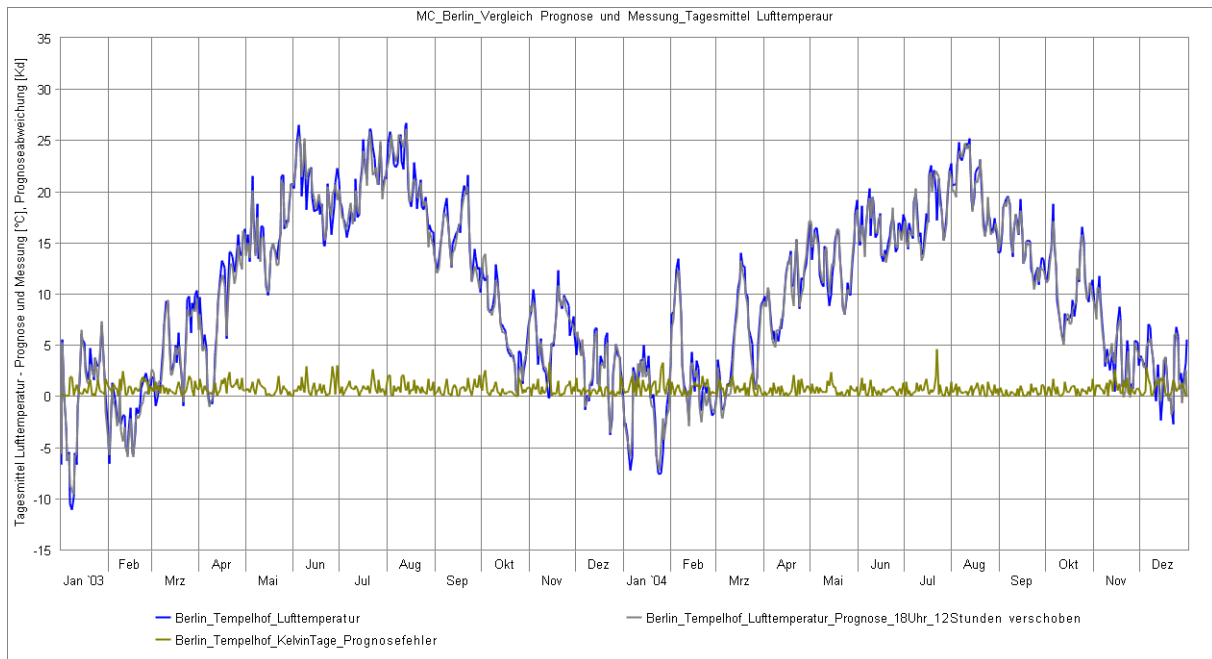


**Abbildung 31:** Vergleich der Tageswerte der mittleren Außenlufttemperatur Testreferenzjahr 04 sowie Messwerte von Berlin aus den Jahren 2003 und 2004

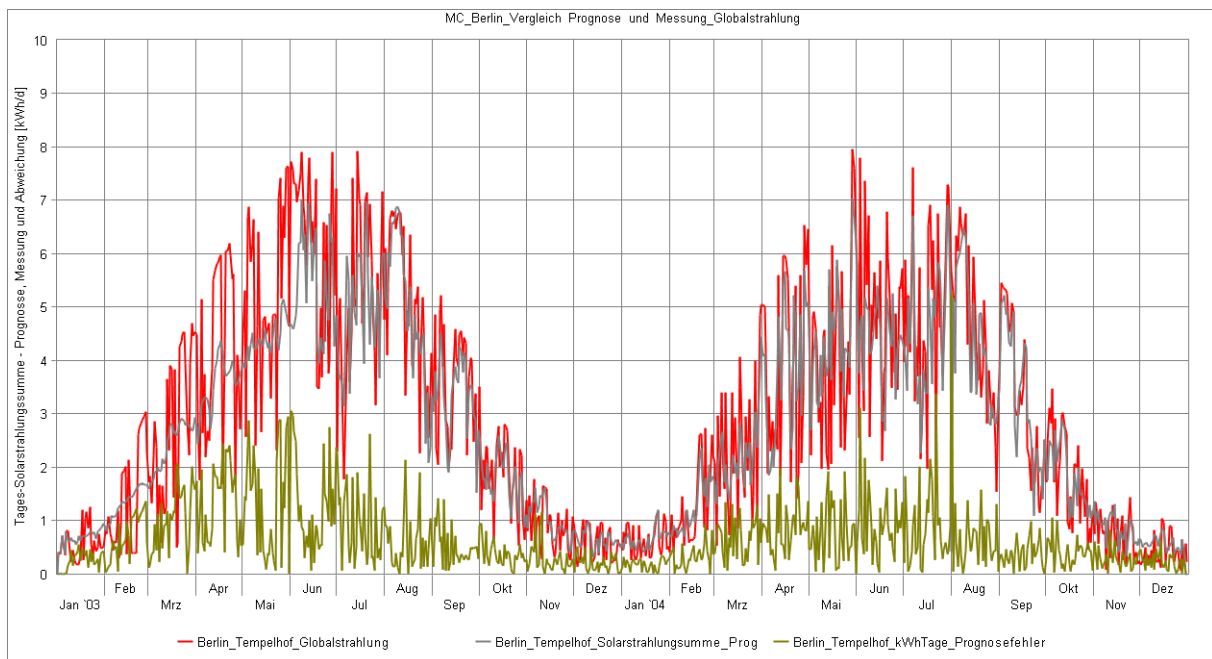


**Abbildung 32:** Vergleich der Tageswerte der Globalstrahlungssumme Testreferenzjahr 04 sowie Messwerte von Berlin aus den Jahren 2003 und 2004



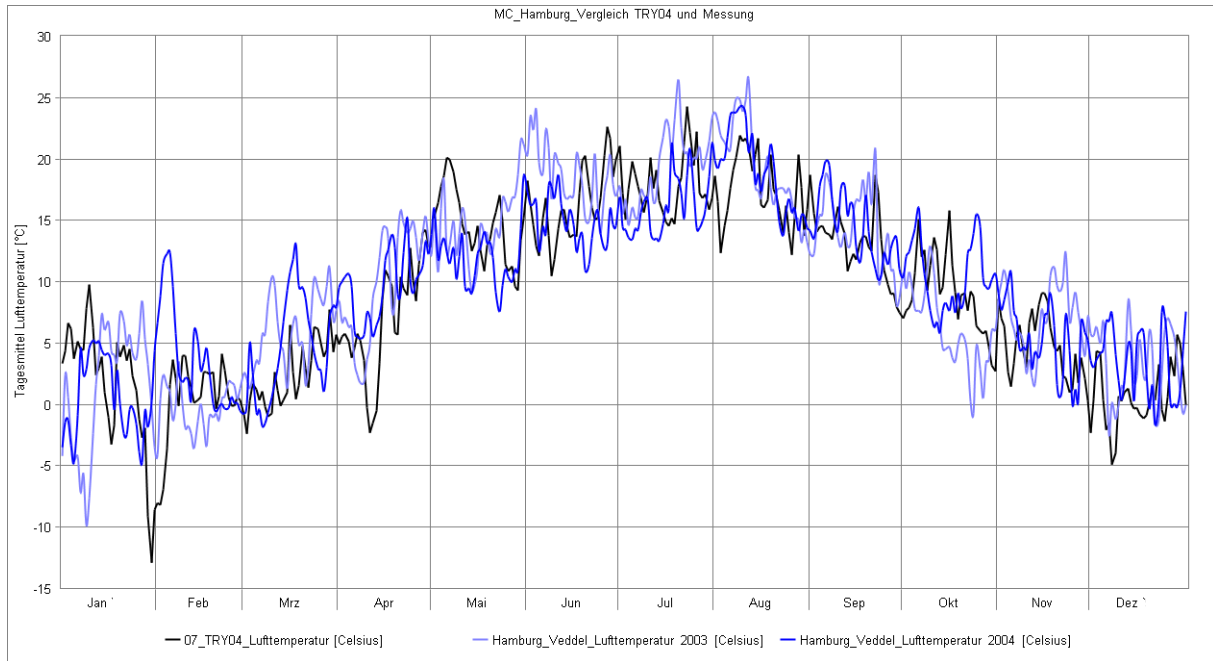


**Abbildung 33:** Tageswerte der prognostizierten und gemessenen mittleren Lufttemperatur sowie jeweilige Differenz, Berlin 2003 bis 2004

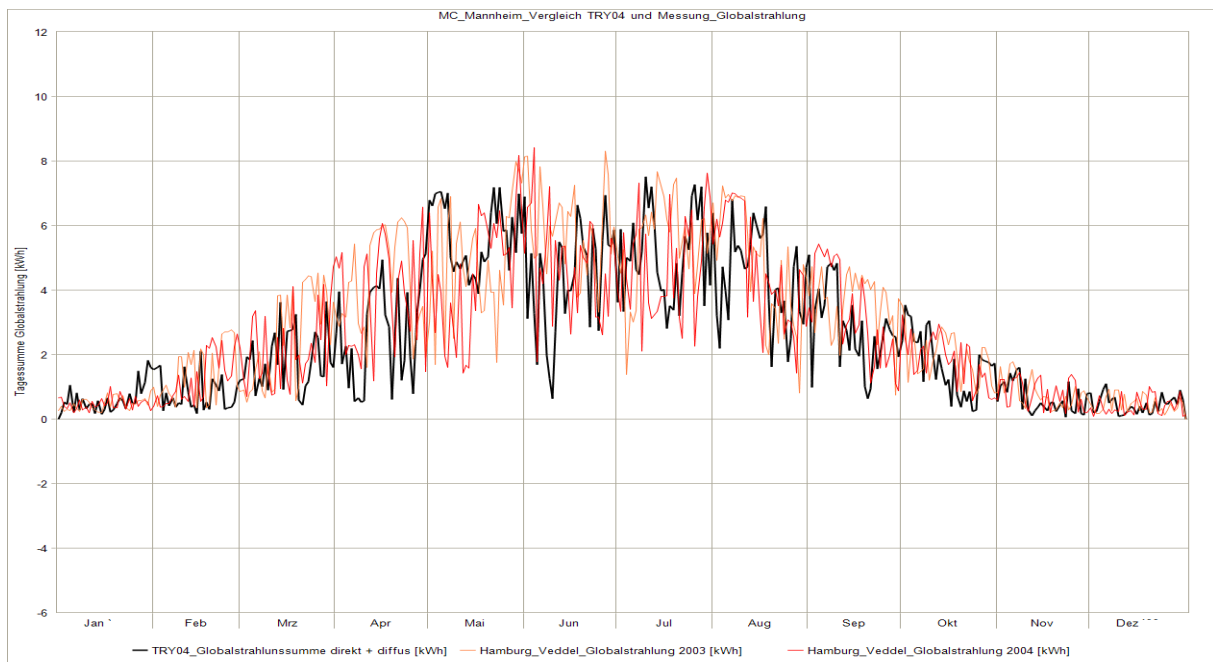


**Abbildung 34:** Tageswerte der prognostizierten und gemessenen Globalstrahlungssumme sowie jeweilige Differenz, Berlin 2003 bis 2004

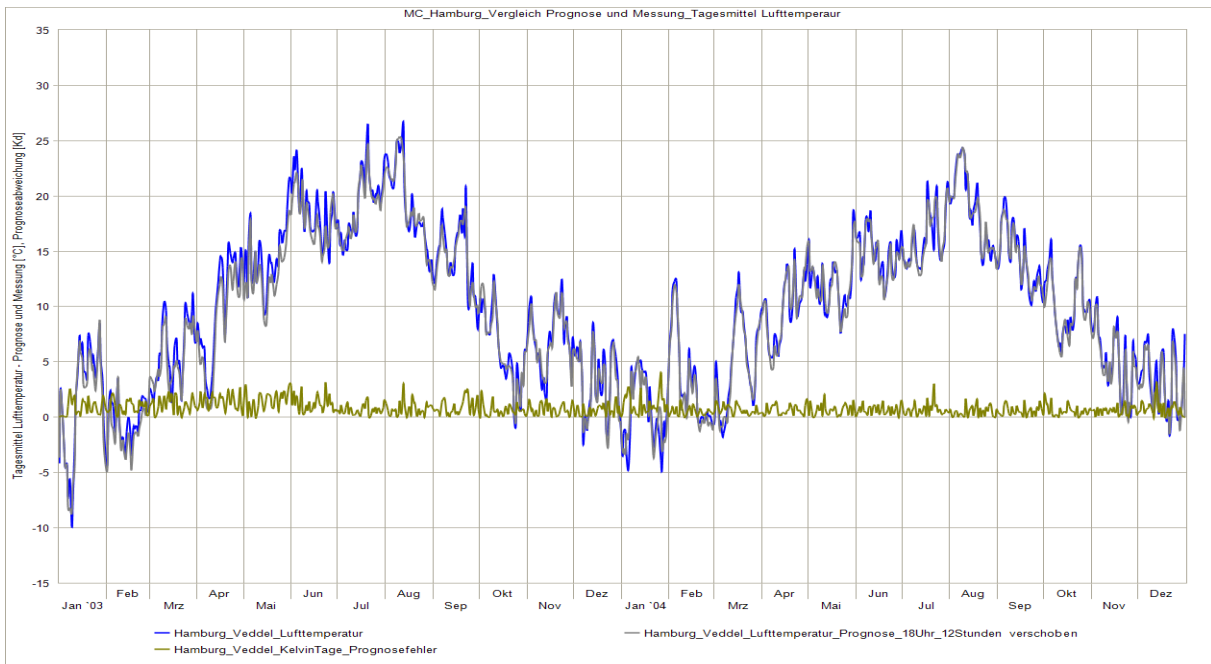
## HAMBURG



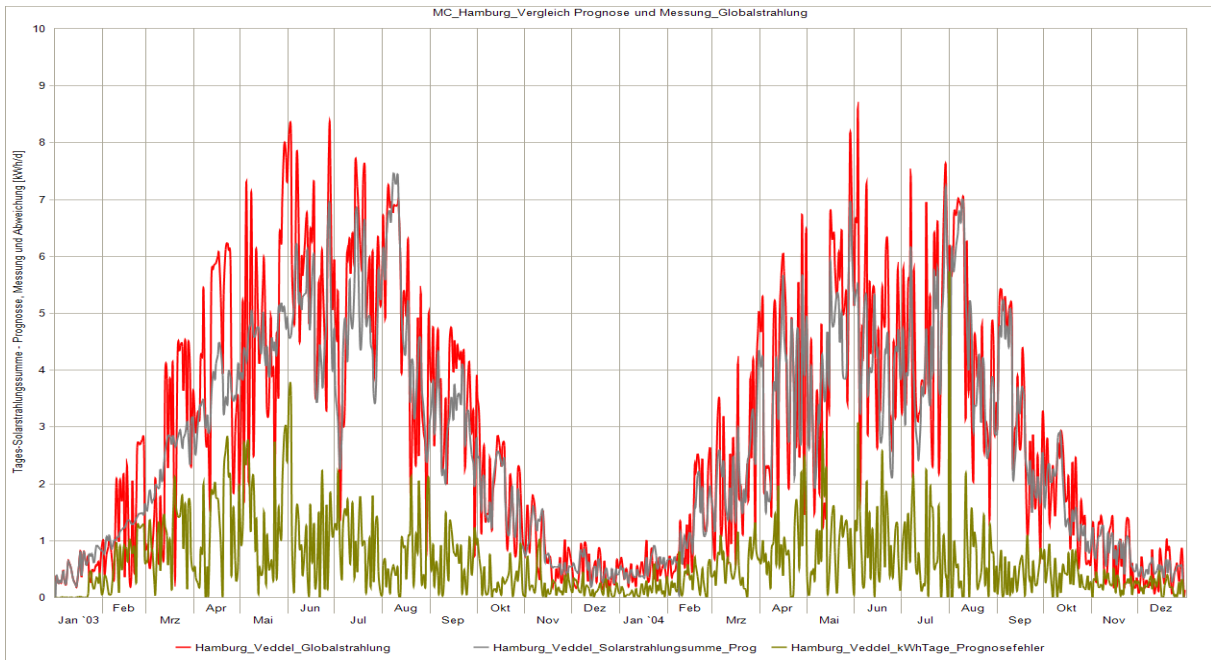
**Abbildung 35:** Vergleich der Tageswerte der mittleren Außenlufttemperatur Testreferenzjahr 04 sowie Messwerte von Hamburg aus den Jahren 2003 und 2004



**Abbildung 36:** Vergleich der Tageswerte der Globalstrahlungssumme Testreferenzjahr 04 sowie Messwerte von Hamburg aus den Jahren 2003 und 2004

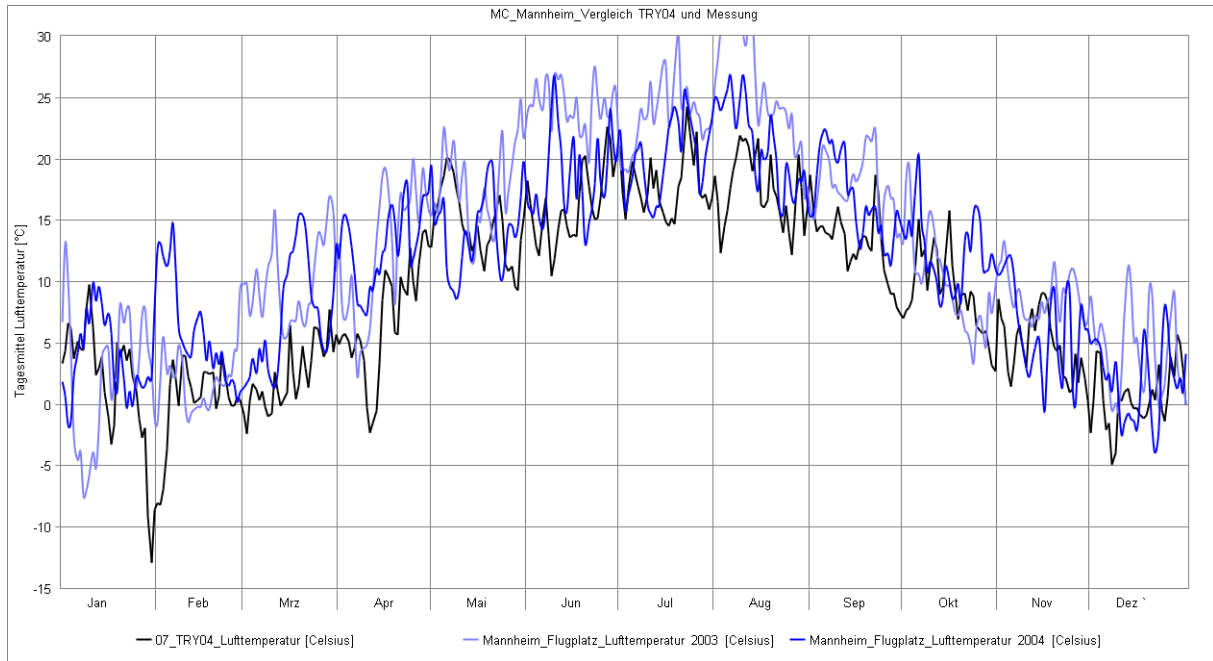


**Abbildung 37:** Tageswerte der prognostizierten und gemessenen mittleren Lufttemperatur sowie jeweilige Differenz, Hamburg 2003 bis 2004

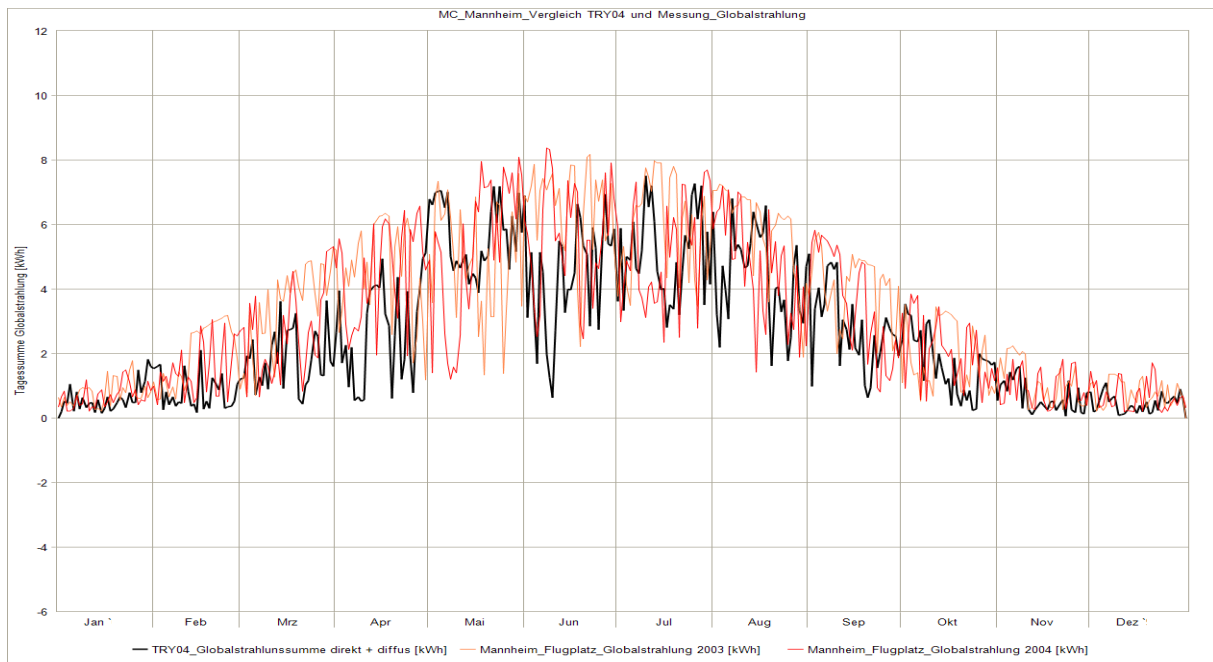


**Abbildung 38:** Tageswerte der prognostizierten und gemessenen Globalstrahlungssumme sowie jeweilige Differenz, Hamburg 2003 bis 2004

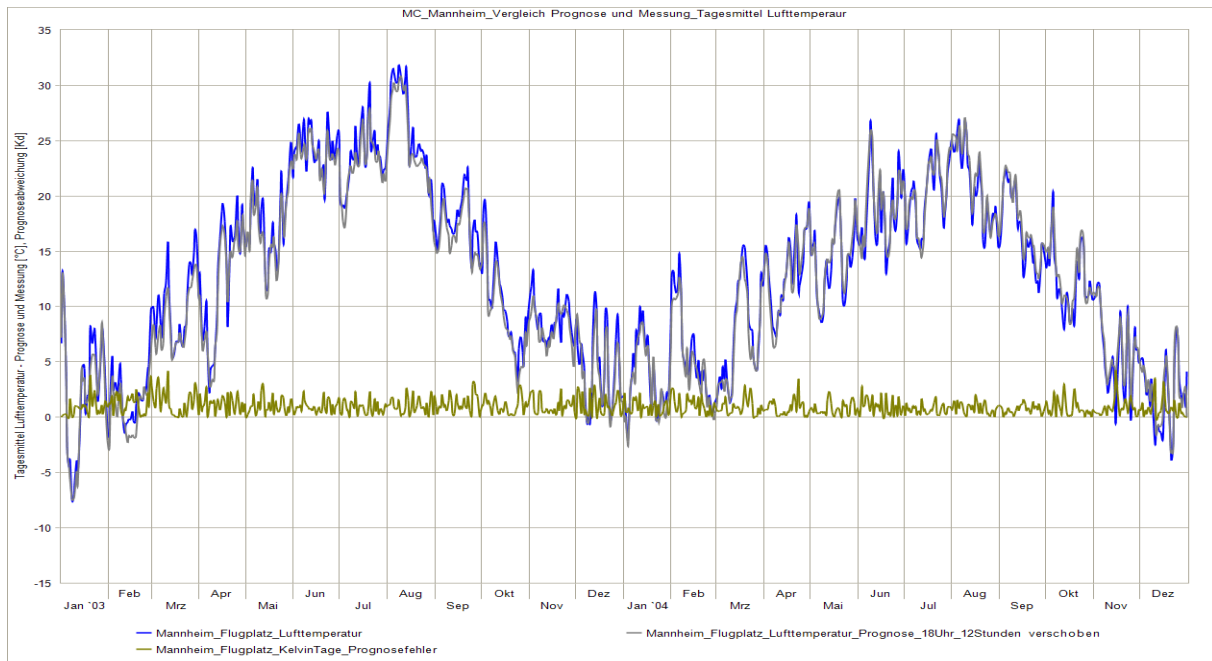
## MANNHEIM



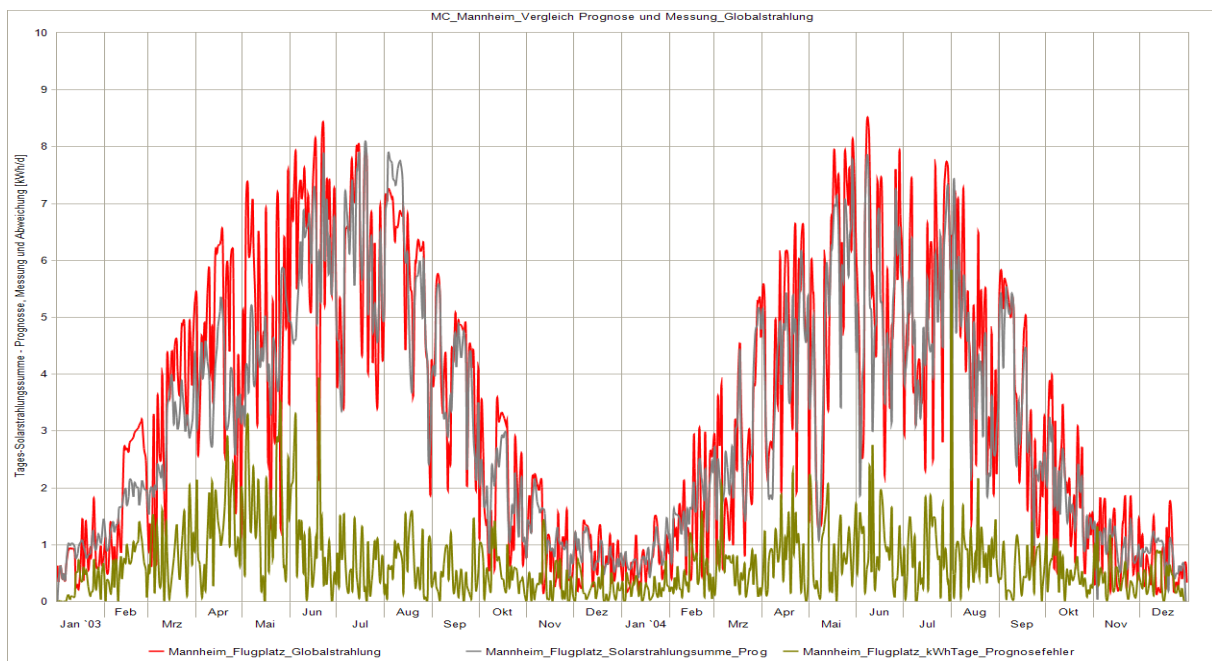
**Abbildung 39:** Vergleich der Tageswerte der mittleren Außenlufttemperatur Testreferenzjahr 04 sowie Messwerte von Mannheim aus den Jahren 2003 und 2004



**Abbildung 40:** Vergleich der Tageswerte der Globalstrahlungssumme Testreferenzjahr 04 sowie Messwerte von Mannheim aus den Jahren 2003 und 2004



**Abbildung 41:** Tageswerte der prognostizierten und gemessenen mittleren Lufttemperatur sowie jeweilige Differenz, Mannheim 2003 bis 2004



**Abbildung 42:** Tageswerte der prognostizierten und gemessenen Globalstrahlungssumme sowie jeweilige Differenz, Mannheim 2003 bis 2004



## 6.2. Wetterprognosegeführte Regelstrategien zur Gebäudetemperierung

Im nachfolgenden Kapitel werden die Möglichkeiten und Grenzen der zwei wetterprognosegeführten Regelstrategien zur Temperierung von Betondecken zu Heiz- und Kühlzwecken mit einer am Markt etablierten Regelstrategie nach Olesen verglichen. Kriterien des Vergleichs sind die zur Temperierung zweier unterschiedlich ausgerichteter Referenzbüros benötigte Heiz- und Kühlenergie sowie der erzielte Komfort.

### Aufgabenstellung

Infolge ihrer großen Masse haben die im Hochbau üblicherweise verwendeten, massiven Wände und Decken hohe Wärmekapazitäten. Umschließungsflächen mit hohen Wärmekapazitäten wirken sich im Allgemeinen positiv auf das Raumklima und den empfundenen Komfort aus. Will man Bauteile mit hohen Wärmekapazitäten zur Beheizung und/oder Kühlung eines Gebäudes oder Gebäudeteils nutzen, muss der durch die hohe Kapazität verursachten thermischen Trägheit der Bauteile Rechnung getragen werden. Thermische Trägheit kann teilweise mit hohen Heiz- oder Kühlleistungen kompensiert werden. Weiterhin werden thermisch aktive Bauteile, wie Decken und Wände, oft nur zur Bereitstellung einer sog. Grundlast eingesetzt. Kurzfristig variabler Wärme- oder Kältebedarf wird durch sog. "flinke Systeme", wie z. B. raumluftechnische Anlagen (RLT) oder Konvektoren bzw. Radiatoren bereitgestellt.

Werden ausschließlich wand-, decken- oder fußbodenintegrierte Systeme zum Heizen und/oder Kühlen eingesetzt, stellt die Temperierung dieser Bauteile besondere Anforderungen an die Güte der Regelung. Neben der aktiven Regelung zur Temperierung der Bauteile, unterstützt der sog. Selbstregeleffekt eine angepasste Abgabe oder auch Aufnahme von Wärme. Im Fall der Raumbeheizung reduziert eine ansteigende Raumtemperatur die Temperaturdifferenz zwischen dem temperierten Bauteil und der Raumluft und damit auch den Wärmeübergang. Da die Temperaturdifferenz zwischen dem temperierten Bauteil und der Raumtemperatur im Vergleich zu anderen Heizflächen, wie z. B. Radiatoren gering ist, bewirkt eine Änderung der Raumtemperatur eine relativ große Änderung dieser Temperaturdifferenz und des damit verbundenen Wärmeübergangs. Im Fall einer Kühlung über temperierte Bauteile wirkt der Selbstregeleffekt entsprechend.

Neben klimatischen Bedingungen (externe Lasten) wirken sich bauphysikalische Rahmenbedingungen, die Bauart und die Ausrichtung sowie interne Lasten, das Nutzerverhalten und Komfortansprüche, auf den Wärme- und/oder Kältebedarf bei der Nutzung von Gebäuden aus. Zur Reduzierung des Energiebedarfs von thermisch trägen Systemen und zur merklichen Reduzierung der benötigten Heiz- bzw. Kühlleistung, erscheint eine Detaillierung der Regelung in Bezug auf die Reaktionszeiten oder eine dynamische Anpassung der Vorlauftemperaturen in die Heizflächen nicht zielführend. Eine möglichst exakte Anpassung der den Bauteilen zu- bzw. abgeführten Energie in Abhängigkeit des Bedarfs erscheint sinnvoll. Da infolge der thermischen Trägheit der zu temperierenden Baumassen eine parallele oder kurzfristige Energiezu- bzw. abfuhr kaum möglich ist, bietet sich eine zeitlich versetzte thermische Be- oder Entladung der aktivierten Massen an. Vor diesem Hintergrund kann die Einbindung von Wetterprognosen in die Be- oder Entladestrategien als eine Möglichkeit sowohl den Energiebedarf als auch die installierte Heiz- und/oder Kühlleistung zu reduzieren dienen. Der bei der thermischen Aktivierung von Baumassen gegebene zeitliche Versatz zwischen thermischer Be- oder Entladung und Bedarf ermöglicht eine vorausschauende Implementierung von Wetterprognosen in die betreffenden Regelalgorithmen und Anpassung der bereitzustellenden Energie.

### 6.2.1. Die Regelstrategien *PreCon*, *ForReg* und *Olesen*

Die im Rahmen dieses Projektes vorgeschlagenen Regelstrategien *PreCon* [16] und *ForReg* (for regulere; norwegisch – Vorregelung) verwenden täglich aktualisierte Wetterprognosen um den Heiz- oder Kühlbedarf des Folgetages zu berechnen. Die Regelstrategie *ForReg* wurde im Zusammenhang mit der hier beschriebenen Simulationsstudie auf der Basis von *PreCon* entwickelt. Für jede Büroausrichtung (Nord bzw. Süd), für Zeiten des Bürobetriebs (Arbeitszeit) oder die arbeitsfreie Zeit und die jeweilige hochbauliche und technische Ausstattung werden eigene Koeffizientensätze für die Regelalgorithmen bestimmt (siehe Kap. 6.3.4). Bei gleichen Rahmenbedingungen sind die von der Außentemperatur abhängigen Koeffizienten  $a_{1A}$  und  $a_{0A}$  bzw.  $a_{1F}$  und  $a_{0F}$  bei den beiden wetterprognosegeführten Regelstrategien gleich, die Berücksichtigung der thermischen Lasten durch die solare Einstrahlung  $E_{glob}$  erfolgt unterschiedlich. Bei *PreCon* werden diese Wärmelasten mit einem logarithmischen Ansatz  $\ln(E_{glob})$ , bei *ForReg* durch einen Term der Form  $E_{glob} \wedge c_0$ , sowohl bei der Bestimmung der Koeffizientenbestimmung als auch bei den Simulationen repräsentiert. In beiden Regelstrategien wird bei der Berücksichtigung der Außentemperatur  $T_{amb}$  zwischen Perioden des Bürobetriebs (Arbeitszeit) und arbeitsfreier Zeit mit eigenen Koeffizienten ( $a_{0A}$ ,  $a_{1A}$  bzw.  $a_{0F}$ ,  $a_{1F}$ ) unterschieden. Der Einfluss der solaren Einstrahlung ist in beiden Fällen gleich und unterscheidet sich bei gleichem hochbaulichen Aufbau und technischem Ausstattung der Büros infolge der Fassadenausrichtung.

#### Regelstrategie *PreCon*

Während der Arbeitszeit (A)

$$\text{Nordbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1A} * T_{\text{amb}} - a_{0A} + b_{1N} * \ln(E_{\text{glob}}) - b_{0N}$$

$$\text{Südbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1A} * T_{\text{amb}} - a_{0A} + b_{1S} * \ln(E_{\text{glob}}) - b_{0S}$$

Während der arbeitsfreien Zeit (F)

$$\text{Nordbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1F} * T_{\text{amb}} - a_{0F} + b_{1N} * \ln(E_{\text{glob}}) - b_{0N}$$

$$\text{Südbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1F} * T_{\text{amb}} - a_{0F} + b_{1S} * \ln(E_{\text{glob}}) - b_{0S}$$

#### Regelstrategie *ForReg*

Während der Arbeitszeit

$$\text{Nordbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1A} * T_{\text{amb}} - a_{0A} + c_{1N} * E_{\text{glob}} \wedge c_{0N}$$

$$\text{Südbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1A} * T_{\text{amb}} - a_{0A} + c_{1S} * E_{\text{glob}} \wedge c_{0S}$$

Während der arbeitsfreien Zeit

$$\text{Nordbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1F} * T_{\text{amb}} - a_{0F} + c_{1N} * E_{\text{glob}} \wedge c_{0N}$$

$$\text{Südbüro} \quad Q_{\text{heiz/Kühl}} = a_{1F} * T_{\text{amb}} - a_{0F} + c_{1S} * E_{\text{glob}} \wedge c_{0S}$$

Aus der jeweils benötigten Heiz- oder Kühlenergie, der Rücklauftemperatur aus den Bauteilen, dem entsprechenden Massenstrom  $\dot{m}$  und der Wärmekapazität  $c_p$  wird die zur thermischen Be- oder Entladung benötigte Vorlauftemperatur während der Betriebszeit der Bauteilaktivierung (Betriebszeit<sub>BTA</sub>) berechnet.

$$T_{\text{Vorlauf}} = T_{\text{Rücklauf}} - Q_{\text{heiz/Kühl}} / (m_{\text{dot}} * c_p * \text{Betriebszeit}_{\text{BTA}})$$

In den vorliegenden Simulationen wird der Massenstrom  $m_{\text{dot}}$  konstant gehalten, die Betriebszeit der Betonkernaktivierung beträgt einheitlich 12 Stunden. Die berechnete Energie wird beginnend am Tag der Herausgabe der Wetterprognose im Zeitraum nach 18:00 Uhr bis 06:00 Uhr am Folgetag (für den die Energiemenge berechnet wird) den Bauteilen zu- bzw. abgeführt. Zur Berechnung der benötigten Energie werden die aktuellste, um 18:00 Uhr für den Folgetag prognostizierte mittlere Tagestemperatur und die für den Folgetag prognostizierte Summe der Globalstrahlung verwendet.

In der Simulationsstudie werden die bei der Verwendung von Testreferenzwetterdaten (TRY 04) und den Daten von drei deutschen Standorten für die Jahre 2003 und 2004 ermittelten Energiebedarfswerte bei der Verwendung der Regelstrategien PreCon und ForReg mit den Bedarfswerten bei der Verwendung einer Regelstrategie nach Olesen verglichen.

### Regelstrategie nach Olesen

Die von Olesen [18] vorgeschlagenen Regelstrategien passen im Allgemeinen die Vorlauf-temperatur in die thermisch aktiven Bauteile in Abhängigkeit von der Außentemperatur und dem Messwert der Raumtemperatur an. Die im Vergleich zu den wetterprognosegeführten Regelstrategien verwendete Regelstrategie von Olesen berechnet die benötigte Vorlauf-temperatur in die Betonkerne für alle Lastfälle und Ausrichtungen der Büros einheitlich, sie entspricht prinzipiell einer klassischen Heizkurve.

$$T_{\text{Vorlauf}} = 0.52 * (20 - T_{\text{amb}}) + 20 - 1.6 * (T_{\text{Büro}} - 23)$$

### 6.3. Simulation eines nach Süden und eines nach Norden orientierten Büros

Die Simulationsrechnungen für den Vergleich der wetterprognosegeführten Regelungen mit der Realstrategie nach Olesen werden mit dem Programm TRNSYS [22] und den zugehörigen Umgebungsprogrammen in der Programmversion TRNSYS 15 für Microsoft Windows durchgeführt. TRNSYS wurde an der Universität von Wisconsin, USA am Solar Energy Laboratory ursprünglich für die dynamische Simulation von aktiven Solarsystemen entwickelt und ist seit 1975 kommerziell verfügbar. Das in der Programmiersprache Fortran erstellte Simulationsprogramm ist ein anerkanntes und vor allem im wissenschaftlichen Bereich verbreitetes Programm zur dynamischen Simulation von Energieversorgungssystemen für Gebäude. Durch seine Modularität ermöglicht es die Integration von Rechenmodellen für spezifische Anlagenkomponenten der technischen Gebäudeausrüstung, wie z. B. Modellen zur Betonkernthermierungen.

TRNSYS wird ständig weiterentwickelt, um Komponenten erweitert und validiert und stellt ein für die vorliegende Aufgabenstellung geeignetes Simulationsprogramm dar.

Die für Simulationsrechnungen verwendeten Wetterdaten entsprechen meist Referenzwetterdaten, im vorliegenden Fall dem Testreferenzjahr<sup>5</sup> (TRY) 04, "Nordostdeutsche Tiefland" mit dem Repräsentanzstandort Potsdam herausgegeben vom Deutschen Wetterdienst im Jahr

<sup>5</sup> Ein Testreferenzjahr TRY (Test-Reference-Year) des DWD ist ein Datensatz von Wetterdatenelemente eines Jahres in stündlicher Auflösung, d. h. 8760 Werte je Element (z. B. Außentemperatur). Aktuell stellt der DWD Datensätze für 15 verschiedene TRY-Regionen der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung (2004).



2004. Zusätzlich werden die an drei deutschen Standorten in den Jahren 2003 und 2004 gemessenen und für die Verwendung mit TRNSYS aufbereiteten Wetterdaten verwendet.

Sämtliche Simulationen werden auf der Grundlage von nach Süden bzw. nach Norden ausgerichteten Referenzbüroräumen durchgeführt. Wesentliche Rahmenbedingungen der Referenzbüroräume sind nachfolgend zusammengestellt.

### 6.3.1. Gebäude, Beschreibung der Referenzbüros

Die nach Süden bzw. nach Norden orientierten Büros haben identische Grundrisse. Grundlage bildet ein Standardbüro im „Zentrum Zukunftsenergien Berlin / Internationales Solarzentrum“ (ZZB/ISZ). Zur besseren Vergleichbarkeit bleiben neben den gleichen Grundrissen auch die Fensterflächenanteile, die Fassaden und die Wandaufbauten der betrachteten Büros unverändert. Nachfolgend und in der gesamten Simulationsstudie wird das nach Süden orientierte Büro als „Südbüro“ und das nach Norden orientierte Büro als „Nordbüro“ bezeichnet.

#### Innenmaße der Referenzbüros

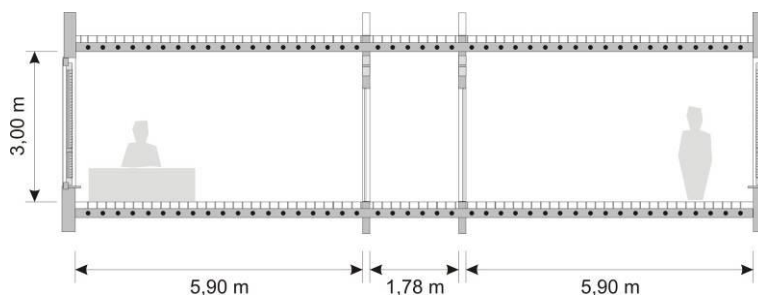


Abbildung 43: Raummodul für die Simulation

#### Büroraum:

Grundfläche: 30,09 m<sup>2</sup>

Raumbreite: 5,10 m

#### Flur:

Grundfläche Flur : 9,078 m<sup>2</sup>

Flurlänge: 5,10 m

#### Fassaden und Innenwände, Referenzfall

##### Außenfassade mit Verglasung

Fassadenfläche insgesamt: 15,3 m<sup>2</sup>,

Verglasung (transparente Fläche) insgesamt: 8,9 m<sup>2</sup>.

- Anteil der Verglasung: variabel, siehe Abschnitt 6.3.3

- opake Fläche abhängig vom Verglasungsanteil, siehe Abschnitt 6.3.3



Die Verglasung wird jeweils als Sonnenschutzverglasung (SSV) oder Wärmeschutzverglasung (WSV) je Büro simuliert.

#### Ostwand und Westwand bei Nord- bzw. Südbüro

opake Fläche je Büro (eine leichte und eine schwere Trennwand)

- leichte Trennwand: 17,7 m<sup>2</sup> und
- schwere Trennwand: 17,7 m<sup>2</sup>

#### Wand zum Flur bei Nord- bzw. Südbüro

opake Fläche, leichte Trennwand, Wandscheibe insgesamt: 15,3m<sup>2</sup>,

bei Südbüro, Orientierung Nord

bei Nordbüro, Orientierung Süd

#### **Orientierung der Fassade (Außenwand)**

Südbüro: exakte Südausrichtung, Neigungswinkel der Fassade 90° (senkrecht)

Nordbüro: exakte Nordausrichtung, Neigungswinkel der Fassade 90° (senkrecht)

#### **6.3.2. Weitere Referenzbedingungen**

Der Sollwert der Raumlufttemperatur für Heizen und Kühlen beträgt 23 °C.

#### **Thermisch aktivierte Bauteile**

Die Beheizung bzw. Kühlung erfolgt ausschließlich über eine thermische Aktivierung der Decken und teilweise des Fußbodens. Bei der Verwendung der Regelalgorithmen nach Olesen erfolgt die Be- bzw. Entladung der Baumassen abhängig von der Außentemperatur und der Raumtemperatur kontinuierlich, ohne zeitliche Begrenzung. Bei den Regelstrategien PreCon und ForReg erfolgt die thermische Be- oder Entladung der Bauteile in Abhängigkeit der aus einer Wetterprognose für den Folgetag berechneten Energiemenge zwischen 18:00 Uhr am Tag der Wetterprognose und 06:00 Uhr des Folgetages, für den die Energiemenge berechnet wird.

Um eine Kondensation von Wasser aus der Umgebungsluft an gekühlten Bauteilen zu vermeiden, wird die Vorlauftemperatur der Betonkernaktivierung (BTA) auf minimal 17 °C begrenzt. D. h., liegen durch die Regelalgorithmen ermittelte Solltemperaturen für den BTA-Vorlauf unterhalb von 17 °C, wird die BTA-Vorlauftemperatur auf 17 °C begrenzt. Die Minimaltemperaturbegrenzung gilt für alle Varianten und alle Regelalgorithmen.

Die relative Feuchte und die damit ggf. verbundenen Kondensationserscheinungen sowie die Oberflächentemperaturen der temperierten Bauteile werden dokumentiert.

#### **verwendete Wetterdaten**

Für die Simulationen werden die folgenden Wetterdaten verwendet:

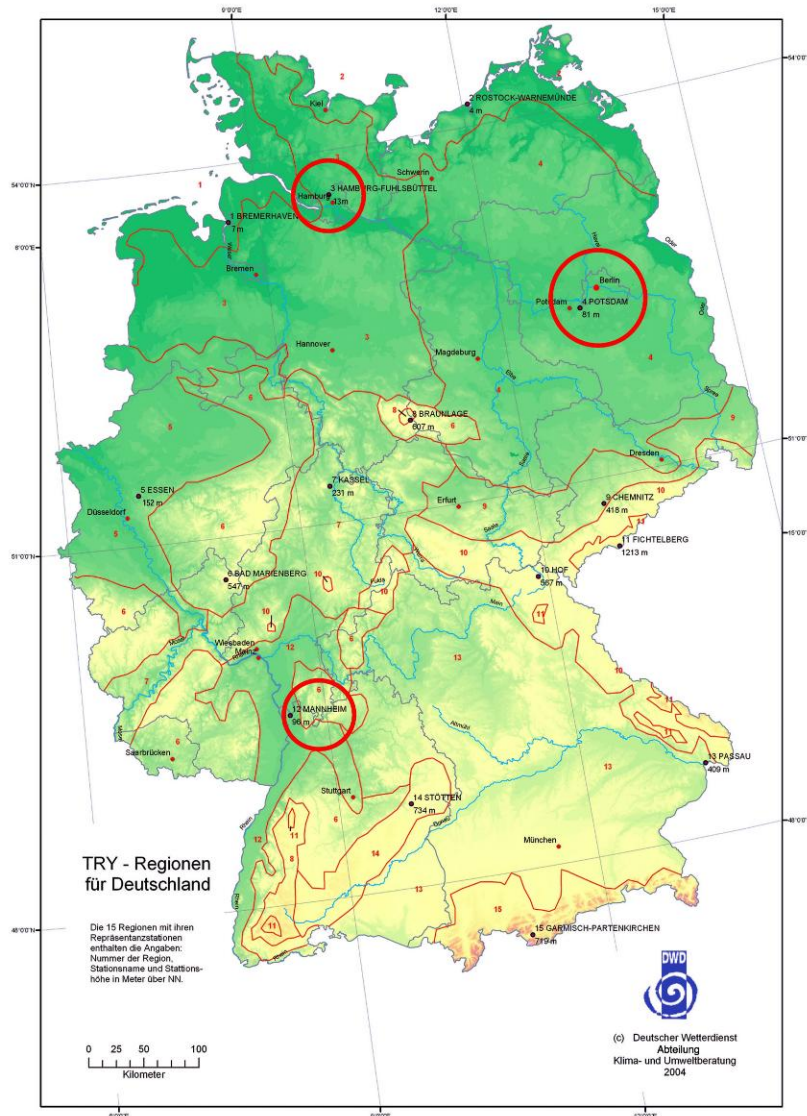
- Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsches Tiefland", Ausgabe DWD 2004



- Wetterprognosen und Messdaten für Berlin 2003, Quelle meteocontrol
- Wetterprognosen und Messdaten für Berlin 2004, Quelle meteocontrol
- Wetterprognosen und Messdaten für Hamburg 2003, Quelle meteocontrol
- Wetterprognosen und Messdaten für Hamburg 2004, Quelle meteocontrol
- Wetterprognosen und Messdaten für Mannheim 2003, Quelle meteocontrol
- Wetterprognosen und Messdaten für Mannheim 2004, Quelle meteocontrol

In Abbildung 44 ist die Lage der Standorte für die einzelnen Simulationen in Deutschland dargestellt. Diese Karte des Deutschen Wetterdienstes beinhaltet ebenso die TRY-Regionen für Deutschland. Daraus wird ersichtlich, dass die gewählten Standorte in Regionen mit unterschiedlichen Testreferenz-Wetterdaten und daher auch unterschiedlichen Klimaregionen innerhalb Deutschlands liegen.

- Hamburg                      Testreferenzjahr, Region 03
- Berlin                         Testreferenzjahr, Region 04
- Mannheim                    Testreferenzjahr, Region 12



**Abbildung 44:** Verwendete Standorte zur Evaluierung der wetterprognosegeführten Regelungen der Bauteilaktivierungen, Lage innerhalb der TRY-Regionen von Deutschland

### 6.3.3. Simulation des thermischen Verhaltens unterschiedlicher Gebäudevarianten

Die Simulationen werden für die nachfolgenden Variationen der Grundspezifikation der Standardbüros durchgeführt. Wenn nicht ausdrücklich erwähnt, werden die Parameteränderungen nach den Berechnungen der jeweiligen Varianten zurückgesetzt. Die thermischen Lasten werden über den Fensterflächenanteil der nach Süden bzw. nach Norden orientierten Fassade variiert. Da ein temporärer Sonnenschutz simulationstechnisch aber auch in der Praxis prinzipiell wie eine Reduzierung des Fensterflächenanteils wirkt und zudem im Rahmen der Simulationen Grenzsituationen bewertet werden sollen, wird auf die Verwendung von temporären Sonnenschutzmaßnahmen verzichtet. Unabhängig davon erfolgen die Berechnungen sowohl für eine Ausstattung der Büros mit Wärmeschutzverglasung als auch für eine Ausrüstung mit Sonnenschutzverglasung.



Der Wochengang der Belegung der Büros wird mit Werktagen und arbeitsfreier Zeit abgebildet. Als Werktage sind Montag bis Freitag definiert. Feiertage oder Ferien werden nicht berücksichtigt. Die Betriebszeit der Büros während der Werktage reicht von 08:00 bis 18:00 Uhr. Damit ergeben sich als "arbeitsfreie Zeit" die Tage Samstag und Sonntag sowie der Zeitraum von 18:00 bis 08:00 Uhr an den Werktagen.

Der Luftwechsel durch Fensterlüftung oder eine Lüftungsanlage sowie die internen Lasten durch Personen und Büroausstattung sind auf die Betriebszeit der Büros (von Montag bis Freitag von 08:00 bis 18:00 Uhr) begrenzt.

Im Rahmen der vorliegenden Simulationen sind das Nord- und das Südbüro sowohl regelungstechnisch als auch sonnen- und blendschutztechnisch vollständig unabhängig.

### Externe thermische Lasten

- niedrige thermische Lasten: Fensterflächenanteil der Fassade = 30 %
- mittlere thermische Lasten: Fensterflächenanteil der Fassade = 50 %
- hohe thermische Lasten: Fensterflächenanteil der Fassade = 80 %

### Interne thermische Lasten

Interne Wärmelasten durch Personen und Büroausstattung:

- je Büro drei Personen in sitzender Tätigkeit (120 W/Person) gemäß ISO 7730
- Büroausstattung je Person: PC, Monitor und Peripherie (gesamt 140 W/Person)

### Luftwechsel

- ständiger Luftwechsel mit Außenluft durch Infiltration:  $0,22 \text{ h}^{-1}$
- Luftwechsel durch Fensterlüftung:  $1,33 \text{ h}^{-1}$
- Luftwechsel durch eine Lüftungsanlage mit temperierter Zuluft:  $1,33 \text{ h}^{-1}$

### Verwendete Regelstrategien

Olesen, "PreCon" und "ForReg" (siehe Abschnitt 6.2.1)

### Varianten der Simulationsstudie

Für die beiden wetterprognosegeführten Regelstrategien und die Regelstrategie von Olesen werden die unterschiedlichen hochbaulichen und anlagentechnischen Varianten für das Nord- und das Südbüro simuliert. Die Simulationen werden jeweils für die in Abschnitt 6.3.2 aufgeführten Standorte und den Wetterbedingungen durchgeführt.

Abbildung 45 zeigt als Zusammenfassung der Variationen ein Schema der simulierten Gebäude und Lastvarianten.

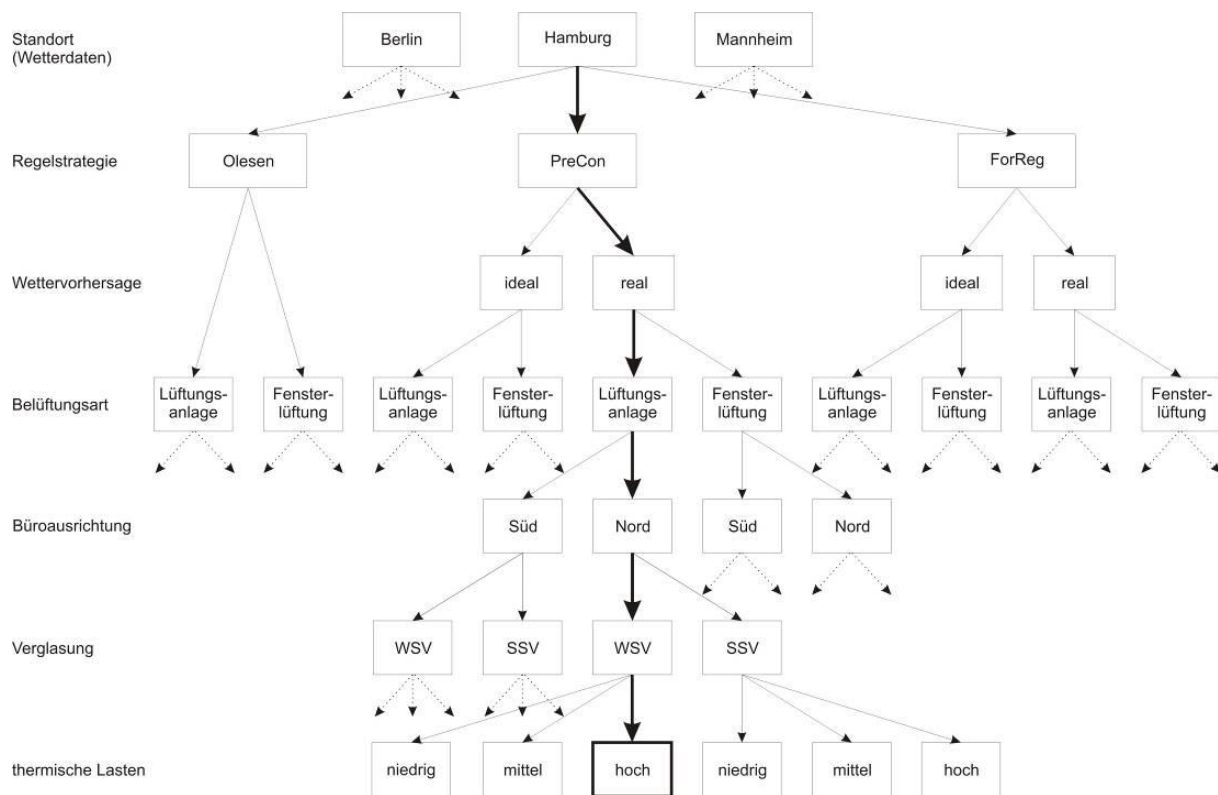


Abbildung 45: Schema der simulierten Gebäude und Lastvarianten

### 6.3.4. Bestimmung der gebäudespezifischen Koeffizienten für PreCon und ForReg

Vor der praktischen Anwendung der Regelstrategien PreCon oder ForReg aber auch für die vorliegenden, realitätsnahen simulationstechnischen Untersuchungen, müssen die in den Regelstrategien vorhandenen Gleichungen auf den thermischen Charakter der jeweiligen Zonen angepasst werden, deren Temperatur geregelt werden soll. Dazu sind in beiden Regelstrategien Terme enthalten, deren Koeffizienten in Abhängigkeit des jeweiligen thermischen Verhaltens der Zone angepasst werden. Die Bestimmung der Koeffizienten ist prinzipiell messtechnisch möglich, würde aber einen großen technischen und zeitlichen Aufwand erfordern. Weiterhin kann das während einer messtechnischen Bestimmung der Kennwerte herrschende Wetter oder andere Rahmenbedingungen stark von ansonsten für das jeweilige Büro repräsentativen Bedingungen abweichen. Aus diesem Grund und auch bei Gebäuden im Planungsstadium werden zur Bestimmung der Koeffizienten dynamische Gebäudesimulationen durchgeführt. Mittels dynamischer Simulationen werden einzelne (physikalische) Effekte isoliert und daraus gebäudespezifische Koeffizienten bestimmt. Das wesentliche Verfahren zur Bestimmung der Kennwerte bildet die Regression von Daten aus den berechneten Zuständen.

Die Wärmegewinne oder -verluste infolge von Transmission durch die Bauteile, Infiltration und die Lüftung sowie die internen thermischen Lasten durch Personen oder technische Ausstattung werden getrennt für Werkzeuge oder arbeitsfreie Zeit in beiden Regelstrategien durch lineare Gleichungen der Form  $y = m \cdot x + b$  beschrieben. Die solaren Gewinne werden bei PreCon durch die Gleichung  $y = b_1 \cdot \ln(x) + b_0$  und bei ForReg durch die Gleichung  $y = c_1 \cdot x^{Co}$



repräsentiert. Im Anhang sind dazu in Abbildung 90 bis Abbildung 95 die Beispiele für die Koeffizientenbestimmungen graphisch dargestellt.

Die Koeffizientenbestimmung erfolgt für definierte Wetterdaten, die das Wetter am Standort des Gebäudes repräsentieren. Dabei haben insbesondere die Außentemperatur als Ursache von externen thermischen Gewinnen und Verlusten sowie die solare Einstrahlung und die damit verbundenen thermischen Gewinne einen wesentlichen Einfluss. Die Hülle der jeweiligen Zone mit ihren opaken und transparenten Bauteilen und die Art der Lüftung müssen bei der Bestimmung der Koeffizienten ebenso beachtet werden, wie angrenzende thermische Zonen. Im Bereich der Nutzung wirken sich vor allem die Solltemperatur und das Lüftungsverhalten aber auch interne thermische Lasten durch Personen oder die Büroausstattung auf die Koeffizienten aus.

Für die unterschiedlichen thermischen Zonen eines Gebäudes und abhängig von den zu erwartenden externen und internen thermischen Lasten müssen die Koeffizienten für jeden einzelnen Lastfall bestimmt werden. Diese im Rahmen der hier diskutierten Simulationen benötigten Koeffizienten zum jeweiligen Gebäude oder Gebäudeteil müssen auch bei der Verwendung der wetterprognosegeführten Regelstrategien in der Praxis bestimmt und in die Regelalgorithmen eingefügt werden. Wie bereits erörtert würden die Koeffizienten auch bei einer Anwendung der wetterprognosegeführten Regelung in der Praxis wahrscheinlich mittels Gebäudesimulationen ermittelt. Nachfolgend sind die wesentlichen Schritte zur Bestimmung der Koeffizienten zusammengestellt.

### Gebäudebeschreibung für die Simulation

Zu Beginn erfolgt die Erstellung einer Gebäudebeschreibung für die Verwendung in einem Simulationsprogramm, z.B. TRNSYS. Zur anschließenden Koeffizientenbestimmung muss die Gebäudebeschreibung zumindest die folgenden Modifikationsmöglichkeiten bieten:

- anpassen an unterschiedliche interne thermische Lasten, z. B. durch Personen und/oder technische Ausstattung
- Variation der externen thermischen Lasten infolge der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung durch Fenster
- Berücksichtigung evtl. vorhandener Sonnenschutzeinrichtungen
- Berücksichtigung der Art der Lüftung, z. B. Fensterlüftung oder mechanische Lüftung mit oder ohne Temperierung der Zuluft
- Unterscheidung der internen Lasten und des Lüftungsverhaltens nach Werktagen und arbeitsfreier Zeit, z. B. Wochenenden oder Ferienzeit

### Koeffizientenbestimmung

Die Koeffizienten für PreCon und ForReg müssen für jede thermische Zone eines Gebäudes und für jede zu unterscheidende thermische Lasten bestimmt werden. Dies gilt auch für das diskutierte Nord- und Südbüro. Obwohl die Nutzung und die Vorgaben für die Heiz- bzw. Kühltemperaturen in dem untersuchten Nord- bzw. Südbüro identisch sind, müssen dennoch für jedes Büro und für die verschiedenen externen thermische Lasten Simulationen durchgeführt werden. Auch in der Praxis wären diese unterschiedlichen Fälle einzeln zu berechnen und regelungstechnisch getrennt zu erfassen.



Zur wetterprognosegeführten Regelung von Betonkerntemperierungen durch die Regelstrategien Precon oder ForReg werden die Koeffizienten in spezielle Algorithmen eingefügt, die die veränderlichen thermischen Lasten oder Nutzungsbedingungen beschreiben.

Zur Bestimmung der Koeffizienten werden die Regelstrategien nach Olesen, PreCon oder ForReg deaktiviert und das Gebäude oder Gebäudeteile mit einer "idealen" Heizung und Kühlung betrieben. Die ideale Versorgung zeichnet sich durch eine in jedem Lastfall des Jahres und zu jeder Zeit exakt abgestimmte Wärmezufuhr oder Kühlung aus. Diese Art der Temperierung hält das betrachtete Raumvolumen während des gesamten Jahres exakt auf der Solltemperatur.<sup>6</sup>

Zur Koeffizientenbestimmung werden mit dieser "idealen" Heizung und Kühlung mehrere Simulationen durchgeführt.

1. Jahressimulation mit ausschließlich Werktagen. Interne Gewinne, die Fensterlüftung oder eine ggf. vorhandene Lüftungsanlage sind stets aktiviert. Die Außentemperatur und die Solarstrahlung wirken auf das Gebäude ein.
2. Jahressimulation mit ausschließlich arbeitsfreier Zeit. Keine internen Gewinne, eine Fensterlüftung erfolgt nicht. Eine ggf. vorhandene Lüftungsanlage ist stets ausgeschaltet. Die Außentemperatur und die Solarstrahlung wirken auf das Gebäude ein.
3. Jahressimulation mit ausschließlich Werktagen. Interne Gewinne, die Fensterlüftung oder eine ggf. vorhandene Lüftungsanlage sind stets aktiviert. Die Außentemperatur wirkt auf das Gebäude ein, das Gebäude empfängt KEINE Solarstrahlung.
4. Jahressimulation mit ausschließlich arbeitsfreier Zeit. Keine internen Gewinne, eine Fensterlüftung erfolgt nicht. Eine ggf. vorhandene Lüftungsanlage ist stets ausgeschaltet. Die Außentemperatur wirkt auf das Gebäude ein, das Gebäude empfängt KEINE Solarstrahlung.

Aus den Simulationsergebnissen werden zunächst die Koeffizienten bestimmt, die den Energiebedarf zur Beheizung und Kühlung in Abhängigkeit der Infiltration, der Lüftung und der internen Gewinne beschreiben. Dabei wird zusätzlich nach Werktagen und Freizeit unterschieden. Die Bestimmung der Koeffizienten für die Freizeit erfolgt ohne Lüftung und ohne interne Gewinne. Die Bestimmung dieser Koeffizienten für Werktage und Freizeit erfolgt zunächst OHNE externe Lasten durch solare Einstrahlung.

Zur Bestimmung des Einflusses der externen Lasten durch solare Einstrahlung, werden die zuvor ermittelten Koeffizienten noch einmal, jedoch MIT solarer Einstrahlung auf das Gebäude bestimmt.

<sup>6</sup> Eine "ideale" Heizung oder Kühlung ist mit technischen Komponenten in der Praxis nicht möglich. Simulationstechnisch kann sie als Grenzfall der minimal zur Temperierung eines Raumes benötigten Heiz- und Kühlenergie zur uneingeschränkten Gewährleistung der Soll-Raumtemperatur interpretiert werden.





### 6.3.5. Koeffizientenbestimmung aus gemessenen Wetterdaten und Messwerten

In der Praxis können die für die Regelstrategien PreCon oder ForReg benötigten Koeffizienten auf unterschiedlichem Datenmaterial basieren oder auch messtechnisch bestimmt werden. Ausgehend von der üblichen Verfügbarkeit von Daten für einen in Deutschland befindlichen Standort, stehen in jedem Fall die Referenz-Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes für den betreffenden Standort zu Verfügung. Insbesondere in Bereichen großer Städte und teilweise für exponierte Lagen stehen Wetterdaten ggf. auch von anderen Anbietern, wie z.B. der Firma meteocontrol zu Verfügung. Die Koeffizienten werden wie in Kapitel 6.3.4 beschrieben bestimmt. Bei der Implementierung einer der diskutierten, wetterprognosegeführten Regelstrategien in ein Bestandsgebäude, können die Koeffizienten in einzelnen Fällen ggf. aus Messdaten des Gebäudebetriebs generiert werden.

### Übertragbarkeit der Koeffizienten auf andere Standorte

Neben der Anwendbarkeit der für einen Standort, ein definiertes Gebäude und bestimmte Wetterdaten bestimmten Koeffizienten bei variierenden Wetterbedingungen oder veränderten thermischen Lasten im Verlauf der Betriebszeit des Gebäudes, ist es von Interesse ob und wie weit die spezifizierten Koeffizienten auf das gleiche Gebäude an einem anderen Standort übertragen werden können. Zu diesem Zweck werden die aus dem Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsches Tiefland" mit dem Repräsentanzstandort Potsdam bestimmten Koeffizienten in die Simulationen mit den gemessenen Wetterdaten für die Standorte Hamburg, Berlin und Mannheim eingesetzt. Um zudem den Einfluss unterschiedlicher Wetterbedingungen an den Standorten zu untersuchen, werden die Berechnungen für jeden Standort mit den gemessenen Wetterdaten aus den Jahren 2003 und 2004 durchgeführt.

### Wetterprognosen und Prognosefehler

Um den Einfluss von Prognosefehlern -das sind Ungenauigkeiten in der Wettervorhersagen- zu bewerten, werden die Simulation mit den Regelstrategien PreCon oder ForReg einmal mit idealen, aus den Wetterdaten selbst erstellten Wetterprognosen und einmal mit echten Wetterprognosen der Fa. meteocontrol durchgeführt.

## 6.4. Auswertung und Ergebnisse der Simulationen

In diesem Kapitel werden Grundlagen der Auswertung und Ergebnisse der Simulationen der Büros an den unterschiedlichen Standorten und für die unterschiedlichen Lastfälle dargestellt. Ein wesentliches Ziel ist die Überprüfung ob und mit welcher regelungstechnischen Güte die diskutierten wetterprognosegeführten Regelungen einsetzbar sind. Dabei stellt die Frage nach der Übertragbarkeit der für einen Standort und Lastfall bestimmten Koeffizienten auf einen anderen Standort ein wesentliches Kriterium für die praktische Anwendbarkeit der Regelstrategien dar.

### 6.4.1. Zuschlag zur Heiz- und Kühlenergie

Zusammen mit der energetischen Bewertung der Büros infolge der Ausrichtung, hochbaulichen und technischen Ausstattung und der thermischen Lasten stellt der Komfort ein wesentliches Bewertungskriterium bei der Gegenüberstellung der Regelstrategien dar. Im Rahmen dieser Simulationsstudie erfolgt die Bewertung des Komforts entsprechend der Häufigkeit der empfundenen Raumtemperatur (operative Raumtemperatur) während der Arbeitszeit im Ver-



lauf eines Jahres. Dazu werden die Stunden der jeweiligen operativen Raumtemperatur in Temperaturschritten von 2 K aufsummiert. Die Solltemperatur  $\pm 1$  °C stellt die Grenze dar, unterhalb der die Stunden mit zu geringer Raumtemperatur definiert sind und oberhalb der die "Überhitzungsstunden" dokumentiert werden.

Auch formal ist es nicht korrekt die unterschiedlichen Energiebedarfswerte ohne Angabe der jeweiligen Abweichungen von der Solltemperatur miteinander zu vergleichen. Auch wenn bei einem Vergleich die Energiebedarfswerte und die zugehörigen Abweichungen zur Solltemperatur parallel betrachtet werden, ergibt sich die Schwierigkeit, diese schon durch ihre physikalischen Einheiten nicht vergleichbaren Größen miteinander zu verbinden oder gegeneinander abzuwägen.

Eine Möglichkeit, die die Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit erhöhen kann, ist die Berechnung der theoretisch notwendigen Zusatzenergie, die zum Erreichen der Solltemperatur notwendig ist. Abhängig vom Betrag der Abweichung der empfundenen Raumtemperatur von der Solltemperatur wird eine Abweichung in der Praxis als mehr oder weniger große Komforteinbuße bewertet. Diese, prinzipiell subjektive Bewertung kann durch eine Einstufung in Bezug auf die Größe der Abweichung zum Sollwert ansatzweise objektiviert werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass in der Praxis die Bewertung durch unterschiedliche Personen verschieden ausfallen und stark differieren kann. Um den Betrag der Abweichung zu berücksichtigen können sog. "Penaltyfunktionen" definiert und zur Berechnung von sog. "Strafenergien" eingeführt werden. Bei diesem Ansatz werden neben den zum Erreichen der Solltemperaturen addierten Energiemengen zusätzlich entsprechend der Größe der Abweichungen der empfundenen Raumtemperaturen von der Solltemperatur "Strafenergien" addiert. Dies bedeutet, dass aus dem Betrag der Über- oder Unterschreitung der Solltemperatur und der zugehörigen Zeit eine Energiemenge berechnet wird, die der Nutzenergie zum Erreichen der Solltemperatur zugeschlagen wird. In welchem Maß und auf welche Art die jeweilige Höhe und die Zeit der Abweichung als "Strafenergie" zusätzlich berücksichtigt wird, kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen und auch empirisch festgelegt werden.

Die hier vorgestellte Simulationsstudie diskutiert die tatsächlich bereitzustellenden Energiemengen. Die Einführung von "Strafenergien" -ihrer Art nach von rein fiktivem Charakter- würde die Aussagen verzerren und die Energiebilanzen verfälschen. Um die zur Einhaltung der Komfortbedingungen notwendige Heiz- und Kühlenergie direkt und unverändert sichtbar zu machen, wird daher im Rahmen dieser Auswertungen auf eine Einstufung und Bewertung der Größe der Abweichungen durch weitere Zuschläge ("Strafenergien") verzichtet. Die empfundenen Raumtemperaturen während der Arbeitszeit bilden die Grundlage zur Komfortbewertung und die Basis der Berechnung der zum Erreichen der Solltemperatur zusätzlich benötigten Energie. Diese zusätzlich benötigte Energie wird im Fall einer empfundenen Raumtemperatur unterhalb der Solltemperatur als Heizenergie und oberhalb der empfundenen Raumtemperatur als Kühlenergie bewertet. Bei der berechneten, zusätzlich benötigten Energie handelt es sich wie bei der durch die Bauteilaktivierung oder eine raumluftechnische Anlage dem Büro zu- oder abgeführten Energie um Nutzenergie.

#### 6.4.2. Operative (empfundene) Raumtemperatur

Die empfundene Raumtemperatur ist ein wichtiges Kriterium zur Einschätzung der thermischen Behaglichkeit und damit des thermischen Komforts in einem Büro. Neben der empfundenen Temperatur beeinflusst die jeweilig vorherrschende relative Feuchte der Raumluft die Behaglichkeit und den empfundenen Komfort. Im Rahmen dieser Simulationen wird die



Feuchte der Luft in Bezug auf die Heiz- und Kühlenergie berücksichtigt. Im Zusammenhang mit der Bewertung des Komforts wird sie jedoch nicht betrachtet.

Die operative (empfundene) Raumtemperatur ist in der Literatur nicht einheitlich definiert. In Anlehnung an eine weit verbreitete Definition und den verwendeten Algorithmus in TRNSYS wird die operative Raumtemperatur für eine im Raum befindliche Person in dieser Simulationsstudie wie folgt definiert:

$$\vartheta_o = x_{op} * \vartheta_{Luft} + (1 - x_{op}) * \vartheta_{Flächen}$$

$\vartheta_{op}$  operative (empfundene) Raumtemperatur

$x_{op}$  Wichtungsfaktor der operativen Raumtemperatur, gewählt: 0,5

$\vartheta_{Luft}$  Lufttemperatur der thermischen Zone

$\vartheta_{Flächen}$  mittlere Oberflächentemperatur der Umfassungsflächen nach den Größen der Oberflächen gewichtet.

### Hinweis

Im Zusammenhang mit den vorliegenden Simulationen ist die Solltemperatur für die Büros einheitlich auf 23 °C festgelegt. Bei der Auswertung ist zu beachten, dass entsprechend der Verhältnisse in der Praxis zur Regelung der Heizung und Kühlung die Raumlufttemperatur, zur Bewertung des Komforts hingegen die empfundene Raumtemperatur herangezogen wird.

### 6.4.3. Referenzauswertung Testreferenzjahr 04, “Nordostdeutsches Tiefland“

Die Bestimmung der gebäudespezifischen Koeffizienten erfolgt auf der Grundlage des Testreferenzjahres TRY 04 “Nordostdeutsches Tiefland“ mit dem Repräsentanzstandort Potsdam. Die Gegenüberstellung der Energieeffizienz und des thermischen Komforts durch die unterschiedlichen Regelalgorithmen erfolgt beispielhaft für die Standorte Hamburg, Berlin und Mannheim, jeweils für die Jahre 2003 und 2004. Um die theoretisch höchstmögliche Energieeffizienz und den höchsten Komfort in Abhängigkeit der verwendeten Regelstrategie (Olesen, PreCon und ForReg) zu ermitteln, wird als Referenz zunächst eine Musterauswertung auf der Basis des Testreferenzjahres TRY 04 “Nordostdeutsches Tiefland“ durchgeführt<sup>7</sup>.

### Testreferenzjahr 04, niedrige thermische Last

Erwartungsgemäß unterscheiden sich die beiden in Bezug auf ihre thermische Hülle, d.h. die Wandaufbauten und Verglasungen identischen Büroräume allein durch Ihre Ausrichtung in einem höheren Heizenergiebedarf des Nordbüros und einem höheren Kühlbedarf des Südbüros. Wie in Abbildung 46 und Abbildung 47 ersichtlich liegt in beiden Büros der Heiz- und Kühlenergiebedarf bei Verwendung der Regelstrategie nach Olesen deutlich über den Werten die sich bei der Verwendung der Regelstrategien PreCon oder ForReg ergeben. Die neu entwickelten, wetterprognosegeführten Regelstrategien PreCon oder ForReg liegen so-

<sup>7</sup> Die auf der Basis des Testreferenzjahres TRY 04 ermittelten Koeffizienten für die unterschiedlichen Regelstrategien, Büroausrichtungen, thermischen Lasten und techn. Ausstattungen gelten formal für genau diesen Wetterdatensatz. Es wird daher erwartet, dass die mit dem Testreferenzjahre TRY 04 und den daraus ermittelten Koeffizienten durchgeführten Simulationen die bestmögliche Regelung der Heizung und Kühlung in Bezug auf die Energieeffizienz und den Komfort darstellen.



wohl bei der Heizenergie als auch beim Bedarf an Kühlenergie im wesentlichen bei den gleichen Energiebedarfswerten. Unabhängig von der Ausrichtung der Büros liegt der Verbrauch an Kühlenergie bei einer Büroausstattung mit Lüftungsanlage bei Olesen deutlich über dem bei der Anwendung von Fensterlüftung. Auch die Heizenergie, die zum Teil über die Lüftungsanlage geliefert wird, liegt in der Summe (BTA und Lüftung) über den Werten bei der Fensterlüftung. Diese Konstellation ist bei PreCon und ForReg umgekehrt, die Beträge sind zudem deutlich geringer. Mit der Ausnahme der Ausstattungsvarianten mit Lüftungsanlage wird bei niedrigen Lasten unabhängig von der Büroausrichtung oder der Verglasungsart praktische keine Zusatzenergie zum Erreichen der Komfortbedingungen (empfundene Raumtemperatur 23 °C) benötigt. Bei der Verwendung der Regelstrategie nach Olesen sind zum Erreichen der Solltemperatur geringe Zusatzenergien, im Wesentlichen zum Kühlen notwendig.

Die in Abbildung 47 und Abbildung 49 dargestellten Aufteilungen der empfundenen Raumtemperaturen während der Arbeitszeit weisen bei der Verwendung der Regelstrategie nach Olesen insbesondere im Zusammenhang mit einer Lüftungsanlage insgesamt höhere empfundenen Raumtemperatur auf.

#### Testreferenzjahr 04, mittlere und hohe thermische Lasten

Die wesentlichen Merkmale beim Vergleich der unterschiedlichen Regelstrategien bei mittleren und hohen thermischen Lasten entsprechen denen bei niedrigen Lasten. Dabei sind die bei den mittleren und hohen Lasten erkennbaren Merkmale insgesamt ausgeprägter, Abbildung 50, Abbildung 52, Abbildung 54 und Abbildung 56. Um die Komfortbedingungen einzuhalten ist bei den mittleren und hohen thermischen Lasten, insbesondere bei der Verwendung einer Lüftungsanlage, ein zusätzlicher Energiebedarf vor allem für die Kühlung der Südbüros nötig. Dieser zusätzliche Energiebedarf kann als Kriterium für die Güte der Regelung angesehen werden und liegt bei der Regelung der Bauteilaktivierung nach dem Algorithmus von Olesen über dem bei der Verwendung der Regelstrategie nach PreCon oder ForReg.

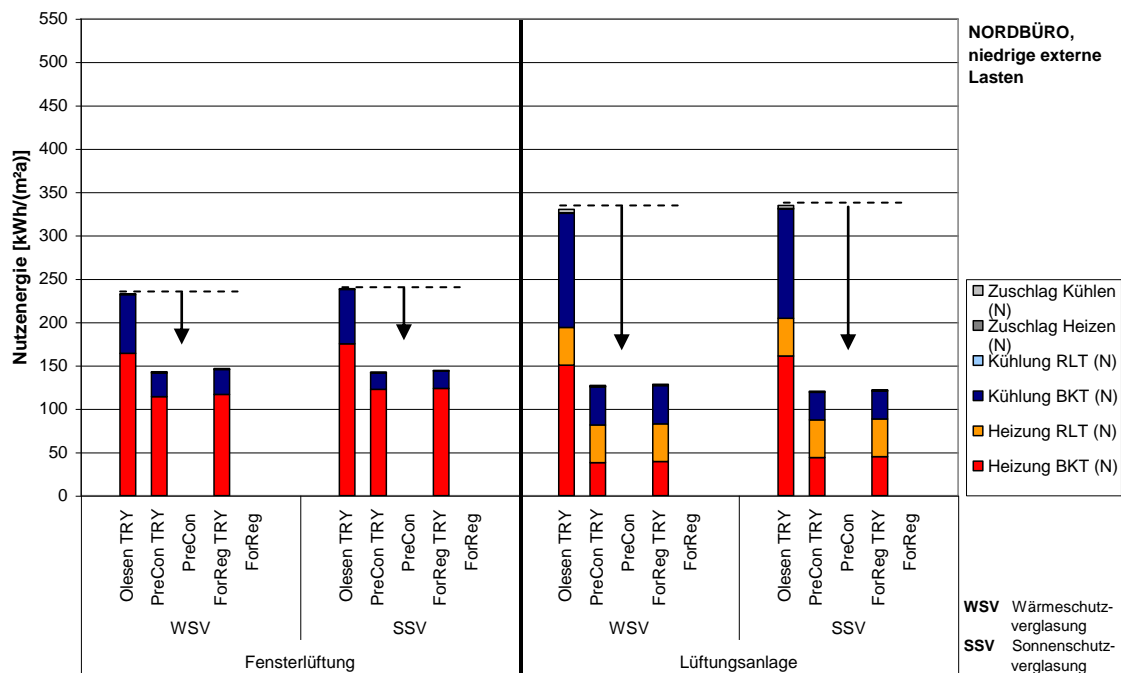
In Abbildung 51, Abbildung 53, Abbildung 55 und Abbildung 57 sind die empfundenen Raumtemperaturen während der Arbeitszeit bei mittleren und hohen thermischen Lasten dargestellt.

Gegenüber der Regelstrategie nach Olesen ergibt sich durch die Verwendung der wetterprognosegeführten Regelstrategien PreCon und ForReg eine deutliche Energieeinsparung sowohl bei der Heiz- als auch bei der Kühlenergie (Abbildung 46, Abbildung 48, Abbildung 50, Abbildung 52, Abbildung 54 und Abbildung 56). Dabei liegen jedoch die empfundenen (operativen) Raumtemperaturen bei Verwendung von wetterprognosegeführten Regelstrategien und einer Fensterlüftung verglichen mit der Regelstrategie nach Olesen deutlich öfter außerhalb eines Bereiches von  $\pm 1$  °C um die Solltemperatur. Im Gegensatz dazu wird der thermische Komfort bei der Ausstattung mit einer Lüftungsanlage besser eingehalten als bei der konventionellen Regelung nach Olesen. Im Nordbüro sind die Abweichungen bei PreCon, im Südbüro die bei der Verwendung von ForReg größer. Diese Tendenz verstärkt sich bei mittleren Lasten bis zu einer max. Abweichungen bei hohen Lasten, siehe Abbildung 47, Abbildung 49, Abbildung 51, Abbildung 53, Abbildung 55 und Abbildung 57. Bei hohen Lasten liegt die Anzahl der Überhitzungsstunden bei einer Fensterlüftung bei PreCon allgemein unter der von ForReg aber stets über dem Wert für die Regelstrategie nach Olesen. Grundsätzlich ist die errechnete Energieeinsparung bei PreCon gegenüber ForReg um einige Prozent größer. Im direkten Vergleich zwischen PreCon und ForReg weist PreCon jedoch größere Abweichungen bei der Unterschreitung der Solltemperatur auf. Die Verwendung von ForReg bedingt demgegenüber mehr Überhitzungsstunden. Der gegenüber ForReg etwas geringere Energiebedarf bei PreCon fällt mit den vermehrten Unterschreitungen der Solltem-

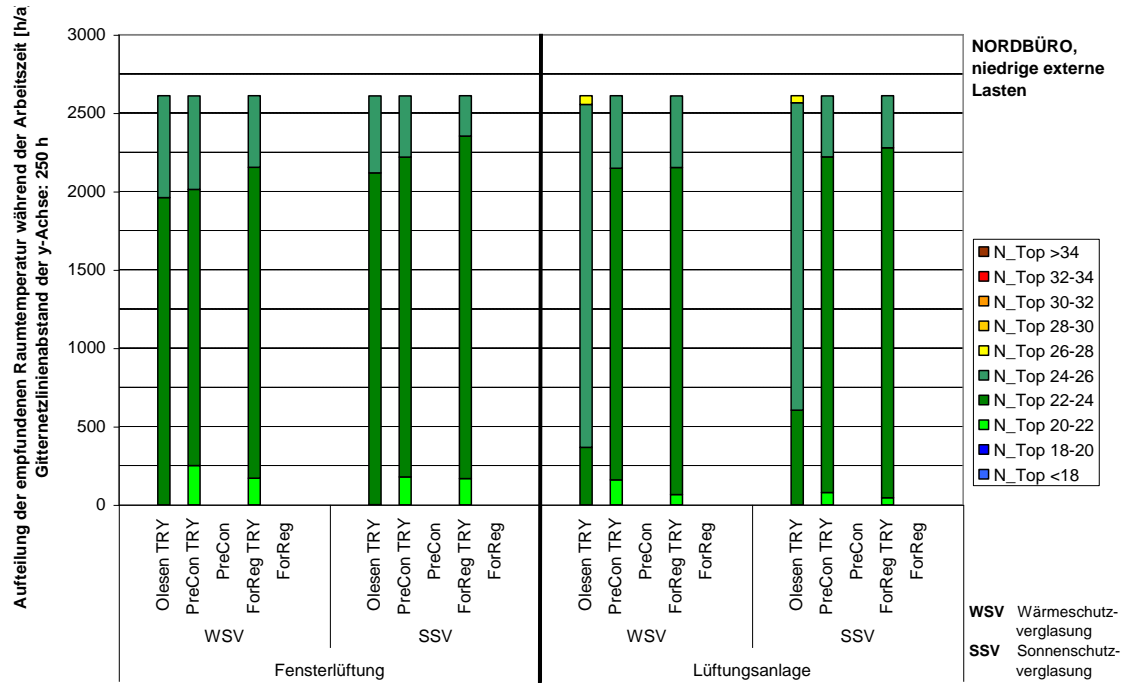
peratur zusammen. Neben dem Energiebedarf wird die Verteilung der empfundenen Raumtemperaturen gemäß Abbildung 47, Abbildung 49, Abbildung 51, Abbildung 53, Abbildung 55 und Abbildung 57 ein wesentliches Kriterium bei der Entscheidung für oder gegen eine Regelstrategie darstellen.

### Fazit

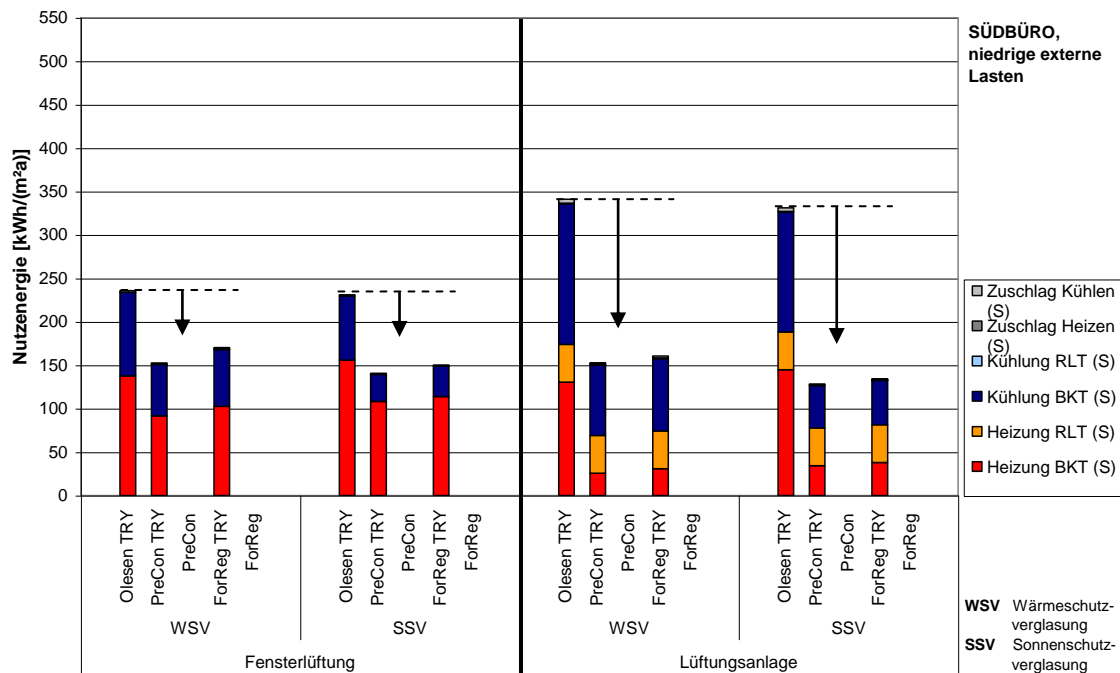
Ein reduzierter Energiebedarf ist grundsätzlich mit Abweichungen zum thermischen Komfort, bei PreCon insbesondere mit der Unterschreitung der Solltemperatur und bei ForReg an Überhitzungsstunden gekoppelt. Wie im vorangegangenen Kapitel diskutiert ist es formal nicht korrekt die unterschiedlichen Energiebedarfswerte ohne Angabe der jeweiligen Abweichungen von der Solltemperatur miteinander zu vergleichen. Auch wenn bei einem Vergleich die Energiebedarfswerte und die zugehörigen Abweichungen zur Solltemperatur parallel betrachtet werden, ergibt sich die Schwierigkeit diese schon durch ihre physikalischen Einheiten nicht vergleichbaren Größen miteinander zu verbinden oder gegeneinander abzuwägen.



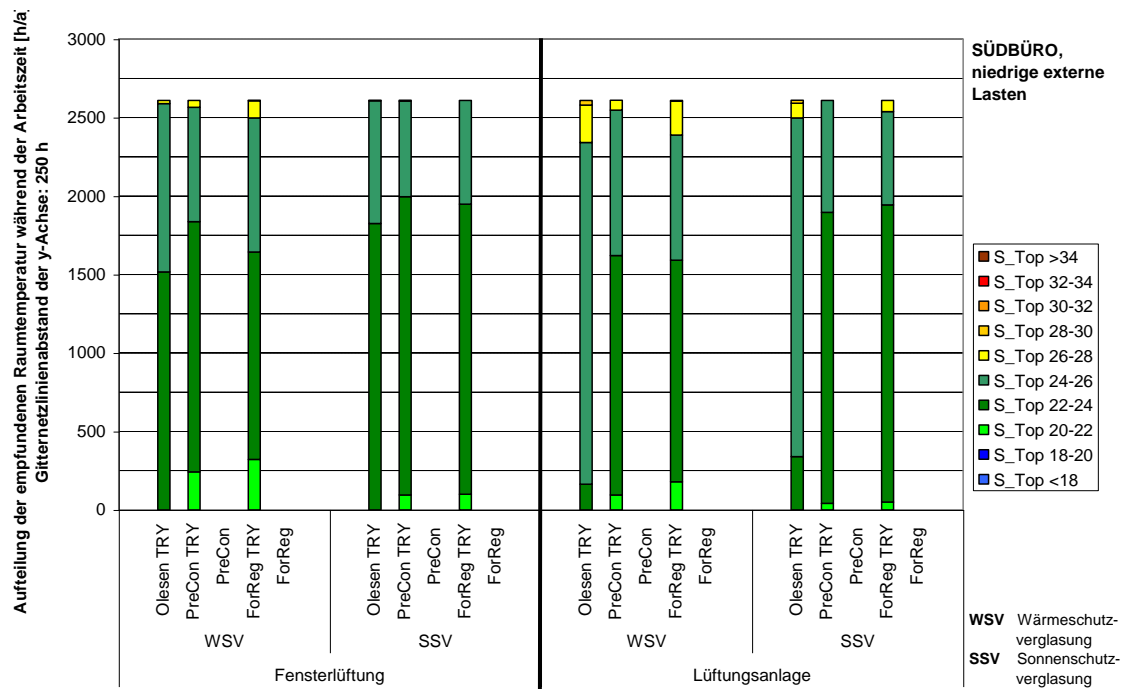
**Abbildung 46:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführten Regelungen, niedrige externe therm. Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



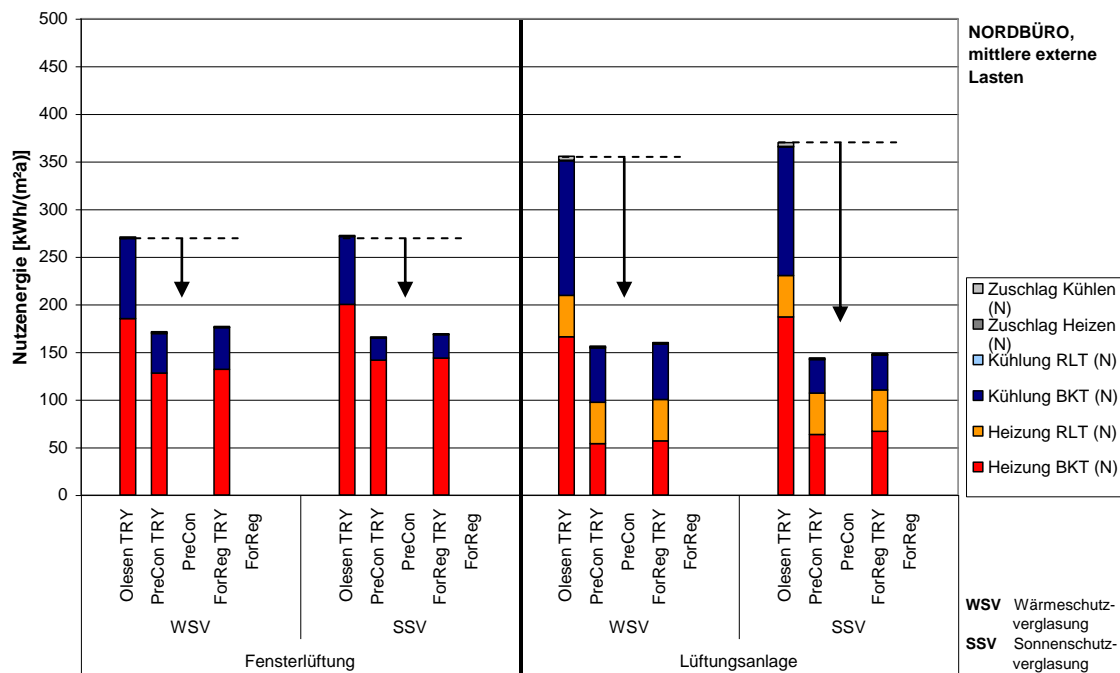
**Abbildung 47:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, niedrige externe th. Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



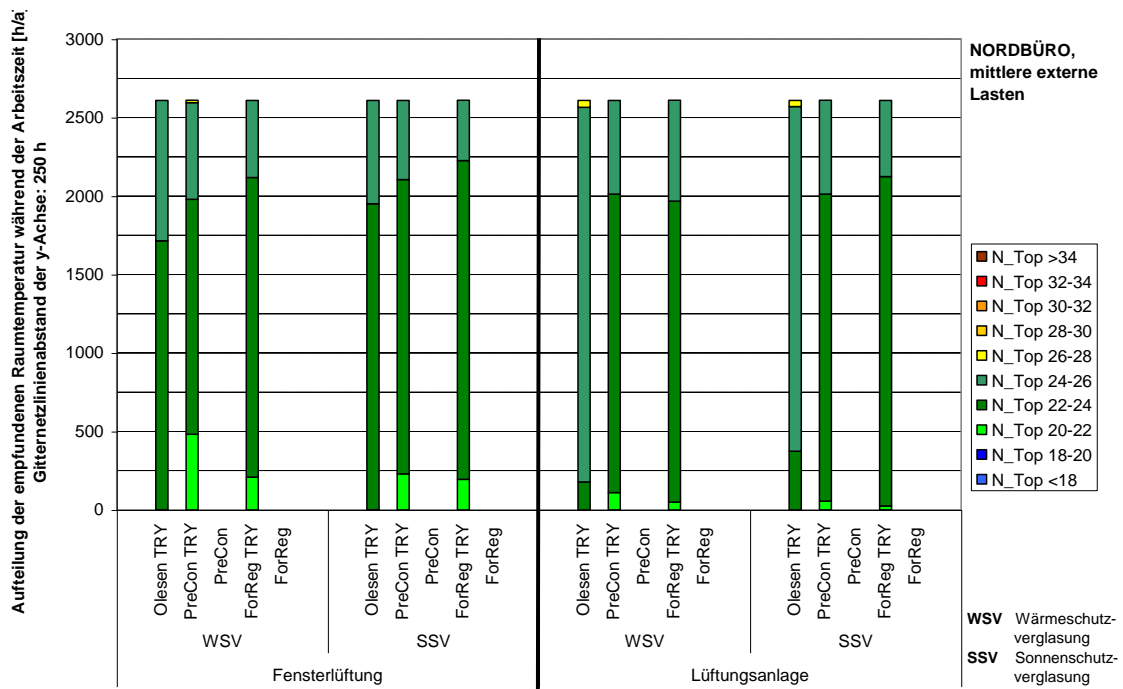
**Abbildung 48:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, niedrige externe therm. Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



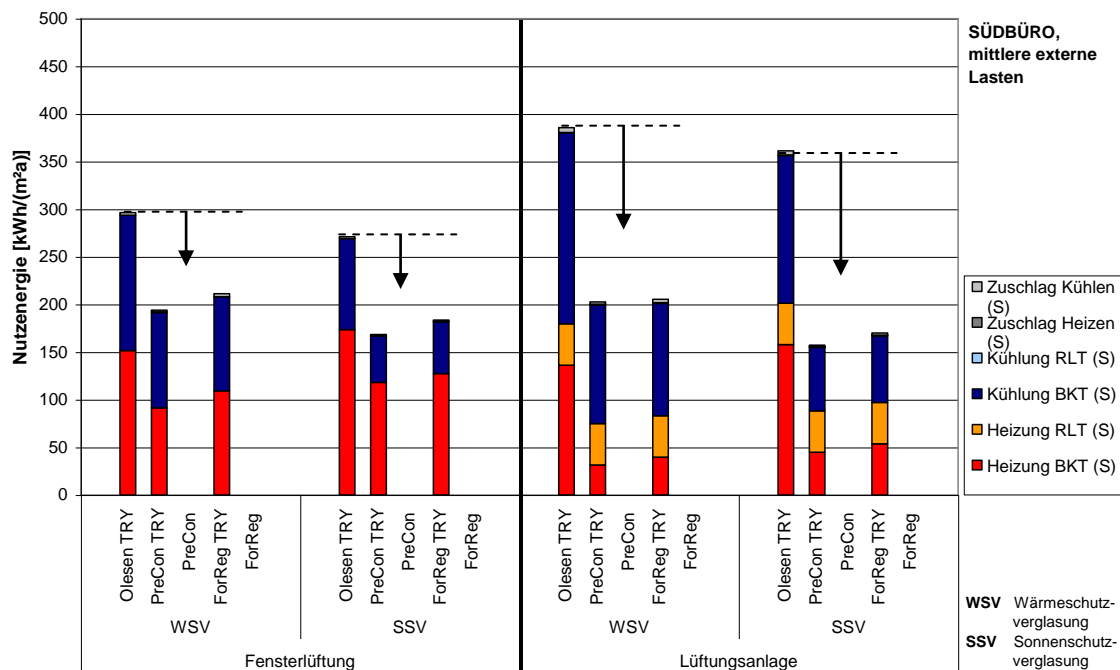
**Abbildung 49:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, niedrige externe th. Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



**Abbildung 50:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, mittlere externe therm. Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"

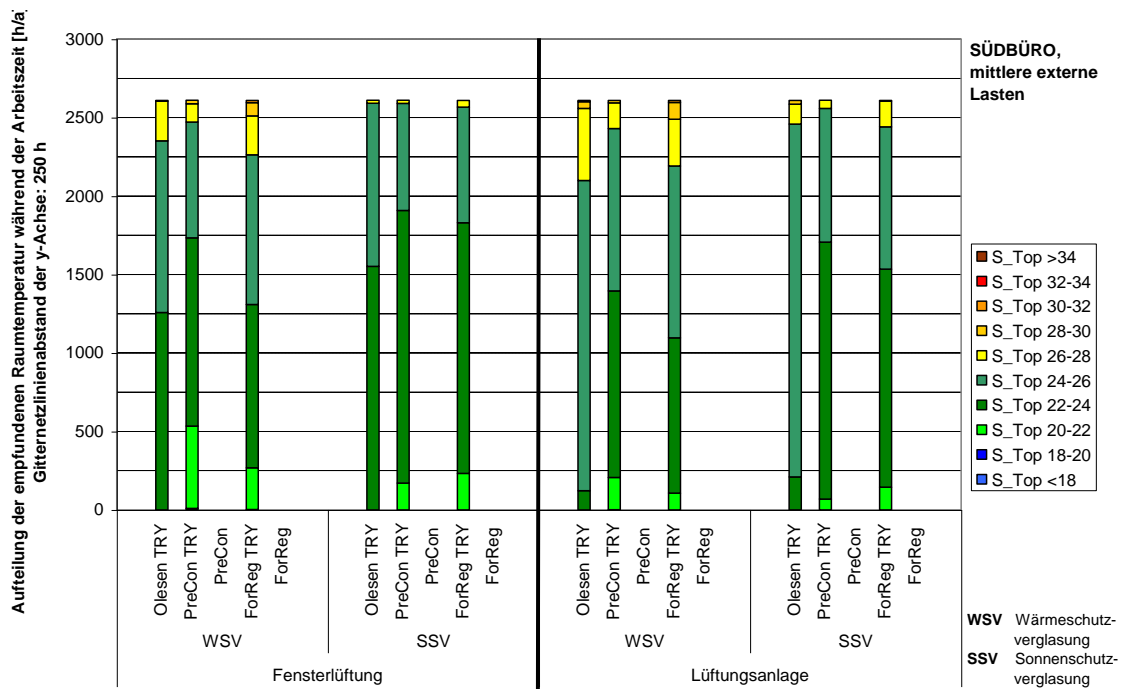


**Abbildung 51:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, mittlere externe th. Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"

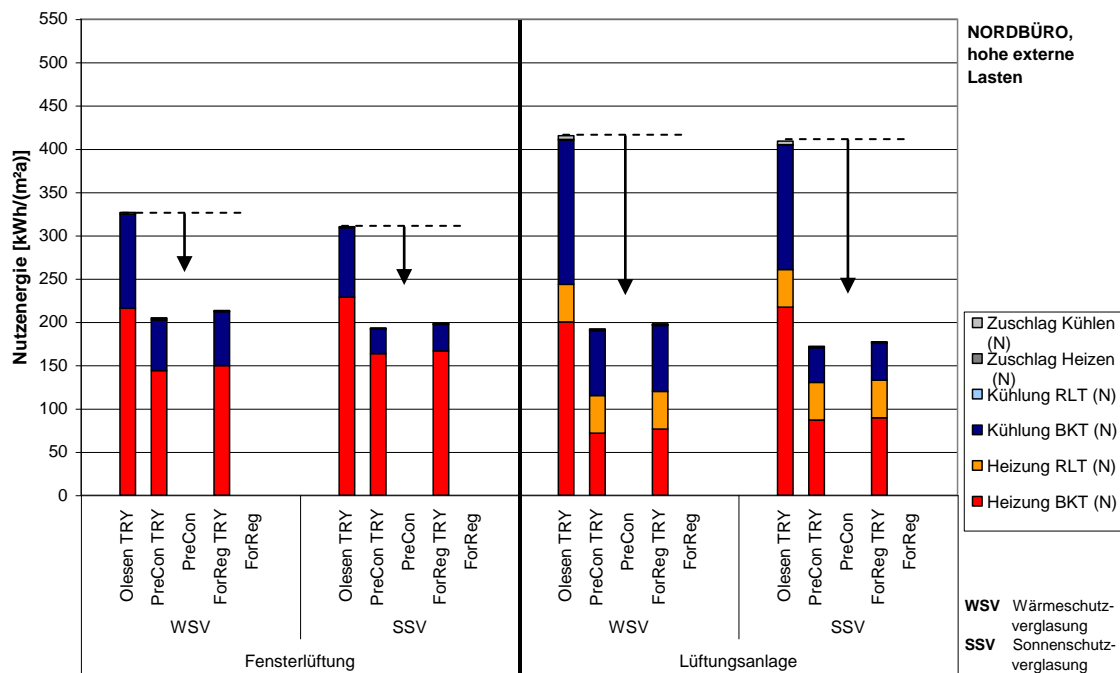


**Abbildung 52:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, mittlere externe therm. Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"

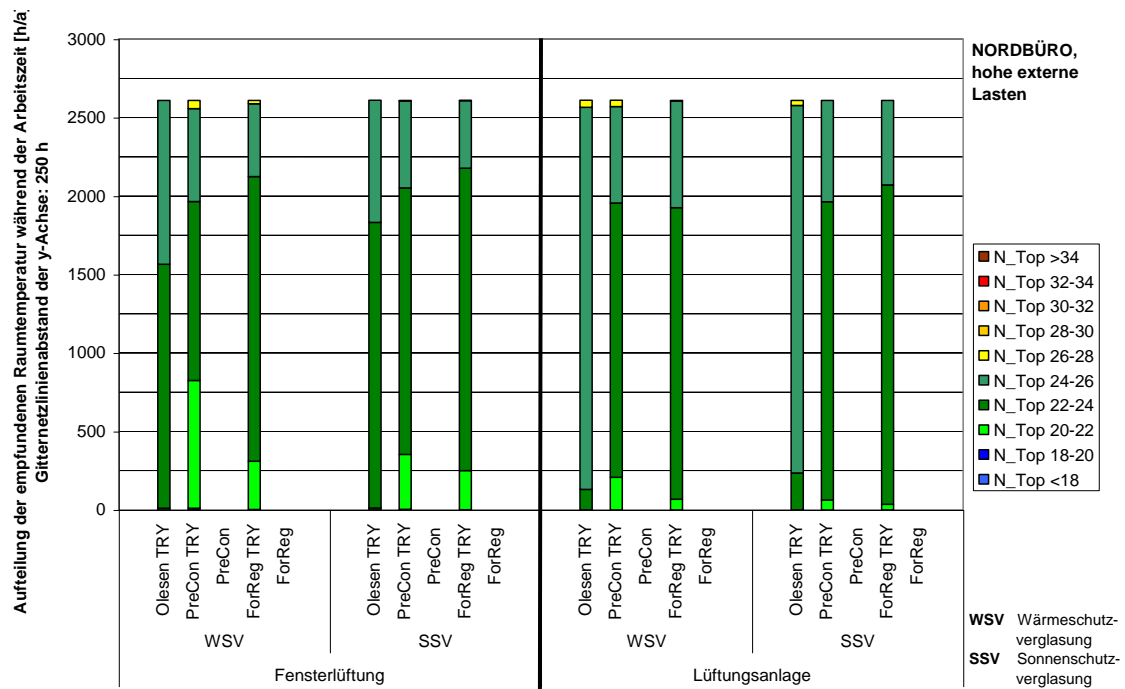




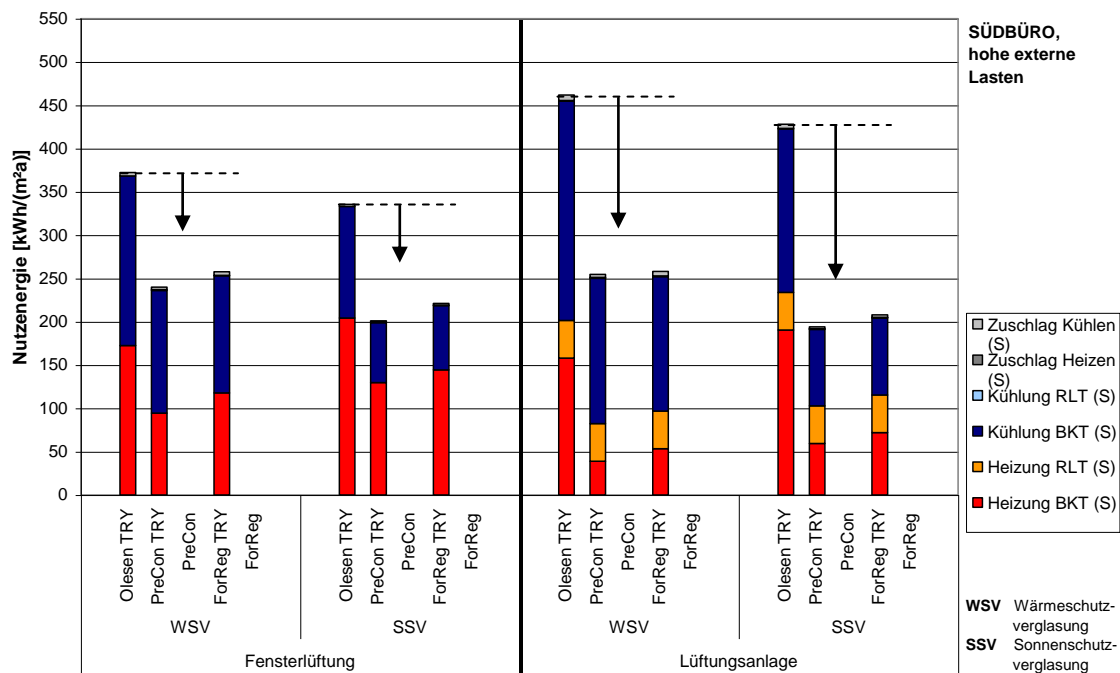
**Abbildung 53:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, mittlere externe th. Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



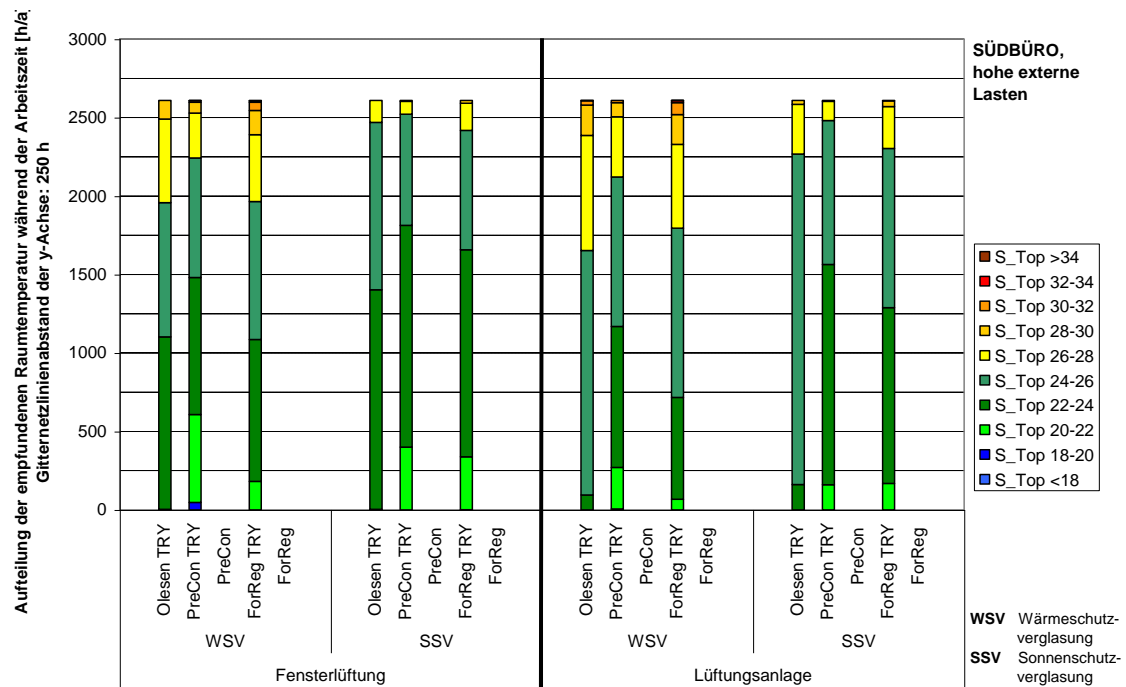
**Abbildung 54:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, hohe externe therm. Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



**Abbildung 55:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, hohe externe therm. Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



**Abbildung 56:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, hohe externe therm. Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"



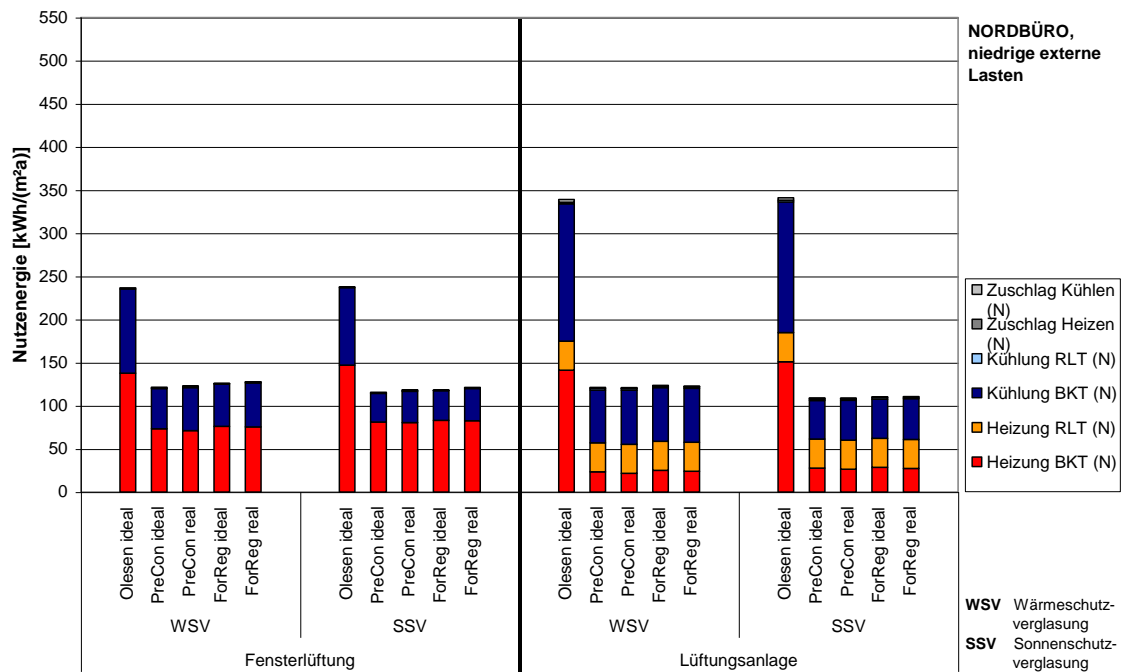
**Abbildung 57:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, hohe externe therm. Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Testreferenzjahr TRY 04 "Nordostdeutsche Tiefland"

#### 6.4.4. Wetterdaten und Prognosen Hamburg, Berlin und Mannheim

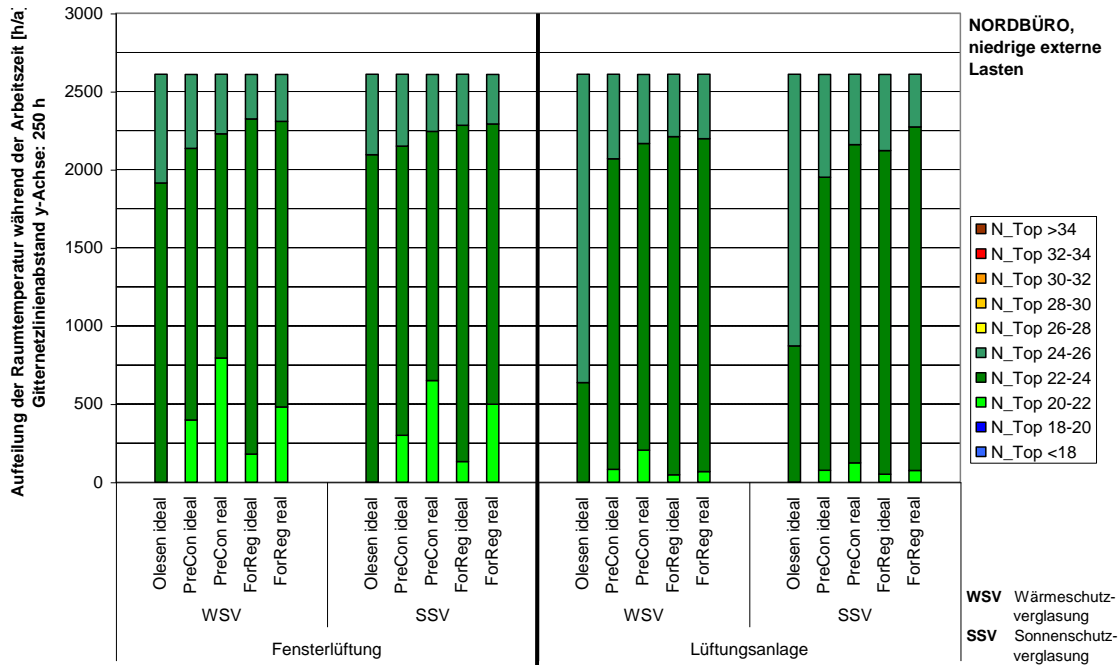
Auch bei den Berechnungen mit realen Wetterdaten von 2003 und 2004 für die Standorte Hamburg, Berlin und Mannheim ist die Energieeinsparung bei der Verwendung von PreCon oder ForReg signifikant. Der Vergleich zwischen idealen und einer realen Wetterprognose ist recht ausgeglichen, sodass festgestellt werden kann, dass übliche in der Praxis auftretende Prognosefehler keinen erheblichen Einfluss haben. Für das Nordbüro ergeben sich bei der Verwendung von ForReg auch bei hohen Lasten gegenüber PreCon geringere Abweichungen von der Solltemperatur. Für das Südbüro sind die Abweichungen deutlich größer und liegen auch stets über denen von Olesen. Wie bei der Verwendung des Testreferenzjahres 04 erscheint PreCon besser für das Südbüro und ForReg besser für das Nordbüro geeignet, siehe Abbildung 58 bis Abbildung 61. Die Verhältnisse im Jahr 2004 entsprechen im Wesentlichen denen im Jahr 2003, siehe Kapitel 6.1.

Die grundsätzliche Energieeffizienz der verwendeten Regelstrategien für die jeweiligen Varianten kann sowohl für die Beheizung als auch für die Kühlung der Büros aus der benötigten Nutzenergie abgeleitet werden. Die in den Graphiken grau dargestellten Segmente innerhalb der Balken repräsentieren die zusätzlich benötigte Nutzenergie, die zum Erreichen der Sollraumtemperatur zugeführt bzw. abgeführt werden muss. Zusammen mit den empfundenen Raumtemperaturen (siehe entsprechende Abbildungen) bieten die zusätzlich benötigten Energien ein Maß für die Güte der Regelstrategien und den zu erwartenden thermischen Komfort. Nachfolgend sind beispielhaft Ergebnisse mit guter Regelgüte und die damit verbundenen Nutzenergieverbräuche und empfundenen Raumtemperaturen dargestellt, siehe Abbildung 58 und Abbildung 59.

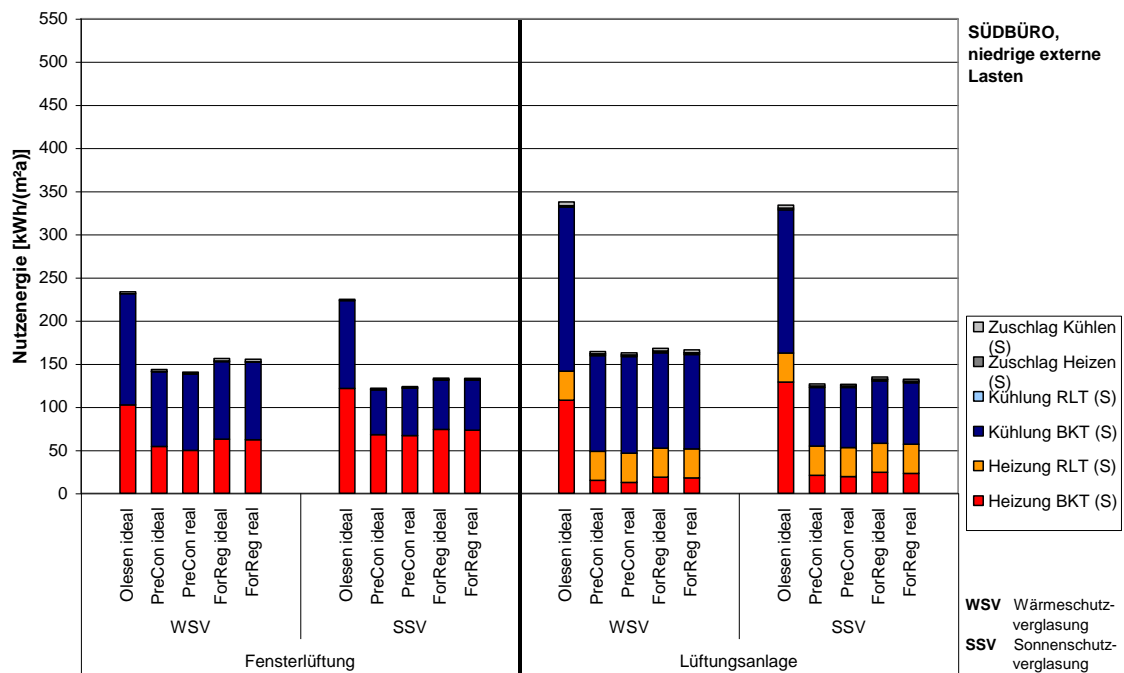
In den Abbildung 64 und Abbildung 65, Abbildung 68 und Abbildung 69 sowie Abbildung 72 und Abbildung 73 sind Beispiele von entsprechenden Verhältnissen für geringere Regelgüten mit größeren Abweichungen zur Sollraumtemperatur und damit größeren zusätzlich benötigten Energien zum Erreichen dieser Solltemperatur dargestellt. Auch hier sind zur Beachtung des erzielten thermischen Komforts die empfundenen Raumtemperaturen zu beachten.



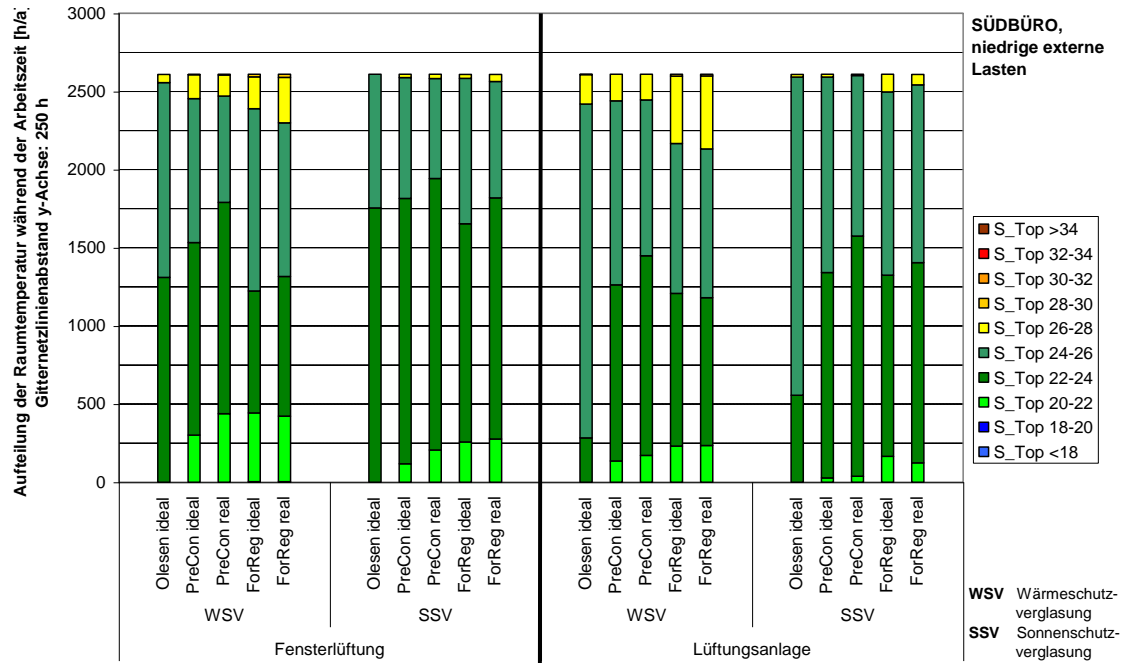
**Abbildung 58:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, niedrige externe thermische Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004



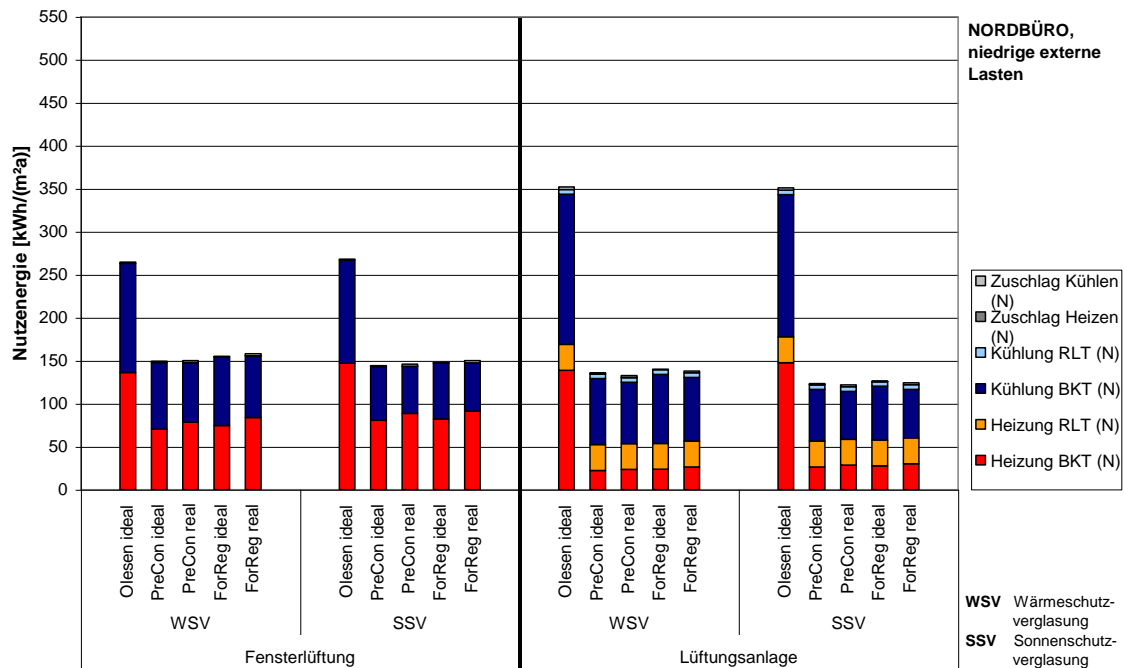
**Abbildung 59:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, niedrige externe thermische Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004



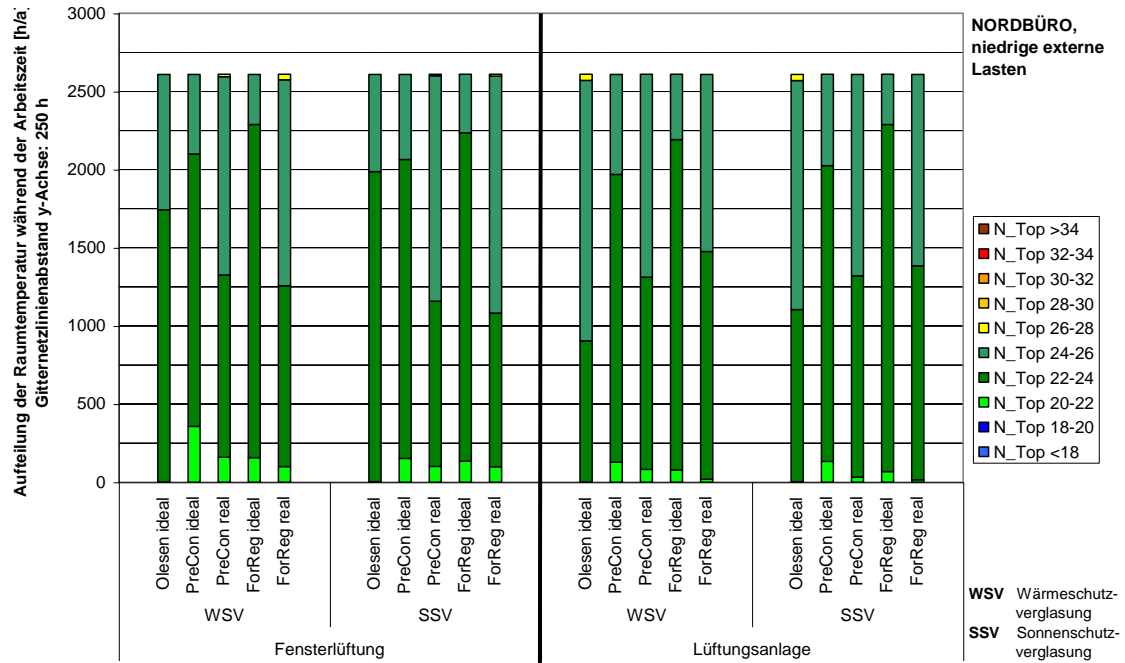
**Abbildung 60:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, niedrige externe thermische Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004



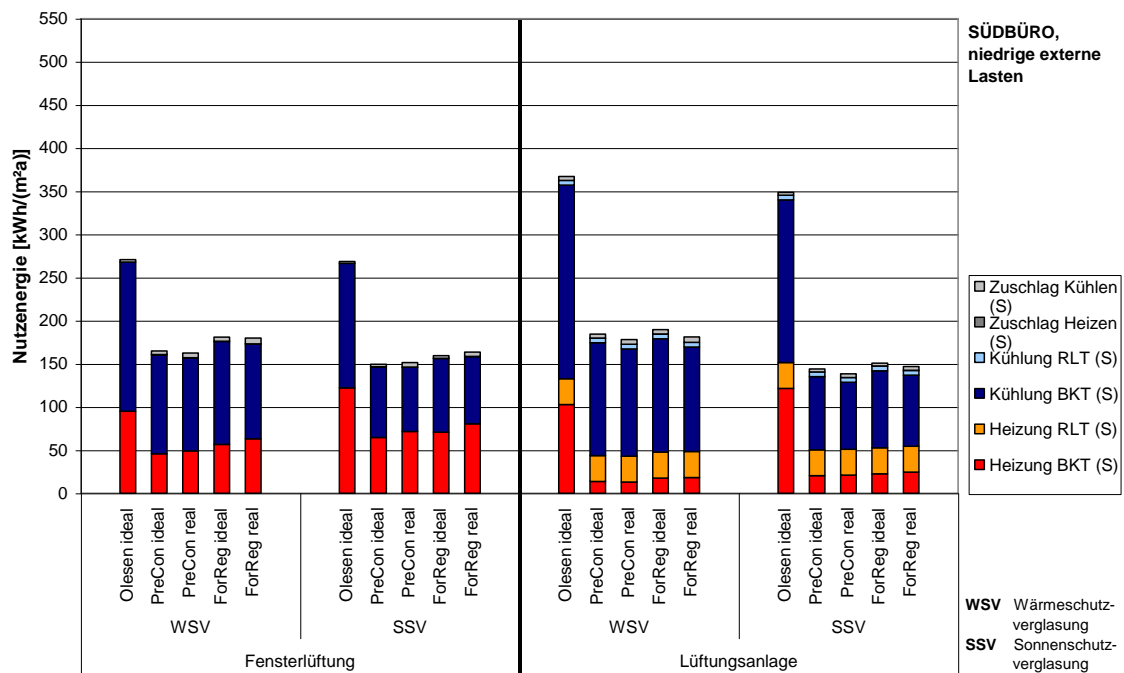
**Abbildung 61:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, niedrige externe thermische Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004



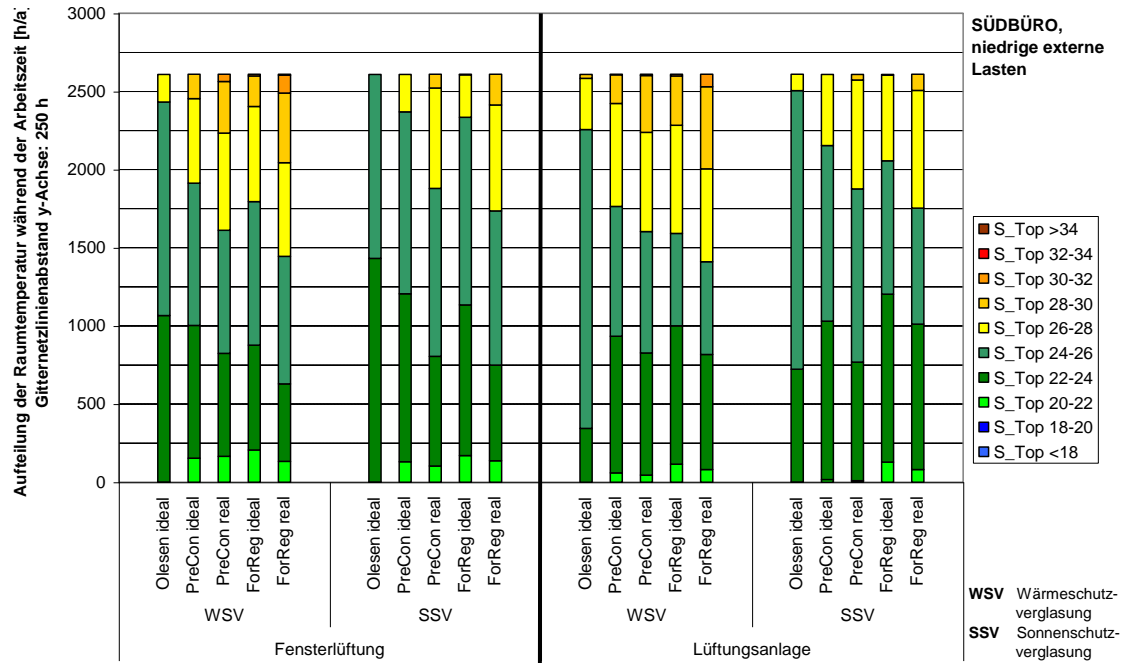
**Abbildung 62:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, niedrige externe thermische Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003



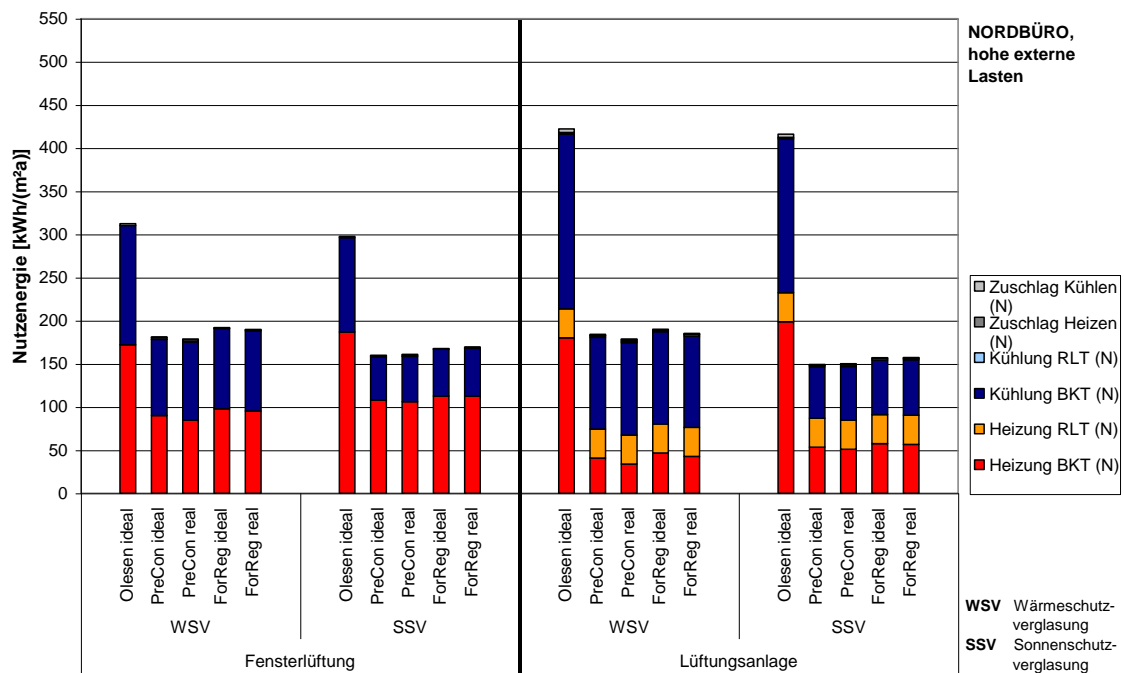
**Abbildung 63:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, niedrige externe thermische Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003



**Abbildung 64:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, niedrige externe thermische Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003

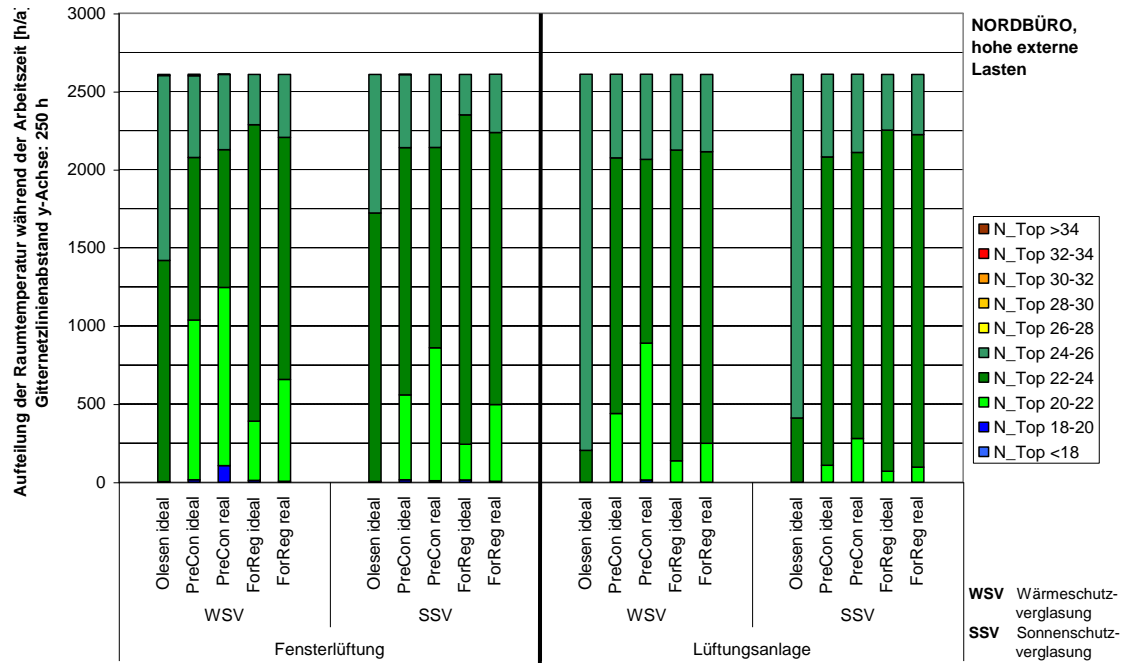


**Abbildung 65:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, niedrige externe thermische Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003

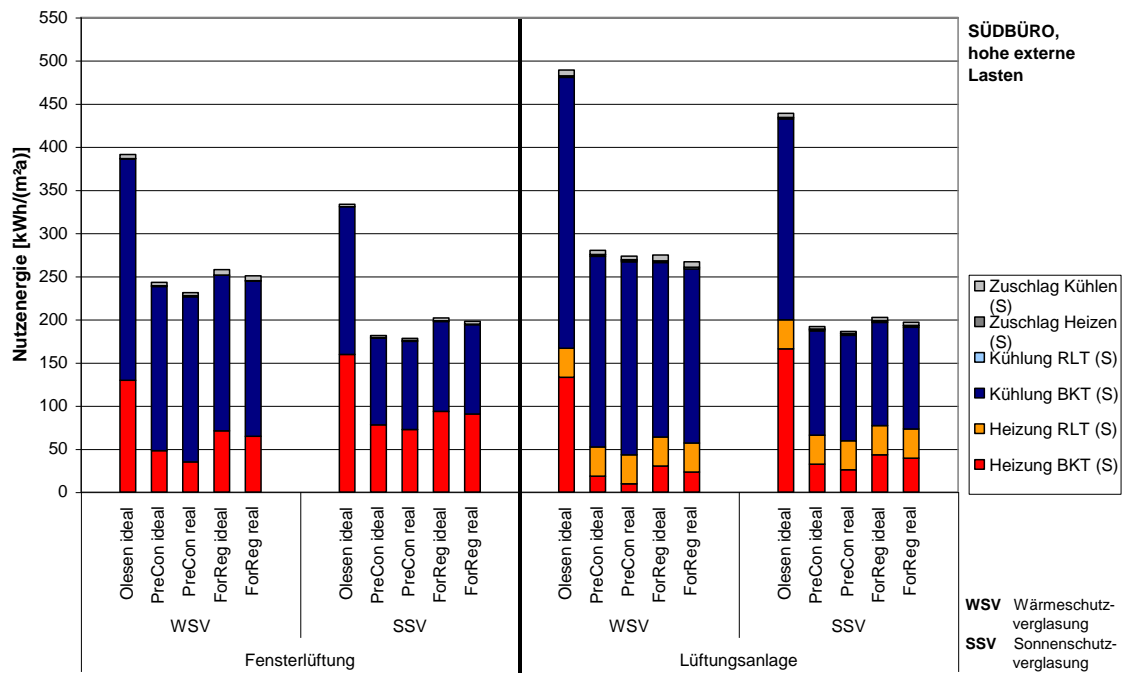


**Abbildung 66:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, hohe externe thermische Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004

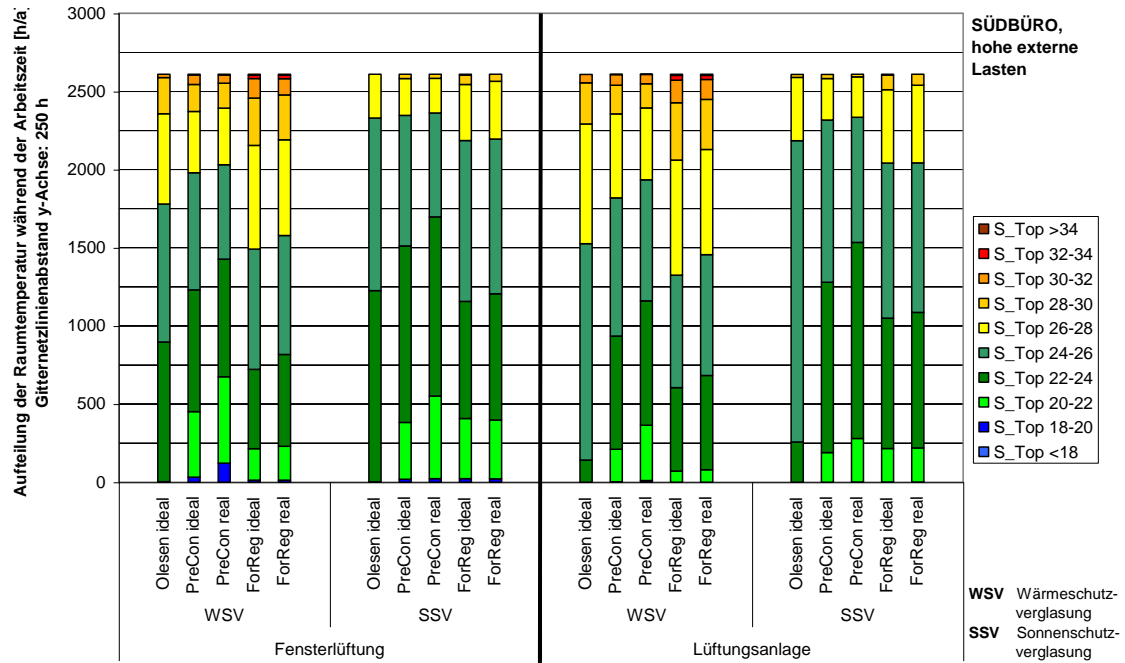




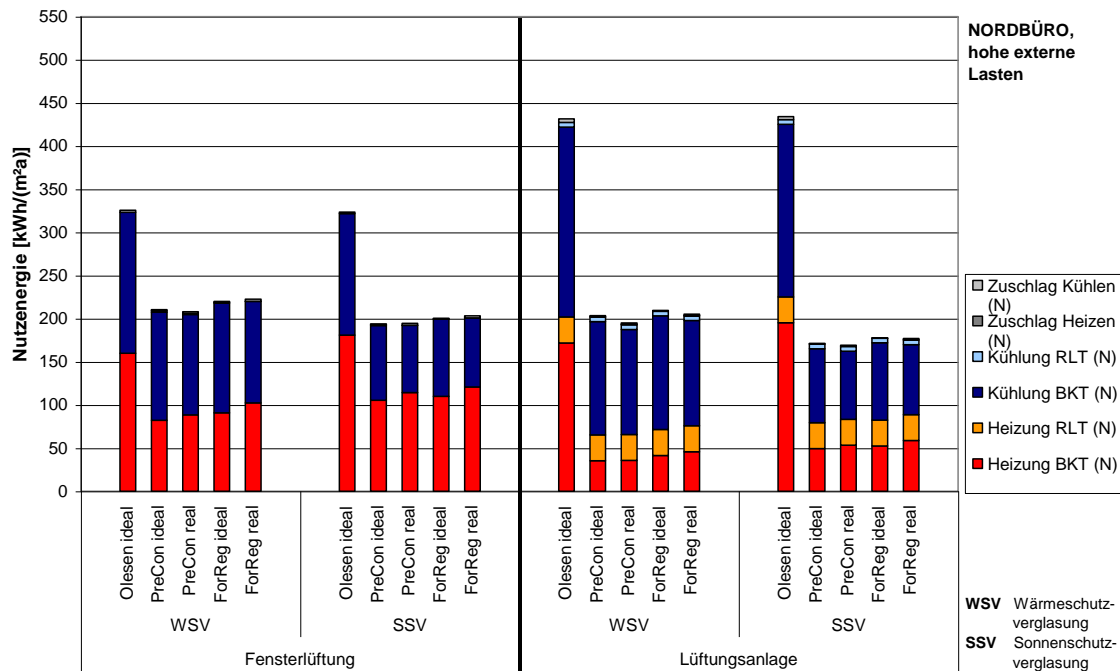
**Abbildung 67:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, hohe externe thermische Lasten, Nordbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004



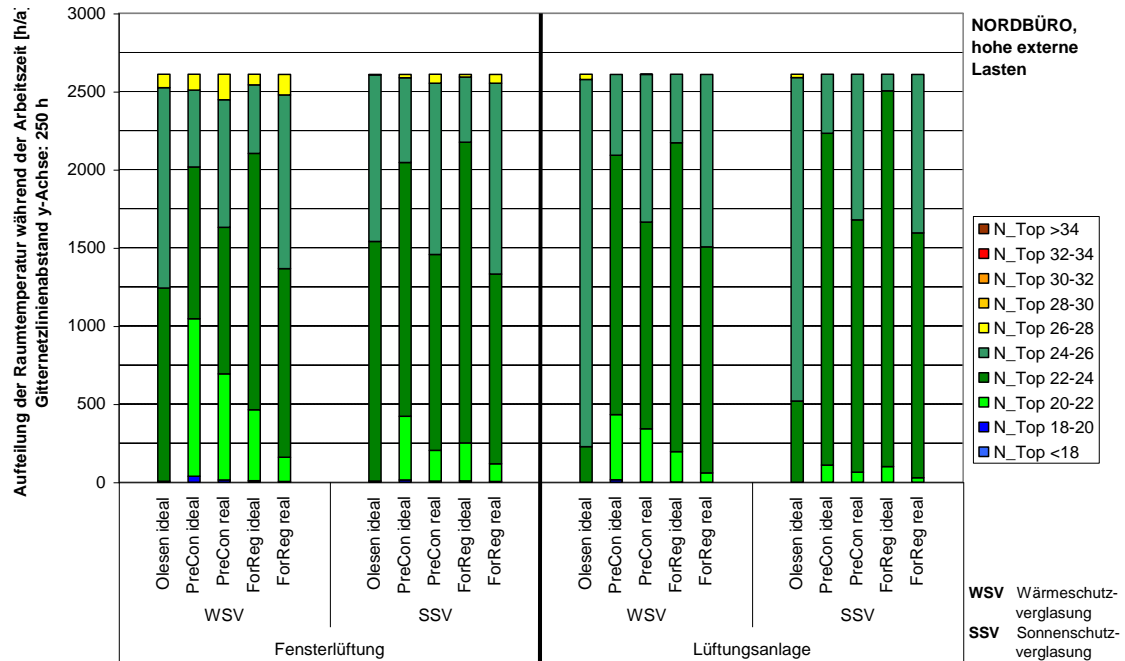
**Abbildung 68:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführten Regelungen, hohe externe thermische Lasten, Südbüro, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004



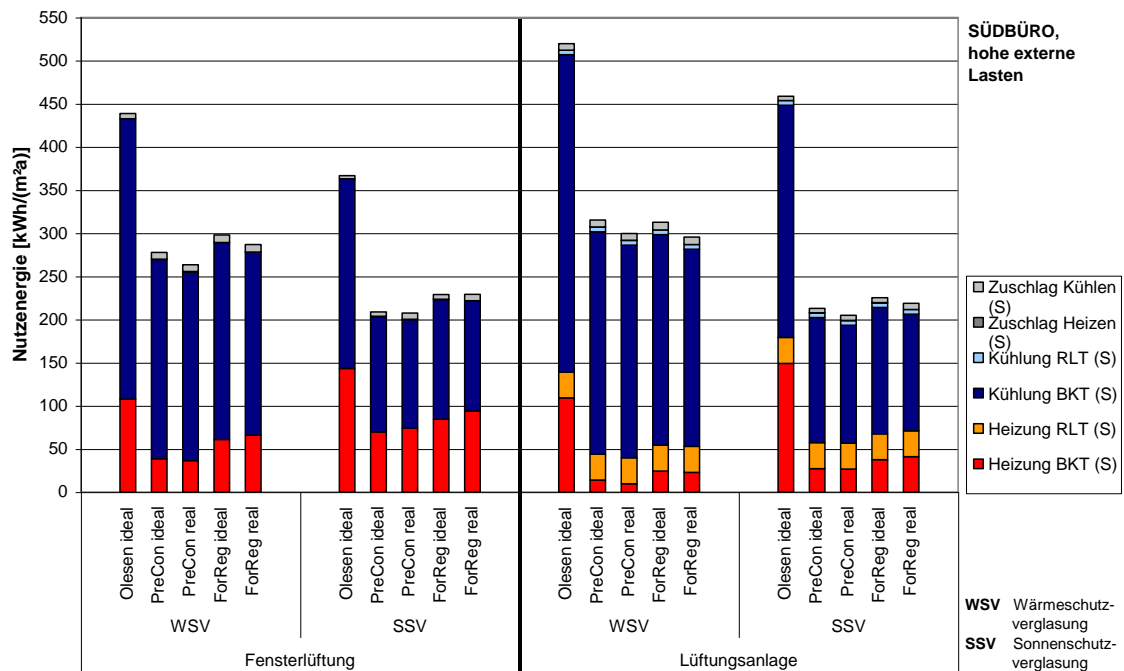
**Abbildung 69:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, **hohe** externe thermische Lasten, **Südbüro**, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2004



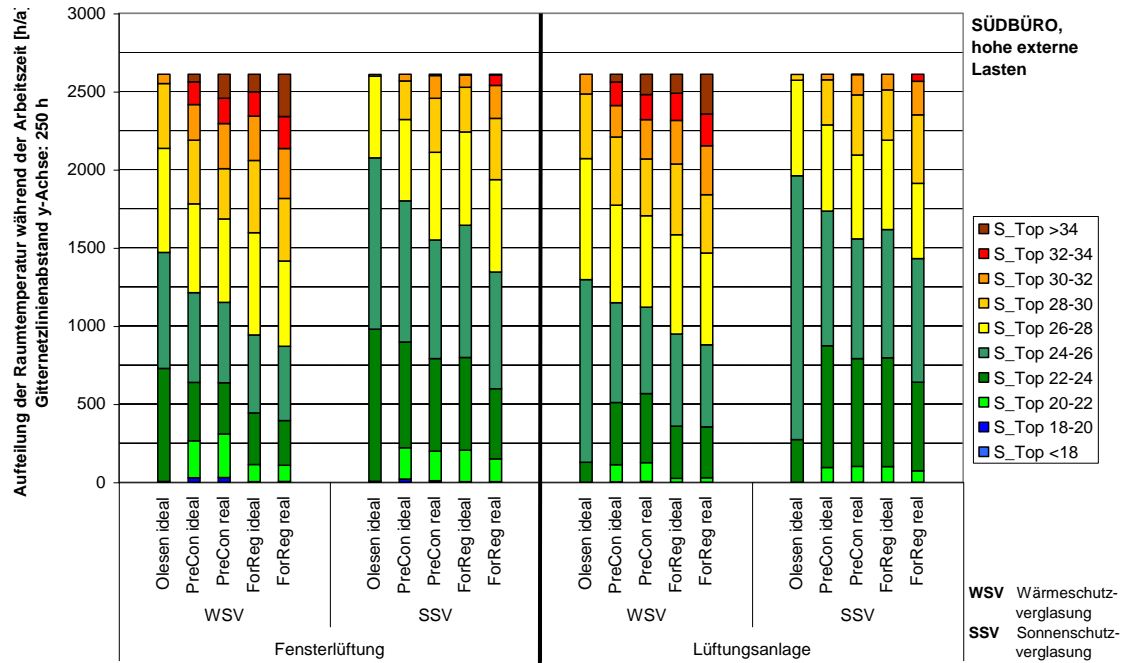
**Abbildung 70:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführten Regelungen, **hohe** externe thermische Lasten, **Nordbüro**, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003



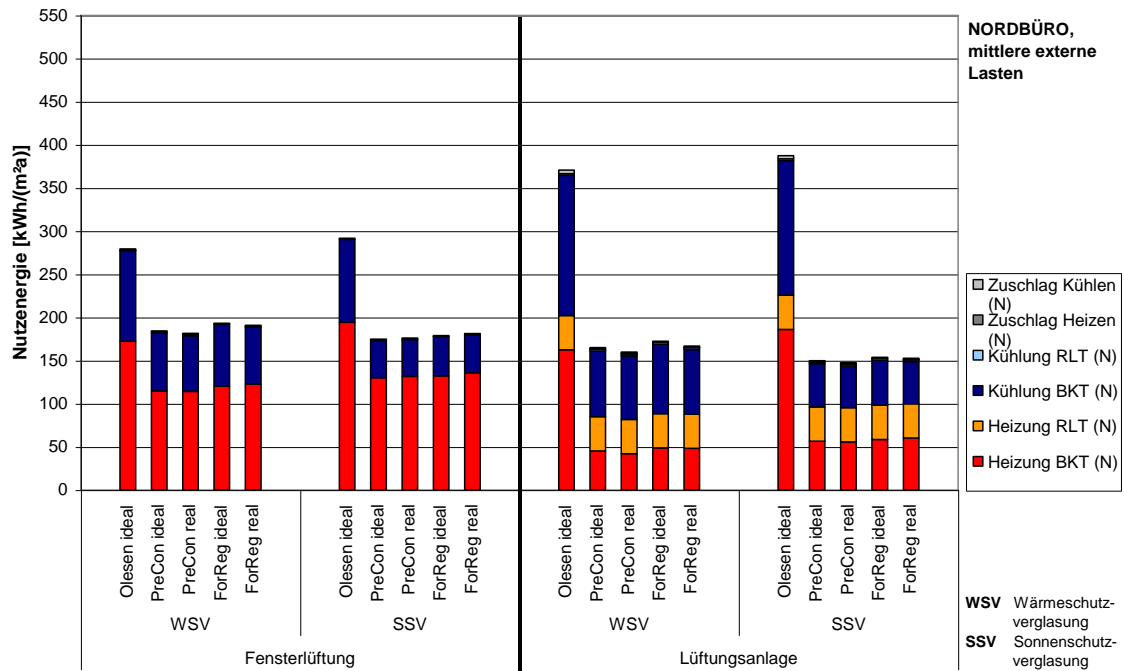
**Abbildung 71:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, **hohe** externe thermische Lasten, **Nordbüro**, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003



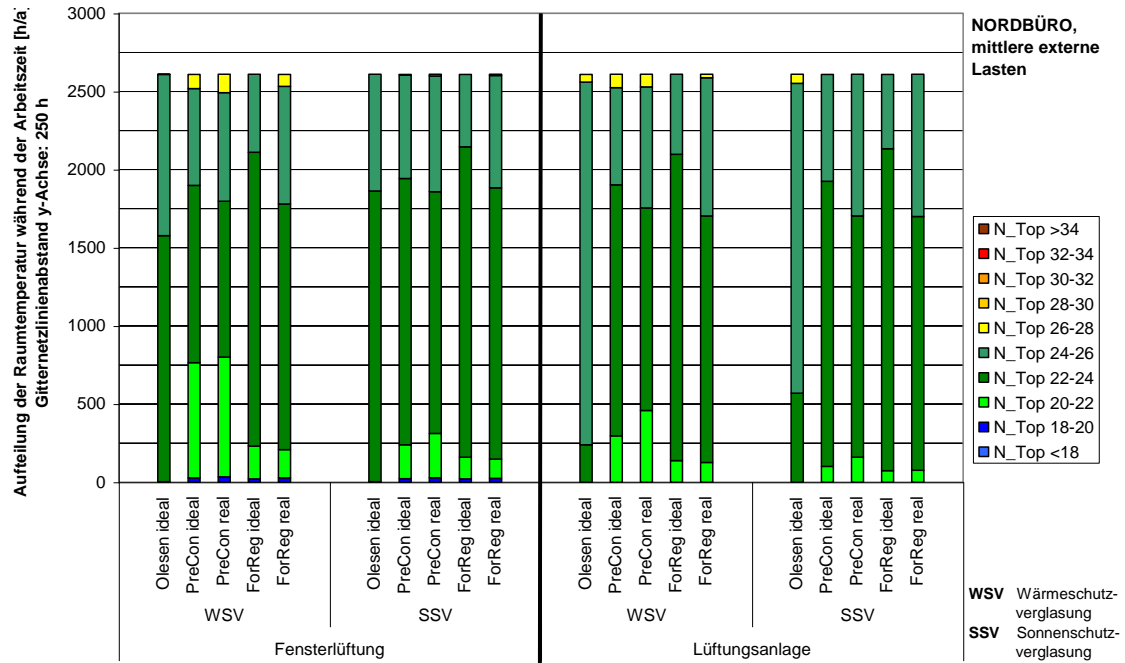
**Abbildung 72:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführten Regelungen, **hohe** externe thermische Lasten, **Südbüro**, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003



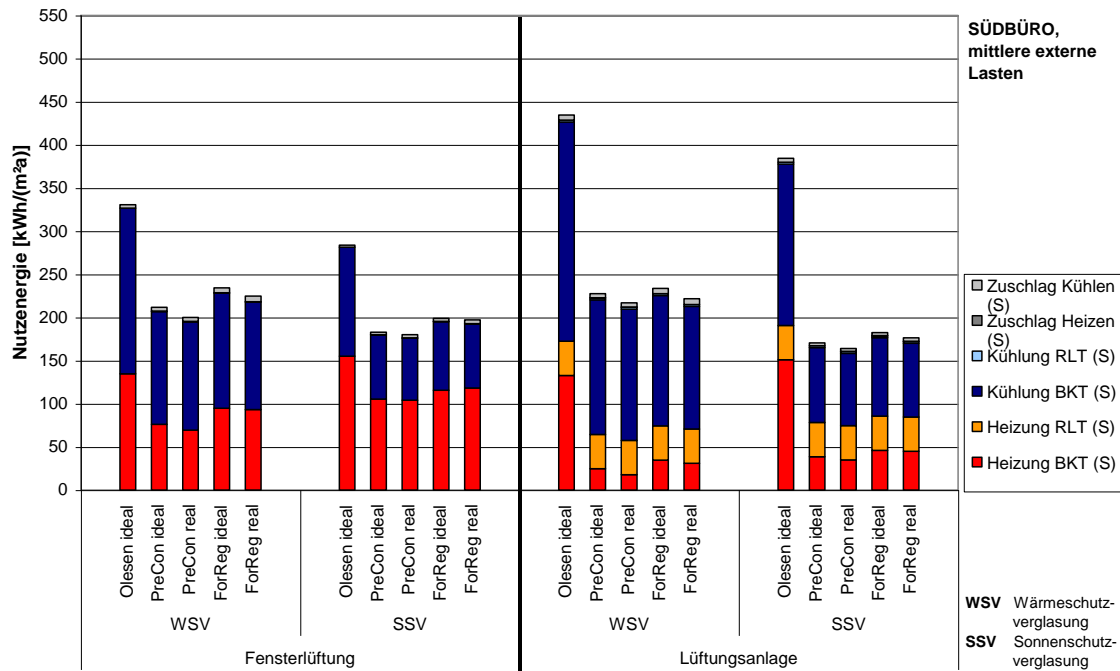
**Abbildung 73:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, **hohe** externe thermische Lasten, **Südbüro**, Wetterdaten: Messdaten Mannheim, 2003



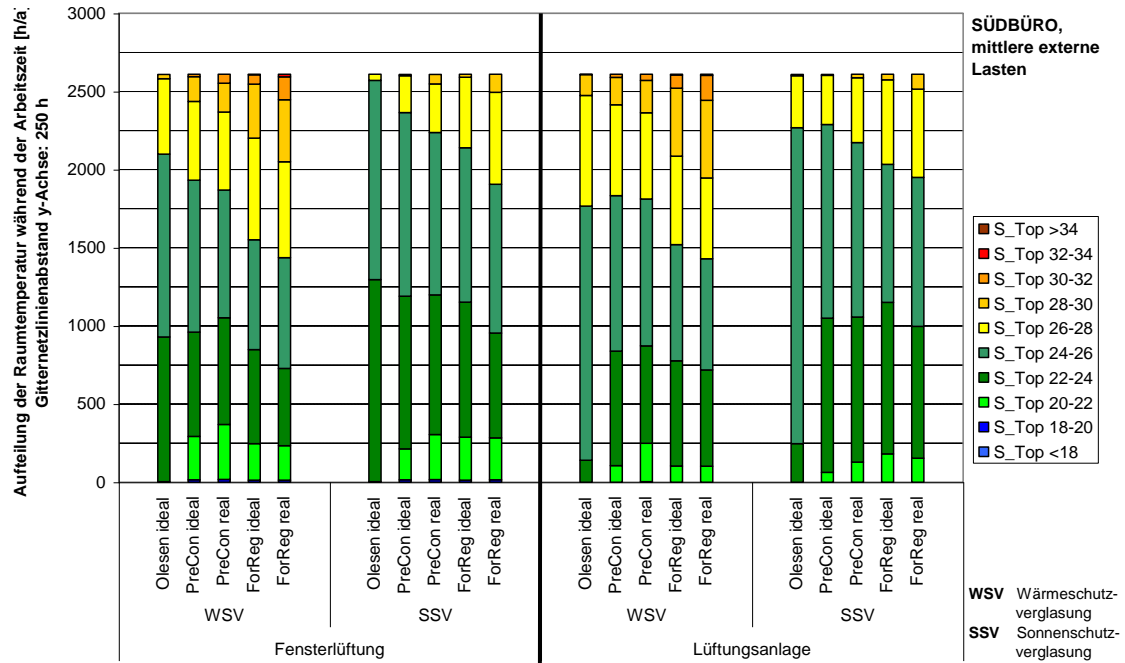
**Abbildung 74:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführten Regelungen, **mittlere** externe thermische Lasten, **Nordbüro**, Wetterdaten: Messdaten Berlin, 2003



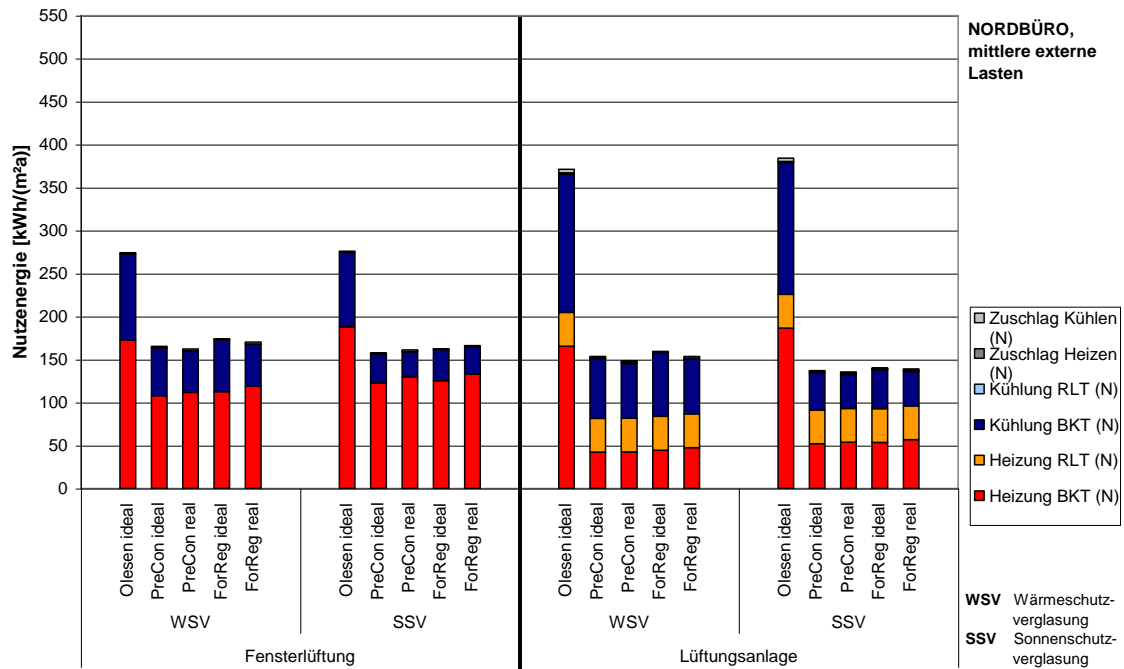
**Abbildung 75:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, **mittlere** externe thermische Lasten, **Nordbüro**, Wetterdaten: Messdaten Berlin, 2003



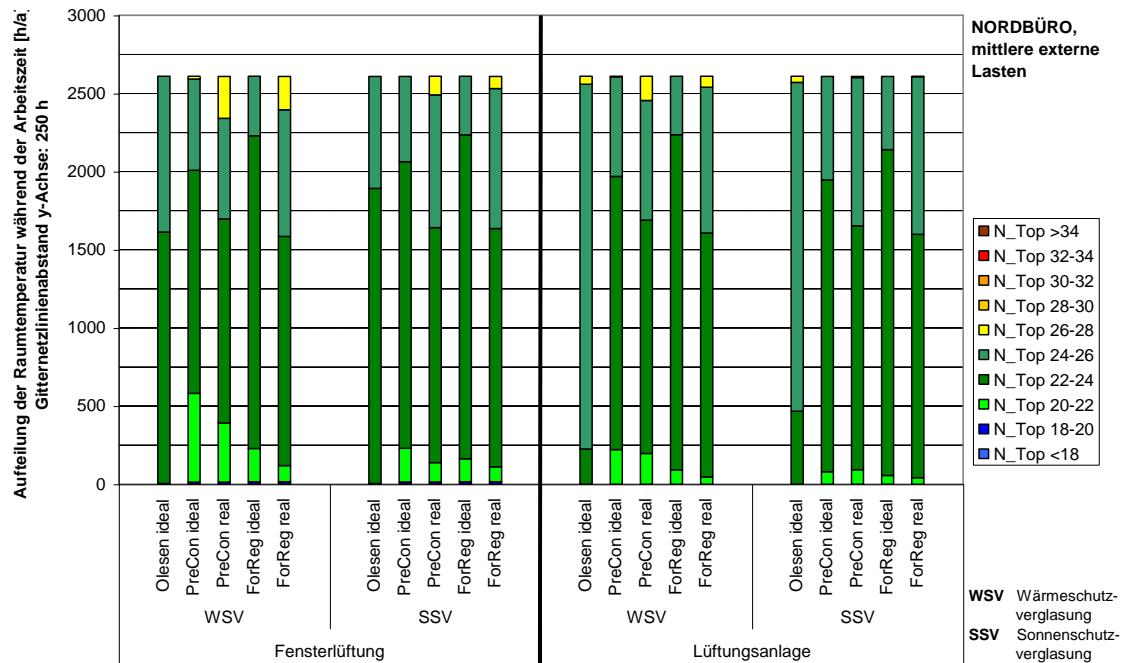
**Abbildung 76:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführten Regelungen, **mittlere** externe thermische Lasten, **Südbüro**, Wetterdaten: Messdaten Berlin, 2003



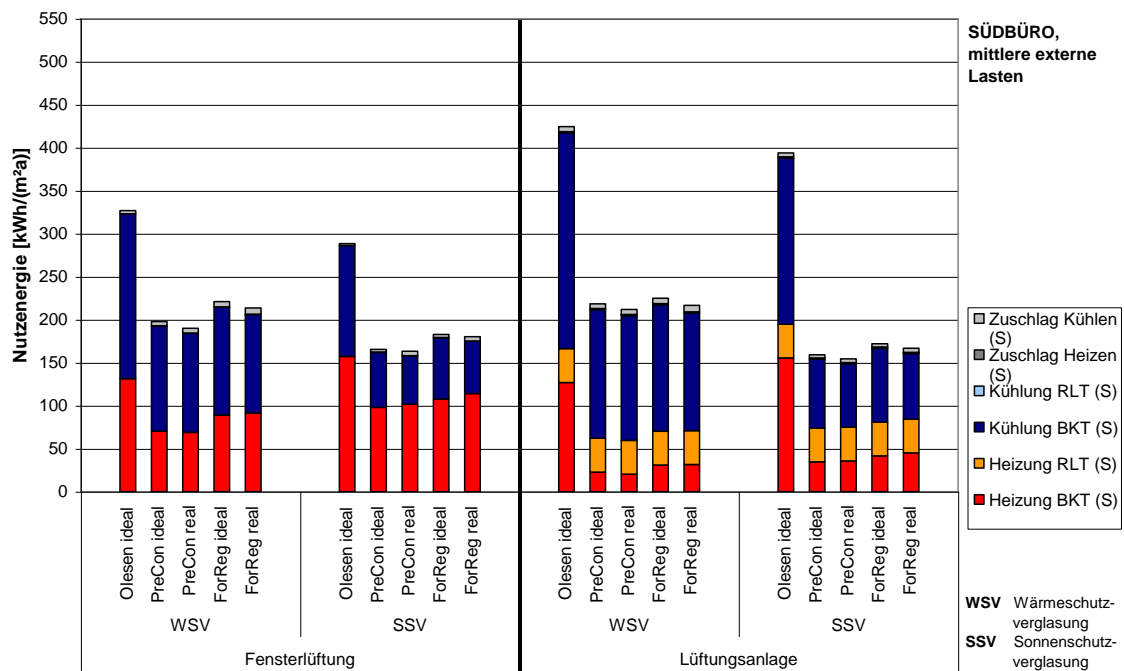
**Abbildung 77:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, **mittlere** externe thermische Lasten, **Südbüro**, Wetterdaten: Messdaten Berlin, 2003



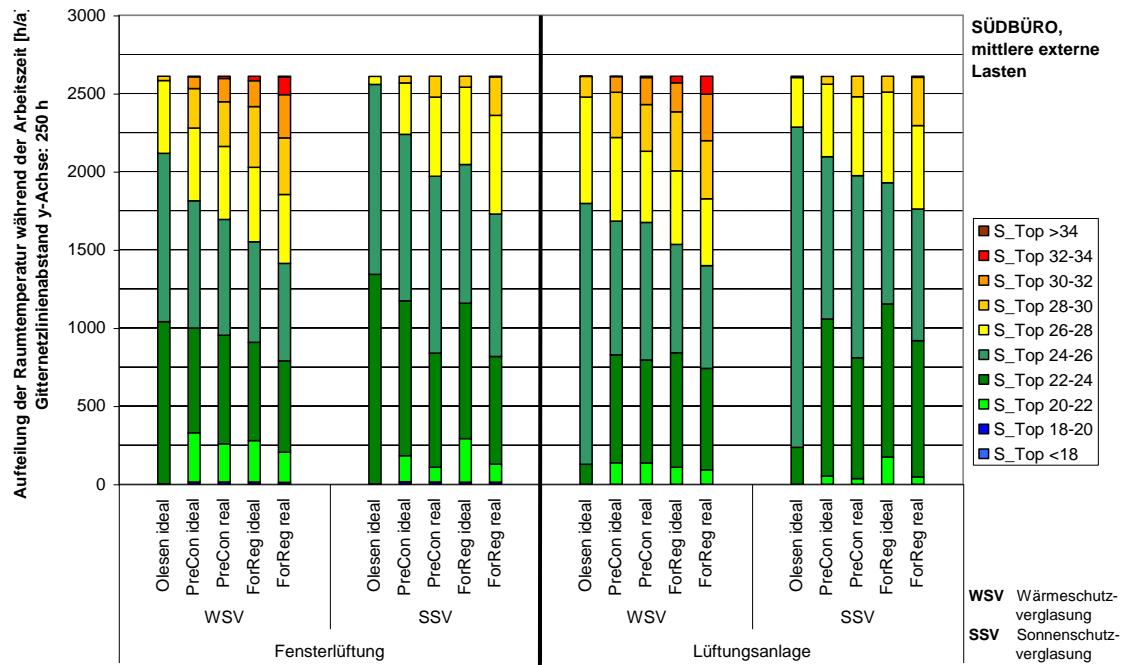
**Abbildung 78:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, **mittlere** externe thermische Lasten, **Nordbüro**, Wetterdaten: Messdaten Hamburg, 2003



**Abbildung 79:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, **mittlere** externe thermische Lasten, **Nordbüro**, Wetterdaten: Messdaten Hamburg, 2003



**Abbildung 80:** Regelung der Bauteilaktivierungen nach der Regelstrategie von Olesen und mittels wetterprognosegeführter Regelungen, **mittlere** externe thermische Lasten, **Südbüro**, Wetterdaten: Messdaten Berlin, 2003



**Abbildung 81:** empfundene Raumtemperatur während der Arbeitszeit, Regelung der Bauteilaktivierung nach verschiedenen Regelstrategien, **mittlere** externe thermische Lasten, **Südbüro**, Wetterdaten: Messdaten Hamburg, 2003

### 6.4.5. Energieeffizienz der wetterprognosegeführten Regelstrategien

Das vorrangige Ziel bei der Entwicklung der wettergeführten Regelstrategien ist eine Reduzierung des Heiz- und Kühlenergiebedarf und damit eine Einsparung an Primärenergie. Eine Einsparung an Primärenergie schont die vorhandenen Ressourcen und reduziert die mit ihrem Verbrauch verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen. In Abbildung 82 und Abbildung 83 ist der Bedarf an benötigter Heiz- und Kühlenergie durch die Verwendung der Regelstrategien PreCon und ForReg gegenüber einer Regelung der Bauteilaktivierung mit einem Algorithmus von Olesen in aufsteigender Reihenfolge dargestellt. Die Graphik enthält die Werte für hohe thermische Lasten sowie das Nord- und das Südbüro für das Testreferenzjahr 04 und die drei untersuchten Standorte im Jahr 2003. Bei allen Varianten resultiert die Verwendung des Regelalgorithmus nach Olesen im höchsten Energiebedarf. Dabei zeigt das Nordbüro für die wetterprognosegeführten Regelungen einen recht ausgeglichenen Bedarf, mit einem signifikanten Anstieg zu den Varianten mit der Regelung nach Olesen und Fensterlüftung. Wird die Regelung nach Olesen zudem mit einer Lüftungsanlage kombiniert, kommt es zu einem weiteren, sprunghaften Anstieg der Bedarfswerte. Ein vergleichbarer Unterschied zwischen Fensterlüftung und Lüftungsanlage ist bei PreCon oder ForReg nicht erkennbar.

Auch beim Südbüro entfallen die hohen Bedarfswerte auf die Varianten mit einer Regelung nach Olesen. Im Vergleich zum Nordbüro sind die Unterschiede im Energiebedarf bei Olesen zu PreCon und ForReg jedoch fließender. Der sprunghafte Anstieg bei der Verwendung einer Lüftungsanlage in Verbindung mit der Regelung nach Olesen fehlt.



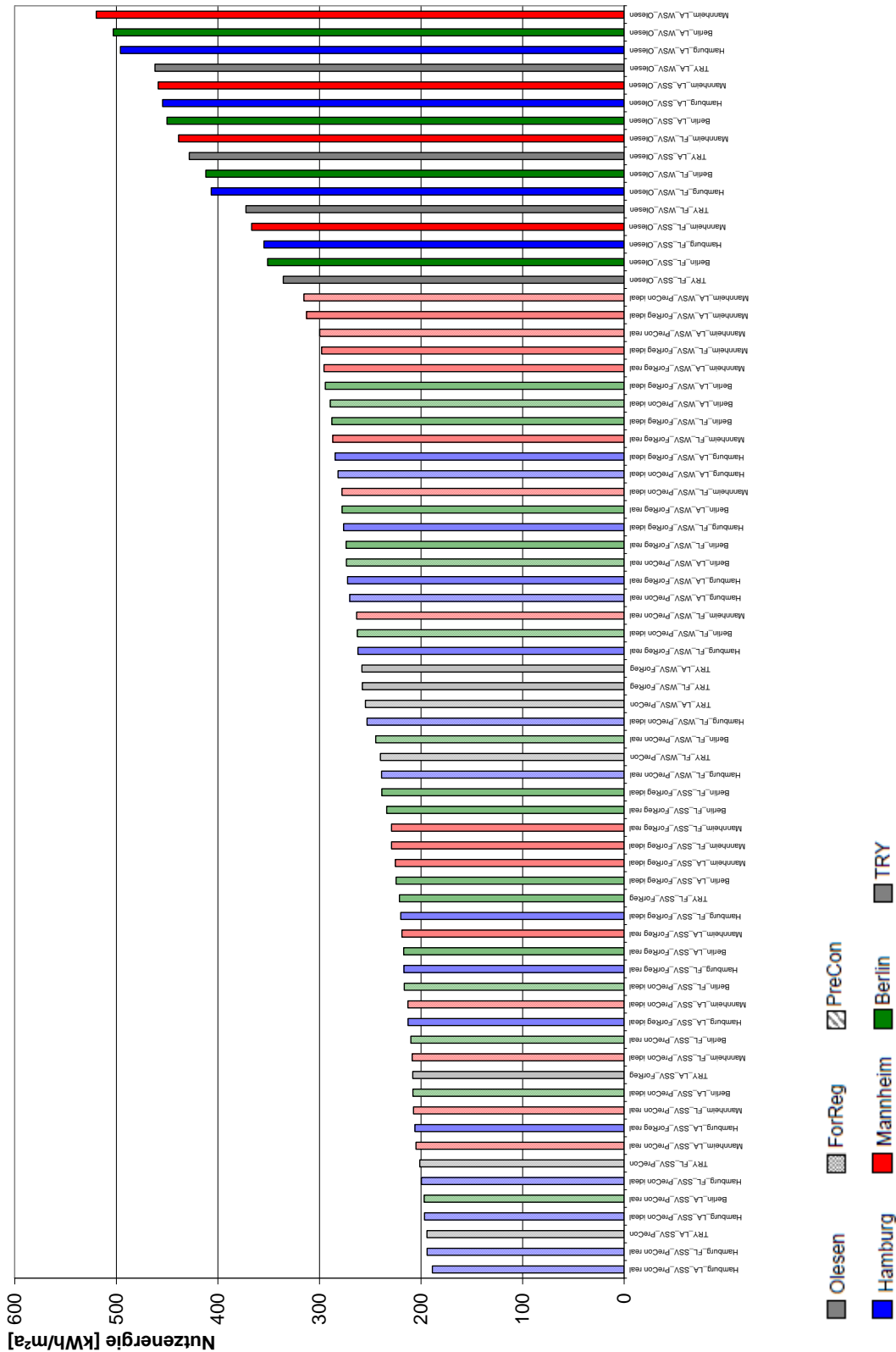


Abbildung 82: Nutzenenergiebedarf für Heizen und Kühlen bei unterschiedlichen Regelstrategien, Südbüro, hohe externe thermische. Lasten, TRY und Wetter 2003

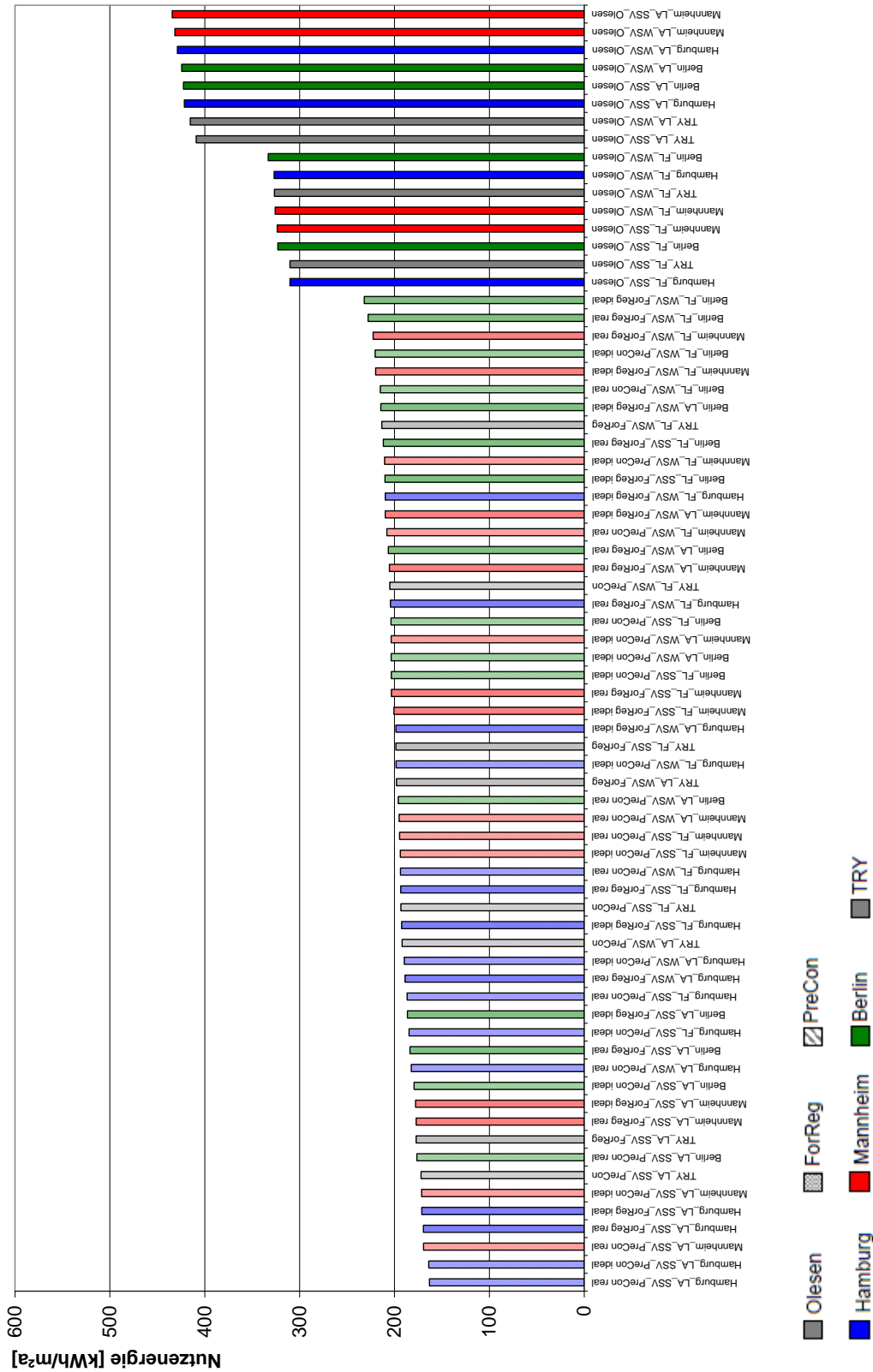


Abbildung 83: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen bei unterschiedlichen Regelstrategien, Nordbüro, hohe externe thermische Lasten, TRY und Wetter 2003

#### 6.4.6. Regelgüte und Komfort

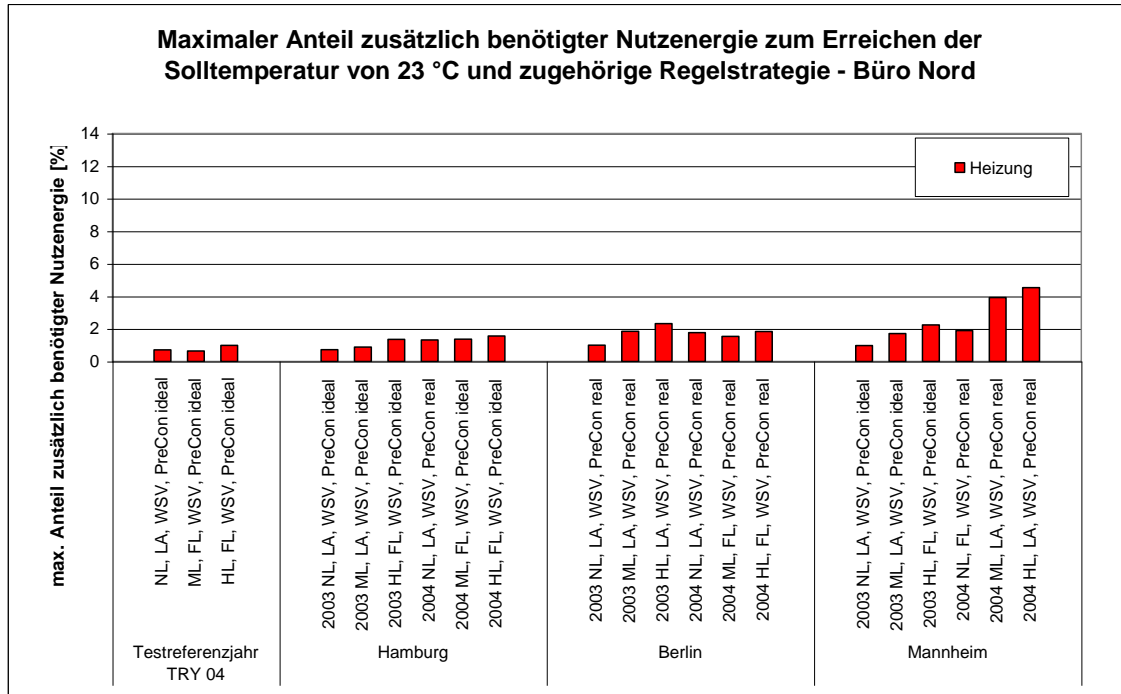
In Abbildung 84 bis Abbildung 87 sind die Regelstrategien mit den geringsten Regelgüten und die zugehörigen Rahmenbedingungen für jede simulierte Variante für das Testreferenzjahr TRY04 und die unterschiedlichen Standorten und Jahre zusammengestellt. Abbildung 84 und Abbildung 85 beziehen sich auf das Nordbüro, die Abbildung 86 und Abbildung 87 auf das Südbüro. Das Kriterium für die geringste Regelgüte innerhalb einer Variante ist definiert als der maximale Anteil zusätzlich benötigter Nutzenergie zum Erreichen der Sollraumtemperatur von 23°C während der Arbeitszeit. Dieser maximale Anteil der zusätzlich benötigten Nutzenergie reflektiert die größten relativen Abweichungen innerhalb der Regelstrategien von den Sollbedingungen. Er ist somit auch ein Maß für die minimal erzielbare Regelgüte, die für die vorhandenen Wetterdaten mit einer der untersuchten Regelstrategie noch erreicht werden kann.

Für das Nordbüro liegt die maximal für die Raumheizung zusätzlich benötigte Energie überwiegend unter 2 %. In drei Fällen liegt sie zwischen 2 und 4 % und in einem Fall bei etwa 5 %. Die für das Nordbüro maximal zusätzlich benötigte Energie zur Kühlung liegt meist unterhalb von 4 % und nur in drei Fällen über 5 %. Im Fall der Raumbeheizung im Nordbüro weist die Regelstrategie PreCon grundsätzlich den größten Anteil an zusätzlich benötigter Nutzenergie auf. Im Fall der Kühlung sind die Ergebnisse von PreCon und ForReg recht ausgeglichen, in zwei Fällen resultiert die Verwendung der Regelstrategie nach Olesen in der anteilig höchsten zusätzlich benötigten Energie.

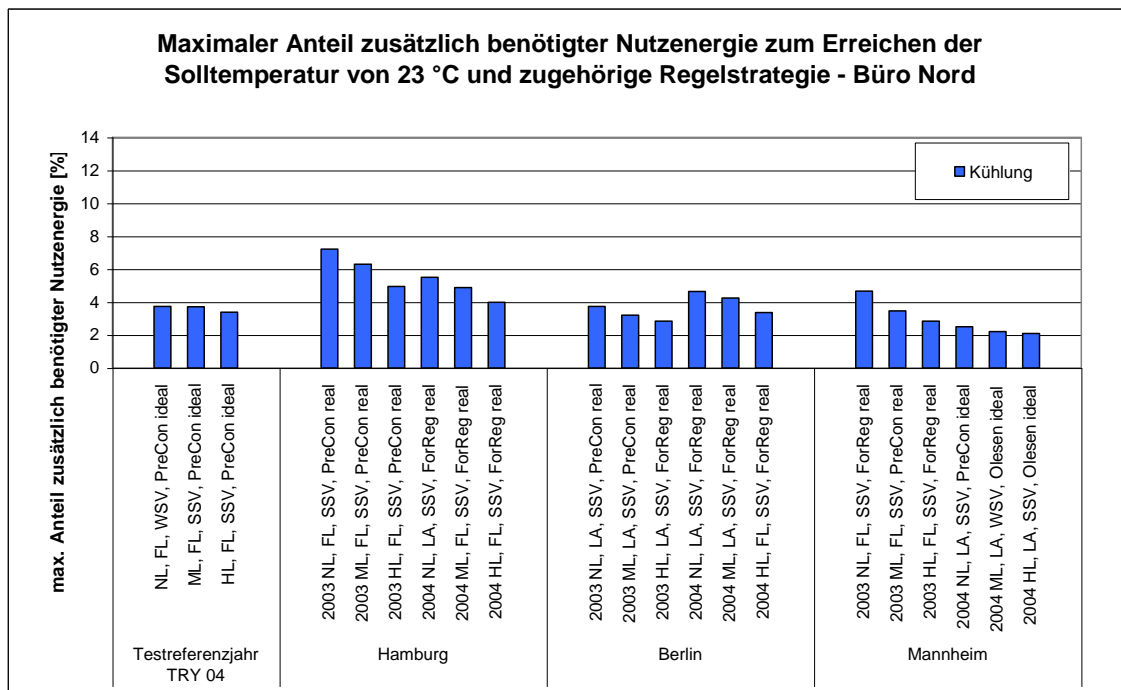
Für das Südbüro liegt die maximal für die Raumheizung zusätzlich benötigte Energie meist unter 2 %. In neun Fällen liegt sie zwischen 2 und 4 % und in einem Fall bei annähernd 7 %. Die für das Südbüro maximal zusätzlich benötigte Energie zur Kühlung liegt meist zwischen 3 und 7 %, in zwei Fällen zwischen 8 und 9 % und in einem Fall bei etwa 11 %. Bei der Raumheizung des Südbüros weist die Regelstrategie PreCon in den meisten Fällen den größten Anteil zusätzlich benötigter Energie auf. Im Gegensatz zum Nordbüro ist jedoch ForReg in einigen Fällen ungünstiger. Bei der Kühlung des Südbüros verursacht die Regelstrategie ForReg in den meisten Fällen die größte relative Abweichungen, Olesen tritt hier nicht in Erscheinung.

Bemerkenswert ist zudem, dass die größten Anteile an zusätzlich benötigter Nutzenergie bei der Raumheizung des Nord- und des Südbüros immer mit der Verwendung von Wärmeschutzverglasung zusammenfallen. Die größten Anteile an zusätzlich benötigter Nutzenergie zur Kühlung des Nordbüros und der überwiegende Anteil der Fälle beim Südbüro fallen mit der Verwendung von Sonnenschutzverglasung zusammen.

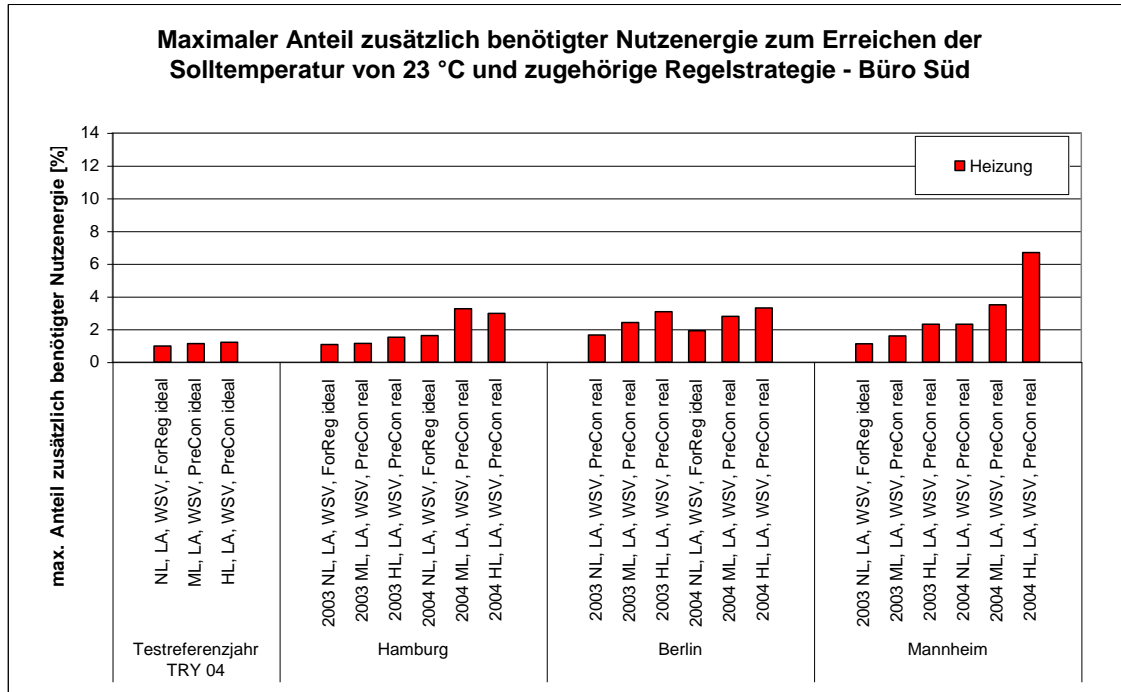
Eine abschließende Bewertung ob die unterschiedlichen Regelstrategien den energetischen und den Komfortansprüchen eines Nutzers entsprechen, kann prinzipiell nur für den Einzelfall unter Berücksichtigung der Energieeinsparung und des thermischen Komforts inkl. der Verteilung der Stunden und dem Betrag der Abweichung von der Solltemperatur erfolgen. Abhängig von den gesetzten Prioritäten können die Bewertungen und die Entscheidungen für oder gegen eine Regelstrategie unterschiedlich ausfallen.



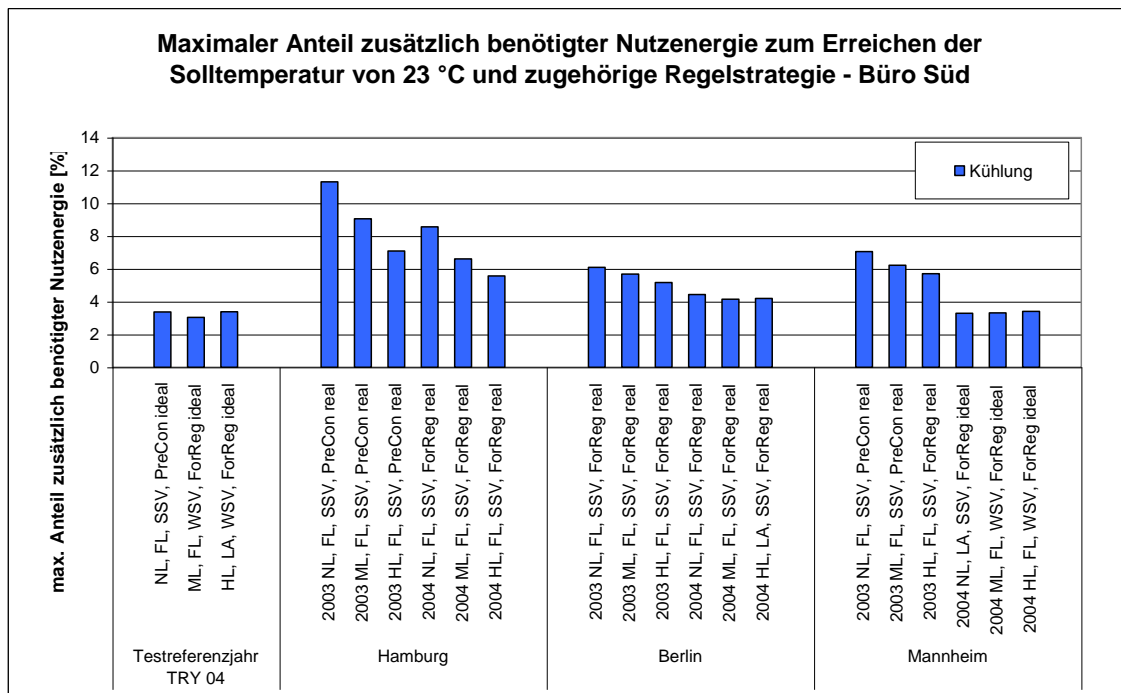
**Abbildung 84:** Regelstrategie mit geringster Regelgüte und zugehörige Rahmenbedingungen an den unterschiedlichen Standorten, gemessen am maximalen Anteil zusätzlich benötigter Nutzenergie während der Arbeitszeit, **Raumheizung Nordbüro**



**Abbildung 85:** Regelstrategie mit geringster Regelgüte und zugehörige Rahmenbedingungen an den unterschiedlichen Standorten, gemessen am maximalen Anteil zusätzlich benötigter Nutzenergie während der Arbeitszeit, **Kühlung Nordbüro,**



**Abbildung 86:** Regelstrategie mit geringster Regelgüte und zugehörige Rahmenbedingungen an den unterschiedlichen Standorten, gemessen am maximalen Anteil zusätzlich benötigter Nutzenergie während der Arbeitszeit, **Raumheizung Südbüro**



**Abbildung 87:** Regelstrategie mit geringster Regelgüte und zugehörige Rahmenbedingungen an den unterschiedlichen Standorten, gemessen am maximalen Anteil zusätzlich benötigter Nutzenergie während der Arbeitszeit, **Kühlung Südbüro**.



## 6.5. Zusammenfassung

Durch die Verwendung der diskutierten, wetterprognosegeführten Regelstrategien sind erhebliche, in den Graphiken deutlich erkennbare Energieeinsparungen möglich.

Formal sind die für einen Referenzstandort und ein Gebäude ermittelten Koeffizienten für eine wetterprognosegestützte Regelung der Bauteilaktivierung nicht übertragbar. Die Entscheidung ob die für einen bestimmten Standort und definierte Rahmenbedingungen eines Gebäudes bestimmten Koeffizienten dennoch für einen anderen Standort anwendbar sind, kann nicht pauschal und widerspruchsfrei getroffen werden. Eine Übertragung der Koeffizienten auf das gleiche Gebäude an einem anderen Standort innerhalb Deutschlands scheint -wenn überhaupt- nur innerhalb der gleichen Klimaregion möglich. In jedem Fall ist die Übertragbarkeit dabei stark von der Gebäudehülle und damit z. B. der Sensibilität für solare Einstrahlung und externe thermische Lasten abhängig.

Nach der Übertragung von Koeffizienten auf ein Gebäude an einem anderen Standort ergeben sich für die einzelnen Betriebs- und Anlagenvarianten unterschiedliche Konstellationen aus eingesparter Heiz- und Kühlenergie, den zusätzlichen Energiebeträgen zum Erreichen der Solltemperatur und den Stunden mit zu geringen oder zu hohen Raumtemperaturen. Diese Bedingungen und die daraus resultierenden Konsequenzen müssen dem potentiellen Anwender einer wetterprognosegeführten Regelstrategie bewusst sein. Abhängig von den Präferenzen in Bezug auf Energieeinsparung und Komfort sowie andere ökonomische Aspekte wird eine Regelstrategie auf der Basis von Wetterprognosen dann akzeptiert oder abgelehnt.

Nach der vorliegenden Simulationsstudie erscheint PreCon besser für das Südbüro und ForReg besser für das Nordbüro geeignet. Tendenziell scheinen die regelungstechnischen Vorzüge von PreCon bei der Raumkühlung und die von ForReg bei der Beheizung von Räumen zu liegen. Für eine praktische Anwendung ist die Kombination der beiden Strategien und deren Nutzung abhängig vom aktuellen Lastfall denkbar.

Prognosefehler in den realen Wetterprognosen erhöhen in den meisten Fällen die Anzahl der Überhitzungsstunden. Im Rahmen der Regelstrategien PreCon und ForReg erscheinen die Wetterprognosen jedoch hinreichend genau und stellen kein prinzipielles Problem bei der Anwendung der vorgeschlagenen Regelstrategien dar.

Im Gegensatz zu PreCon und ForReg funktioniert die zum Vergleich herangezogene Regelstrategie nach Olesen prinzipiell wie eine Heizungsregelung basierend auf einer außen-temperaturabhängigen Heizkurve. Dabei wird die Vorlauf-temperatur in die Betonkerne in Abhängigkeit von der Umgebungs- und der Raumtemperatur angepasst. In allen untersuchten Fällen liegt der Energiebedarf bei der Verwendung der Regelstrategie nach Olesen sowohl beim Heizen als auch beim Kühlen deutlich über dem, bei der Verwendung wetterprognosegeführter Regelstrategien. In Bezug auf die während der Arbeitszeit anfallenden Stunden unterhalb oder oberhalb des Sollwertes und dem damit verbundenen Komfort ist die Regelung nach Olesen mit den Strategien PreCon und ForReg vergleichbar. Da in die Regelstrategie von Olesen keine gebäudespezifischen Kennwerte wie bei PreCon oder ForReg eingehen, ist Olesen generell auf eine Vielzahl von Gebäude an verschiedenen Standorten und bei unterschiedlichem Klima anwendbar.

Grundsätzlich fällt auf, dass die im Wesentlichen durch die Bauteilaktivierung den Büros zugeführte Heizenergie bei ansteigenden thermischen Lasten zunimmt. Diese Zunahme resultiert aus Betriebszuständen, bei denen infolge der thermischen Lasten bereits durch die Bauteilaktivierung gekühlt wird, infolge des Temperaturniveaus der Außentemperatur jedoch auch weiterhin ein Heizenergiebedarf besteht. Diese Überschneidungen treten insbesondere in den



Übergangszeiten von der Heizperiode zur heizungsfreien Zeit und umgekehrt auf und sind - vergleichbar mit anderen Anlagentypen zur Gebäudetemperierung- in der vorliegenden Simulationsstudie erkennbar.



## 7. KOSTENABSCHÄTZUNG FÜR WETTERPROGNOSEGEFÜHRTE REGULUNGEN

Grundsätzlich können die wetterprognosegeführten Regelstrategien zusammen mit den gebäudespezifischen Kennwerten auf unterschiedliche Weise zur Regelung der thermischen Be- und Entladung von Bauteilen eingesetzt werden.

Im folgenden Kapitel sollen die möglichen anfallenden Kosten sowie die Nebenleistungen für eine allgemeine Umsetzung von wetterprognosegeführten Regelungen in Gebäuden mit thermisch aktivierten Bauteilen dargestellt werden.

Die im Rahmen des PreCon-Projekts ermittelten Kosten setzen sich zusammen aus Kosten für Wetterdaten, Programmieraufwand, Anbindung und Übertragung an die GLT-Systeme und notwendige Hardware.

### 7.1. Umfang der gelieferten Daten

Je nach Verwendungszweck können sich bezüglich der Datenlieferung vornehmlich zwei Varianten ergeben:

#### Variante 1: Lieferung der berechneten Q-Werte

Die Datenlieferung umfasst die täglich berechneten Q-Werte, die die Kühl- bzw. Heizlast des Gebäudes wiedergeben, mit einer Übermittlung der Daten an die Gebäudeleittechnik am jeweiligen Vortrag. Sie werden z. B. mittels folgender Gleichungen berechnet, wobei eine Unterscheidung zwischen Werktag (WT) und Wochenende (WE) erfolgt:

$$Q_{\text{ges,WT}} = Q_{\text{WT}} (T_{\text{amb,prog}}) + Q_{\text{sol}} (E_{\text{glob,prog}})$$

$$Q_{\text{ges,WE}} = Q_{\text{WE}} (T_{\text{amb,prog}}) + Q_{\text{sol}} (E_{\text{glob,prog}})$$

Die Werte  $Q_{\text{WT}}$  bzw.  $Q_{\text{WE}}$  und  $Q_{\text{sol}}$  werden gebäudespezifisch berechnet.

Die Koeffizienten variieren je nach Gebäude und müssen für jeden Standort durch Simulation ermittelt werden (siehe Kapitel 6.3.4.)

Der einmalige Entwicklungsaufwand für einen Standort umfasst die folgenden Tätigkeiten:

- Anlegen einer Datenbank
- Hinterlegung der Formeln für den gebäudespezifischen Energiebedarf
- Auswahl von Stationen für den betrachteten Standort
- Überprüfung der Wetterdatenqualität
- Erstellung eines Lieferskripts
- Überwachung der Lieferung der Wetterdaten bzw. berechneter Energiemenge

Kosten fallen in dieser Variante einmalig für die Erstellung und Berechnung der Gebäudedaten sowie wiederkehrend für die Übermittlung und Überwachung der berechneten Daten an.





### Variante 2: Reine Wetterdatenlieferung

In diesem Fall werden durch einen Wetterdienst (externe, tägliche Lieferung) die benötigten Wetterdaten zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um die reine Übermittlung von Daten, die im Anschluss weiterverarbeitet werden müssen. Eine interne Berechnung der am Folgetag benötigten Heiz- und/oder Kühlenergie für das Gebäude durch die Gebäudeleittechnik bzw. Regelungstechnik ist erforderlich.

Ein wesentlicher Vorteil für den Nutzer die Daten von Wettervorhersagen für die Berechnung der benötigten Heiz- und/oder Kühlenergie innerhalb der eigenen Gebäudeleittechnik zu verwenden, ist die prinzipiell größere Unabhängigkeit von der Bezugsquelle. Des Weiteren ist bei einer entsprechenden personellen Qualifikation und simulationstechnischen Infrastruktur eine spätere Anpassung der Algorithmen oder gebäudespezifischen Koeffizienten, z.B. auf veränderte Rahmenbedingungen möglich.

Hier ergeben sich laufende Kosten durch die Datenlieferung.

## **7.2. Datenübertragung**

Bezüglich der Datenübertragung sind ebenfalls zwei Varianten zu unterscheiden: die Übertragung per FTP bzw. WEB´log oder über eine Kommunikationsschnittstelle. Das WEB´log ist ein intelligentes Datenkommunikationsgerät mit integriertem Webserver auf neuestem Technologiestandard. Je nach Anschlussmöglichkeit kann zwischen analog, ISDN und GSM gewählt werden. Ebenso besteht eine Kommunikationsmöglichkeit zu verschiedenen seriellen Geräten.

Eine dritte Alternative besteht über ein Bus-System, wobei jedoch zusätzliche Programmierkosten anfallen würden.

### Variante 1: Datenübertragung per FTP-Schnittstelle

Bei der Übertragung über eine FTP-Schnittstelle fallen keine zusätzlichen Kosten an.

### Variante 2: Datenübertragung via WEB´log

Die Kosten für eine Datenübertragung via WEB´log setzen sich aus folgenden Positionen zusammen:

Das WEB´log weist die folgenden Messkanäle auf:

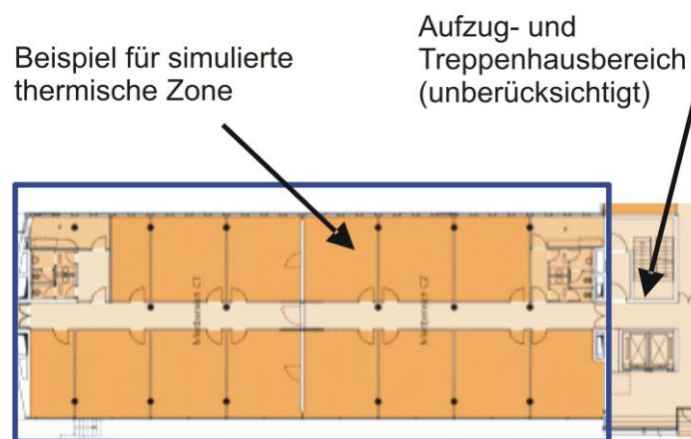
- 4 Analog / 4 Digital Eingänge, 1 RS485Bus, Display inkl. Netzteil,
- 1 Digital Ausgang, 1 M-Bus

## **7.3. Kostenabschätzung bei der Verwendungen von PreCon und ForReg**

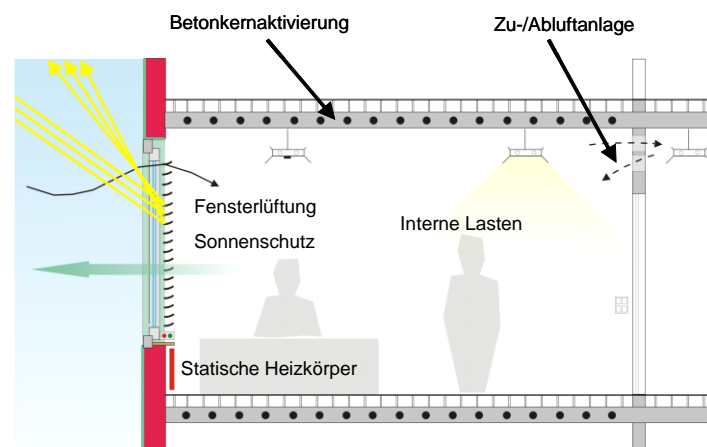
In diesem Kapitel werden die anfallenden Kosten bei der Verwendung der diskutierten, wetterprognosegeführten Regelstrategien abgeschätzt. Die Regelstrategien PreCon und ForReg werden in gleicher Weise in die Regelungstechnik zur Beheizung- oder Kühlung eines Gebäudes eingebunden, auch die Bestimmung der jeweiligen, gebäudespezifischen Koeffizienten erfolgt bei beiden Strategien auf die gleiche Weise. Der Aufwand und die entstehenden Kosten bei der Verwendung von PreCon und/oder ForReg sind daher gleich.

Mit Hilfe von Simulationen und statistischen Auswertungen der Ergebnisse werden die zu den Regelstrategien benötigte Koeffizienten für repräsentative Gebäudeteile bestimmt.

Ein repräsentativer Gebäudeteil entspricht prinzipiell einer thermischen Zone, die das thermische Verhalten und damit die bauphysikalische und die anlagentechnische Ausstattung sowie den Nutzereinfluss eines meist größeren Gebäudeteils oder eines gesamten Gebäudes widerspiegelt, siehe Abbildung 88 und Abbildung 89.



**Abbildung 88:** Beispiel für einen typischen Bürotrakt mit einer zentralen Erschließung



**Abbildung 89:** Beispielschnitt durch einen typischen Büroraum

Unabhängig davon, ob die jeweils benötigte Energie extern oder vor Ort berechnet wird, fallen bei der Verwendung der wetterprognosegeführten Regelstrategien im wesentlichen folgende Kosten an:

- Lizenzgebühr für die wetterprognosegeführte Regelstrategie
- Nutzung von Referenzwetterdaten zur Koeffizientenbestimmung
- Programmieraufwand für die Gebäudesimulationen
- Ermittlung der gebäudespezifischen Koeffizienten

- Programmieraufwand zur Anpassung der Regelungstechnik
- Ggf. Programmieraufwand zur Anpassung der Gebäudetechnik
- Hardware und Anbindung der Datenfernübertragung an das GLT-System
- tägliche Wettervorhersagen bzw. extern berechnete Kühl- und/oder Heizenergie

Die Bestimmung der Koeffizienten ist getrennt für jede Referenzzone notwendig. Werden z.B. aus bauphysikalischen Gründen oder bedingt durch das Nutzungsprofil eigene Koeffizientensätze für unterschiedliche Gebäudeteile benötigt, können Gemeinsamkeiten in der Gebäudebeschreibung zu Synergieeffekten bei der Koeffizientenbestimmung und damit zur Reduktion der Kosten führen.

Die für die wetterprognosegeführten Regelstrategien benötigten Koeffizienten gelten nur für den zu ihrer Bestimmung verwendeten Gebäudeteil und Bauteile, für die dieser Gebäudeteil repräsentativ ist. Die Grenzen der Übertragbarkeit der Koeffizienten und damit der parametrisierten Regelstrategien werden im Kapitel 6.2 ausführlich diskutiert.

Grundsätzlich entstehen bei den diskutierten Regelstrategien Einmalkosten bis zur Inbetriebnahme sowie laufende Kosten. Die laufenden Kosten werden sich abhängig davon, ob reine Wettervorhersagen oder extern berechnete Kühl- und/oder Heizenergien bezogen werden, unterscheiden. Würde sich das Regelkonzept am Markt etablieren, so würden ebenso, durch unterschiedliche Anbieter, die laufenden Kosten variieren.

Die nachfolgend aufgeführten Kosten sind Schätzkosten, basierend auf Erfahrungen und Marktpreisen (Stand 2009). Bei allen angegebenen Kosten handelt es sich um Nettokosten, die sich abhängig vom Dienstleister, z.B. durch Allgemeinkostenanteile erhöhen können. In den Kosten ist die Umsatzsteuer nicht enthalten. Tabelle 16 bis Tabelle 19 enthalten die veranschlagten Einmalkosten.

Die Kosten für die Grundlagenermittlung sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

**Tabelle 16:** Kosten Grundlagenermittlung

Position 1	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis
Beschaffung und Sichtung wesentlicher Planunterlagen zum Gebäude (Hochbau)	2.0 h	75,- €/h	150,- €
Beschaffung und Sichtung von Unterlagen zur anlagentechnischen Ausstattung und Regelungstechnik	2.0 h	75,- €/h	150,- €
Recherche und Erstellung von Nutzungsprofilen inkl. der vorhandenen internen Wärmelasten	4.0 h	75,- €/h	300,- €
Recherchen in vorhandenen Verbrauchsdaten	2.0 h	75,- €/h	150,- €
Beschaffung von Referenzwetterdaten	1.0 h	75,- €/h	75,- €
<b>Summe:</b>	<b>11.0 h</b>	<b>75,- €/h</b>	<b>825,- €</b>

Die Kosten zur Bestimmung der gebäudespezifischen Kennwerte (Koeffizienten) sind in Tabelle 18 aufgeführt. Bei den Kosten für die Bestimmung der Koeffizienten wird davon ausgegangen, dass alle Berechnungen anhand der Grundlagen aus Tabelle 16 erfolgen können.



Die Bestimmung der Koeffizienten erfolgt durch Simulationen mit dem Programmpaket TRNSYS und statistischen Auswertungen der Ergebnisse. Die Kosten für die Umsetzung einer projektspezifischen Simulationsumgebung sind in Tabelle 17.

**Tabelle 17:** Erstellung einer projektspezifischen Simulationsumgebung

Position 2	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis
Erstellung einer Gebäudebeschreibung für eine Referenzzone <sup>1)</sup> und Implementierung der Beschreibung in das Programmpaket Trnsys	8.0 h	75,- €/h	600,- €
Programmierung der anlagetechnischen Ausstattung	6.0 h	75,- €/h	450,- €
Eingabe von Nutzungsprofilen und internen Lasten	4.0 h	75,- €/h	300,- €
Vorbereitungen zu statistischen Auswertungen der Simulationsergebnisse	4.0 h	75,- €/h	300,- €
<b>Summe</b>	<b>22.0 h</b>	<b>75,- €/h</b>	<b>1.650,- €</b>

<sup>1)</sup> Bei der Erstellung der Gebäudebeschreibung wird von einer Referenzzone ausgegangen. Werden weitere Zonen benötigt, kann der Aufwand zu deren Erstellung infolge nutzbarer Vorarbeiten ggf. reduziert sein.

**Tabelle 18:** Simulationen und Koeffizientenbestimmung

Position 3	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis
Simulationen zur Bestimmung der Koeffizienten für eine Referenzzone	6.0 h	75,- €/h	450,- €
Berechnung der Koeffizienten aus den Simulationsergebnissen und statistische Auswertungen	4.0 h	75,- €/h	300,- €
<b>Summe</b>	<b>10.0 h</b>	<b>75,- €/h</b>	<b>750,- €</b>

In Tabelle 19 sind die Kosten für die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse sowie die Berichterstellung dargestellt.

**Tabelle 19:** Ergebnisdarstellung

Position 4	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis
Auswertung und Aufbereitung der Berechnungsergebnisse	4.0 h	75,- €/h	300,- €
Dokumentation und Berichterstellung	4.0 h	75,- €/h	300,- €
<b>Summe</b>	<b>8.0 h</b>	<b>75,- €/h</b>	<b>600,- €</b>

In Tabelle 20 sind zusammenfassend die zuvor dargestellten Einmalkosten zusammengestellt.



**Tabelle 20:** Kostenzusammenstellung, Einmalkosten

Position	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis
Pos. 1 Grundlagenermittlung	11 h	75,- €/h	825,- €
Pos. 2 Erstellung einer projektspezifischen Simulationsumgebung	22 h	75,- €/h	1.650,- €
Pos. 3 Simulationen und Koeffizientenbestimmung	10 h	75,- €/h	750,- €
Pos. 4 Ergebnisdarstellung	8 h	75,- €/h	600,- €
<b>Gesamtsumme, netto</b>			<b>3825,- €</b>

Als laufende Kosten für die tägliche Lieferung von Wettervorhersagen werden von der Fa. meteocontrol monatlich etwa 250 € veranschlagt. Die bei einer externen Berechnung der täglichen Kühl- und/oder Heizenergie und die Übermittlung der Daten an eine Gebäudeleittechnik entstehende Kosten sind nicht bekannt, sie werden im Rahmen dieses Projektes mit monatlich 500 € abgeschätzt.

Die Fernübertragung aller Daten kann über das Internet erfolgen.



## 8. ANHANG

### 8.1. Abkürzungen

BIAS/mbe	Mittlerer Fehler (Verifikationsmaß)
BM	Hochdruckbrücke (Rücken) Mitteleuropa (Großwetterlage)
BKT	Betonkernaktivierung
BTA	Betonkernaktivierung
°C	Grad Celsius (Einheit)
CAD	Computer Aided Design
cP	Kontinentale Polarluft (Luftmasse)
cPA	Kontinental arktische Polarluft (Luftmasse)
csv	Comma-Separated Values, Dateiformat
cT	Kontinentale Tropikluft (Luftmasse)
DDC	Direct Digital Control; Gebäudeautomation
DSL	Digital Subscriber Line (Digitaler Teilnehmeranschluss)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
Eglob,prog	Tagessummen der prognostizierten Globalstrahlung (Heizungsregelung)
ForReg	Vorregelung, aus dem norwegischen (for – vor, für, um und regulere – regulieren, regeln)
FTP	File Transfer Protocol; Datenübertragungsverfahren, Netzwerkprotokoll zur Datenübertragung
GLT	Gebäudeleittechnik
GSM	Global System for Mobile Communication; Datenaustausch
GWT	Großwettertyp
h	Stunden (Einheit)
HB	Hoch Britische Inseln (Großwetterlage)
HFA	Hoch Fennoskandien, antizyklonal (Großwetterlage)
HFZ	Hoch Fennoskandien, zyklonal (Großwetterlage)
HM	Hoch Mitteleuropa (Großwetterlage/Großwettertyp)
HNA	Hoch Nordmeer-Island, antizyklonal (Großwetterlage)
HNFA	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal (Großwetterlage)
HNFZ	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, zyklonal (Großwetterlage)
HNZ	Hoch Nordmeer-Island, zklonal (Großwetterlage)
ISDN	Intergrated Services Digital Network; digitales Telekommunikationsnetz
LON-Bus	Local Operating Network; Feldbus für Gebäudeautomation
MAE	Mittlerer absoluter Fehler (Verifikationsmaß)
MM	meteomedia AG
MM-MOS	meteomedia-Model Output Statistics
MOS	Model Output Statistics
mP	Maritime Polarluft (Luftmasse)



mPA	Maritim arktische Polarluft (Luftmasse)
mPT	Maritim gealterte Polarluft (Luftmasse)
mT	Maritime Tropikluft (Luftmasse)
mTP	Maritim gemäßigte Tropikluft (Luftmasse)
mTS	Mittelmeer-Tropikluft (Luftmasse)
N	Nord (Großwettertyp)
NA	Nordlage, antizyklonal (Großwetterlage)
NEA	Nordostlage, antizyklonal (Großwetterlage)
NEZ	Nordostlage, zyklonal (Großwetterlage)
NO	Nordost (Großwettertyp)
NW	Nordwest (Großwettertyp)
NWA	Nordwestlage, antizyklonal (Großwetterlage)
NWZ	Nordwestlage, zyklonal (Großwetterlage)
NZ	Nordlage, zyklonal (Großwetterlage)
O	Ost (Großwettertyp)
Qges	Tägliche Wärmegewinne (Heizungsregelung)
OPC	OLE for Process Control; Software-Schnittstelle für Datenaustausch
QWE	Tägliche Wärmegewinne am Wochenende (Heizungsregelung)
QWT	Tägliche Wärmegewinne werktags (Heizungsregelung)
r	Linearer Korrelationskoeffizient (Verifikationsmaß)
RMSE	Wurzel aus mittlerem quadratischem Fehler (Verifikationsmaß)
S	Süd (Großwettertyp)
SA	Südlage, antizyklonal (Großwetterlage)
SEA	Südostlage, antizyklonal (Großwetterlage)
SEZ	Südostlage, zyklonal (Großwetterlage)
SO	Südost (Großwettertyp)
SSV	Sonnenschutzvergalsung
SW	Südwest (Großwettertyp)
SWA	Südwestlage, antizyklonal (Großwetterlage)
SWZ	Südwestlage, zyklonal (Großwetterlage)
Synop	Synoptische Observation, Wettermeldung
SZ	Südlage, zyklonal (Großwetterlage)
Tamb	Mittlere Gebäude-Außentemperatur (Heizungsregelung)
Tamb,prog	Prognostiziertes Tagesmittel der Gebäude-Außentemperatur (Heizungsregelung)
TB	Tief Britische Inseln (Großwetterlage)
TM	Tief Mitteleuropa (Großwetterlage/Großwettertyp)
TBüro	Mittlere Gebäude-Innentemperatur (Heizungsregelung)
TRM	Trog Mitteleuropa (Großwetterlage)
TRW	Trog Westeuropa (Großwetterlage)
TRY	Test-Reference-Year
TVL	Vorlauftemperatur (Heizungsregelung)



---

U	Übergang (Großwetterlage)
WA	Westlage, antizyklonal (Großwetterlage)
Web`log	Website geführtes Tagebuch oder Journal
Wh/m <sup>2</sup>	Wattstunde pro Quadratmeter (Einheit)
WPR-Algorithmus	Wetterprognosen basierenden Regelalgorithmus
WS	Südliche Westlage (Großwetterlage)
WSV	Wärmeschutzverglasung
WW	Winkelförmige Westlage (Großwetterlage)
WZ	Westlage, zyklonal (Großwetterlage)
Z	Zonal (Großwettertyp)

---

---





## 8.2. Quellen und Literatur zum Projekt

- [1] Krauss: Intelligentes Klimatisieren. In tec21, 11/2001
- [2] Krauss, J. und Bauer, M.: NEUROBAT – selbsteinstellende, prädiktive und bedarfsgesteuerte Heizungsregelung, KWH Status Seminar, EPF Zürich, 14.+15. September 2000
- [3] Bichsel, j., Krauss, J., Bauer, M. und Morel, N.: Forschungsprogramm „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“, Neurobat – Neuronaler Heizungsregler, Zusammenfassung Phase II, September 2000
- [4] Kieback & Peter: Funktionsbeschreibung zu M377 Don-A-Wetter, Februar 2005
- [5] Gruber, P., Gwerder, M., Tödtli, J.: Predictive Control for Heating Applications. Aus Clima 2000 /Napoli 2001 World Congress, Napoli 15.-18. September 2001
- [6] Honeywell: Fragenkatalog im Rahmen des Forschungsprojektes
- [7] Solar-Institut Jülich an der FH Aachen und GERTEC GmbH Ingenieurgesellschaft: Abschlussbericht Forschungsprojekt (FKZ 0327246 A+B): Einsatz von MATLAB-Simulink zur energetischen Analyse und Optimierung von Alt- und Neubauten inklusive Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik („Lacasa“), 2004
- [8] Meteoviva: Betriebsoptimierung – Betriebsoptimierung mit Wettervorhersage-Steuerung (WVS), [www.meteoviva.de](http://www.meteoviva.de)
- [9] Werner, M. und Hardt, S.: Betriebsoptimierung mit Wettervorhersage-Steuerung. In TAB Technik am Bau 5/2007
- [10] Bachhaus, K., Erischson, B., Plinke, W., Weiber, R.: „Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003, 10. Auflage
- [11] Balzer, K., Enke, W., Wehry, W.: „Wettervorhersage – Mensch und Computer, Daten und Modelle“, Springer Verlag, Berlin, 1998
- [12] Baur, 1963 in F.-W. Gerstengarbe und P.C. Werner, Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1998) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, 5. Auflage, Potsdam, 1999, Seite 7
- [13] Bürger, M.: „Windrelevanten Reliefklassifizierung“, Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2002
- [14] Draheim, T.: „Die räumliche und zeitliche Variabilität der PM10- Schwebstaubkonzentration in Berlin unter Berücksichtigung der Großwettertypen“, Berliner Geographische Arbeiten 103, Berlin, 2005
- [15] Gerstengarbe, F.-W. und Werner, P. C.: „Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1998) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky“, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Offenbach a.M., 1999, 5. Auflage
- [16] Himmler, R.: Methode zur wetterprognosegeführten Regelung von Systemen zur Betonkerntemperierung, Dissertation an der TU-Braunschweig, 2008
- [17] Liedtke, H. und Marcinek, J.: „Physische Geographie Deutschlands“, Perthes-Verlag, Gotha, Stuttgart, 2002, 3. Auflage



- [18] Olesen, B. und Curró Dossi, F.; Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für die Betonkernaktivierung, Velta Kongress 2004
- [19] Persson, A. und Grazzini, F.: „User Guide to ECMWF forecast products“, Meteorological Bulletin M3.2 of European Centre for medium-range weather forecasts, Version 4.0, Juli 2005
- [20] Präsentationen, COSMO-2 Kundenanlass vom 12. Juni 2008, Zürich, Schweiz
- [21] Diplomarbeit „Genauigkeitsüberprüfung von Wettervorhersagen in Abhängigkeit von Großwetterlagen – Bedeutung für die Steuerung von Heizungsanlagen“
- [22] TRaNsient SYstem Simulation program, Version 15, Programm zur instationären Systemsimulation von Gebäuden und Anlagen; entwickelt 1975 an der Universität von Wisconsin. Vertrieb in Deutschland über Transsolar Energietechnik GmbH, Curiestraße 2, 70563 Stuttgart [www.transsolar.com](http://www.transsolar.com), 2000

#### Weiterführende Links

Deutscher Wetterdienst

<http://www.dwd.de/de/FundE/Analyse/Modellierung/Modellierung.htm>

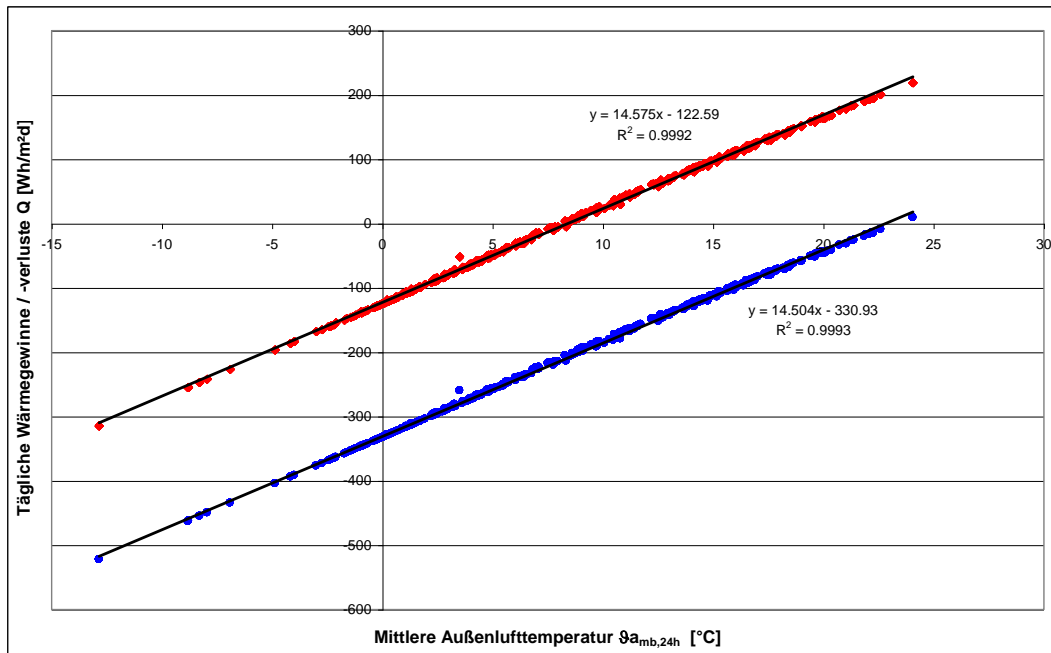
<http://www.dwd.de/de/FundE/Analyse/Modellierung/para.htm>

<http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Medien/Leistungen/GWL/2002/index.htm>

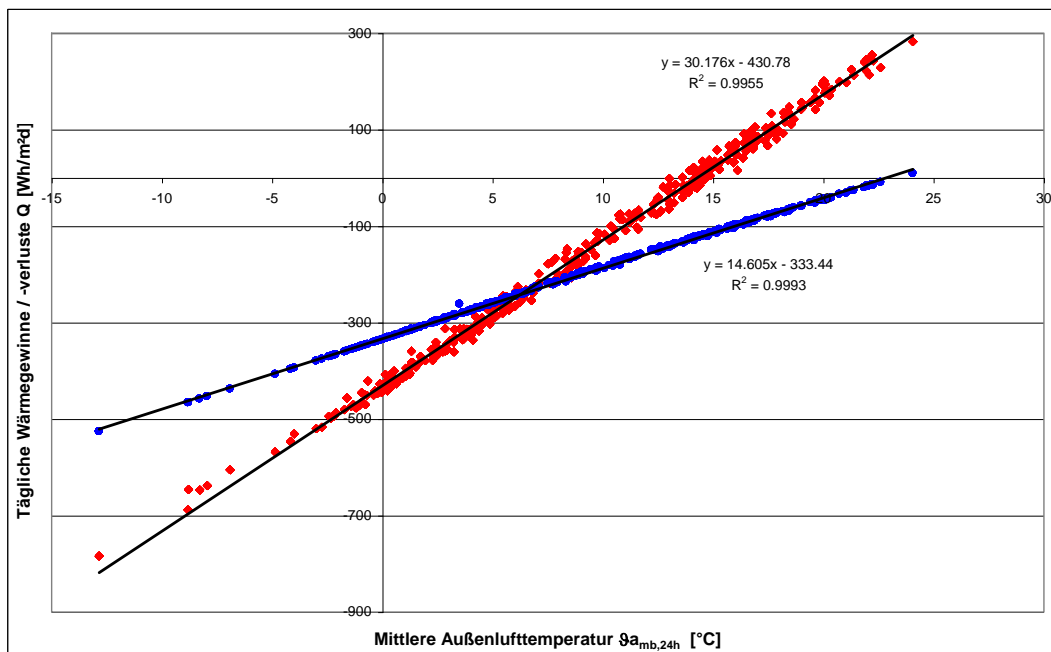
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<http://www.ecmwf.int/>

### 8.3. Abbildungen



**Abbildung 90:** Lüftungsanlage: Koeffizientenbestimmung, Wärmegewinne/ -verluste in Abhängigkeit von der Außentemperatur, niedrige therm. Last (blau = Wochenende, rot = Werktage)



**Abbildung 91:** Fensterlüftung: Koeffizientenbestimmung, Wärmegewinne/ -verluste in Abhängigkeit von der Außentemperatur, niedrige therm. Last (blau = Wochenende, rot = Werktage)

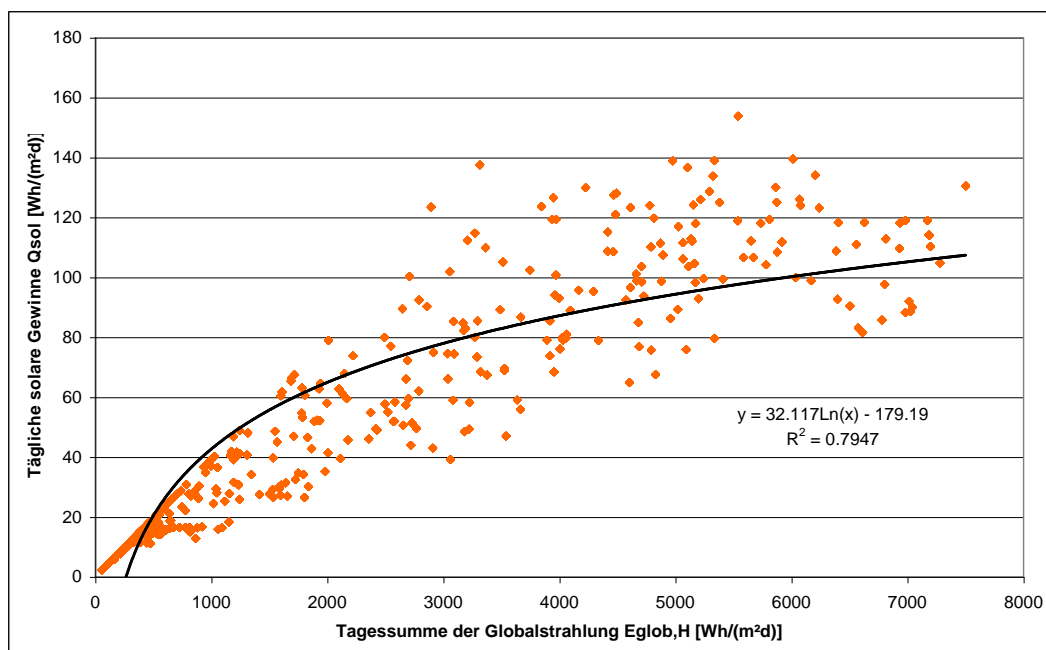


Abbildung 92: Berechnung PreCon, Nordbüro: Koeffizientenbestimmung, tägliche solare Gewinne in Abhängigkeit von der Tagessumme der Solarstrahlung, niedrige therm. Last

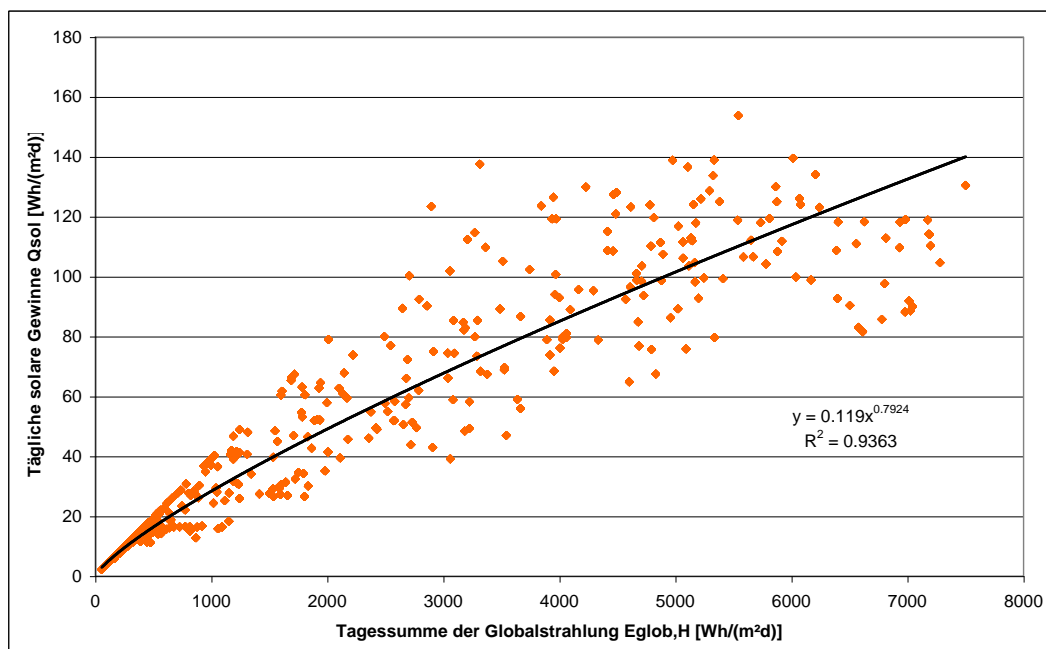
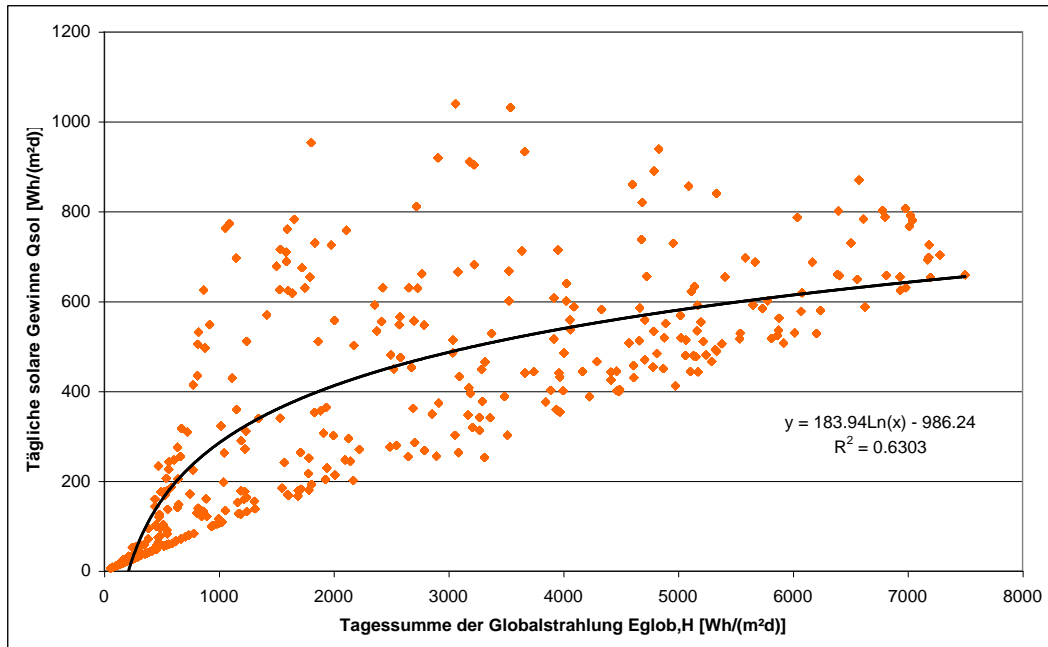
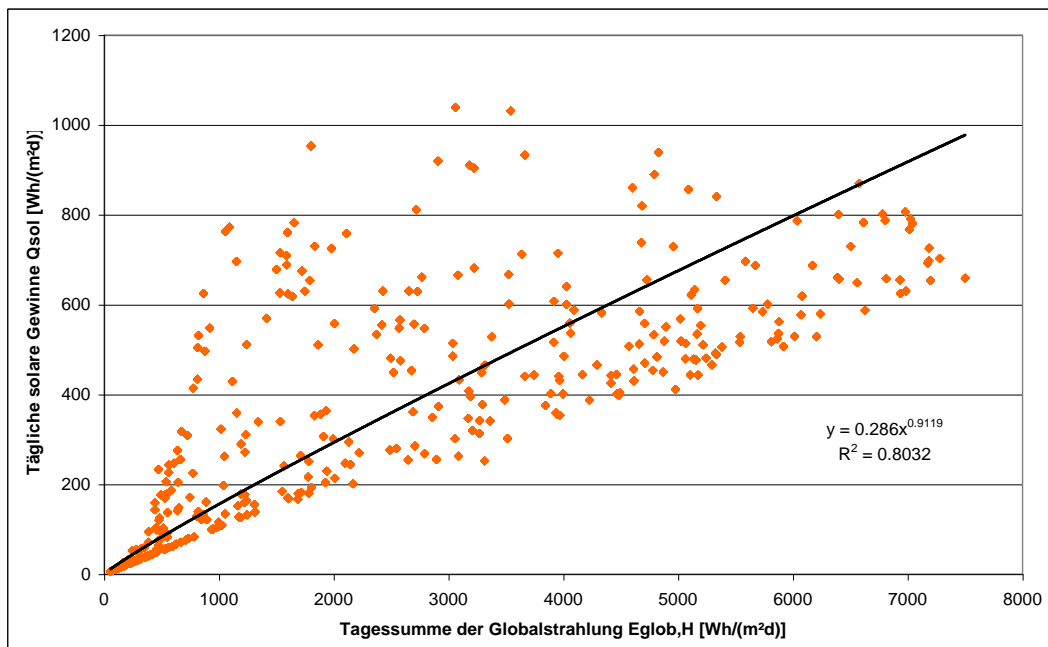


Abbildung 93: Berechnung ForReg, Nordbüro: Koeffizientenbestimmung, tägliche solare Gewinne in Abhängigkeit von der Tagessumme der Solarstrahlung, niedrige therm. Last



**Abbildung 94:** Berechnung PreCon, Südbüro: Koeffizientenbestimmung, tägliche solare Gewinne in Abhängigkeit von der Tagessumme der Solarstrahlung, hohe therm. Last



**Abbildung 95:** Berechnung ForReg, Südbüro: Koeffizientenbestimmung, tägliche solare Gewinne in Abhängigkeit von der Tagessumme der Solarstrahlung, hohe therm. Last