



Gesundheits Ingenieur

Haustechnik · Bauphysik · Umwelttechnik

Herausgegeben von

K. W. USEMANN

122. Jahrgang 2001 · Heft 5 · Seite 221–268

unter Mitwirkung von
in Verbindung mit dem

F. Baum, H. Erhorn, E. Lahmann †, H.-J. Moriske und H. Viessmann

Umweltbundesamt, Fachbereich Umwelt und Gesundheit, Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Ökologie, Berlin-Dahlem; Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Augsburg und der Gesundheitstechnischen Gesellschaft, Berlin.

Energieverbräuche von Bildungsgebäuden in Deutschland

Heike Kluttig, Andreas Dirscherl und Hans Erhorn

1. Einleitung

Der Verordnungsgeber begrenzt durch die Wärmeschutzverordnung den Heizwärmebedarf von Neubauten in Wohn- und Nutzgebäuden. Auf den Heizenergieverbrauch des Bestands von Gebäuden kann jedoch nur geringfügig eingewirkt werden. Um zu verdeutlichen, wie wichtig es besonders hier ist, Maßnahmen zur Reduzierung des Verbrauchs von Heizenergie und Strom zu ergreifen, müssen abgesicherte Angaben zu den durchschnittlichen Verbräuchen im Bestand ermittelt werden. Für Wohngebäude liegt eine abgesicherte Datenbasis vor, für Nutzgebäude fehlen bislang statistisch abgesicherte Werte. Diese Untersuchung möchte die Lücke schließen helfen. Sie beschäftigt sich mit den Energieverbräuchen von Bildungsgebäuden im Bestand der Bundesrepublik Deutschland.

2. Durchgeführte Untersuchung

2.1 Auswertemethodik

Umfassende Aussagen über den Energieverbrauch von Bildungsgebäuden wie Schulen, Kindergärten, Fachhochschulen und Universitäten können nur schwer erarbeitet werden, da diese Daten nur teilweise erfasst und bei einer Erfassung selten an zentrale Stellen weitergegeben wer-

den. Um eine genügend große statistisch abgesicherte Menge an Daten zu erhalten, wurden bei den Stadt- und Gemeindeverwaltungen sowie den Liegenschaftsverwaltungen der Bundesländer verfügbare Informationen abgefragt. Häufig mussten jedoch auch bei den Bildungseinrichtungen selbst, meist in Person des Hausmeisters Informationen abgefragt werden. Die eingegangenen Werte beziehen sich bei Schulen, Kindergärten und Fachhochschulen auf die Gesamtheit aller Gebäude dieser Bildungseinrichtungen. Bei den Universitäten dagegen werden die Gebäude einzeln erfasst, so dass z. B. Werte für Verwaltungsbauten, Lehrgebäude, Sporthallen, einzelne Institute und Außeneinrichtungen getrennt ermittelt wurden. Für Universitäten war es nicht möglich, einen Gesamtwert zu ermitteln, weil nicht sichergestellt werden konnte, dass die übermittelten Werte alle Gebäudekomplexe der Einrichtung abdecken. Für einzelne Schulsporthallen wurden getrennte Werte erfasst.

2.2 Analytierte Gebäude

Es wurden insgesamt Daten von 303 Universitätsgebäuden, 59 Fachhochschulen, 199 Schulen, 35 Kindergärten und 14 separaten Sporthallen ausgewertet. Als zentrale Quellen stellten die Landeshauptstadt Kiel, die Bundeshauptstadt Bonn, die Landeshauptstadt Wiesbaden, das Landesinstitut für Bauwesen des Landes Nordrhein-Westfalen, die Oberfinanzdirektion Stuttgart, die Landeshauptstadt Düsseldorf, das Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik des Landes Brandenburg, die oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren und die Stadt Frankfurt am Main Verbrauchswerte zur Verfügung. Die Freigabe

Dipl.-Ing. Heike Kluttig, Dipl.-Ing. Andreas Dirscherl und Dipl.-Ing. Hans Erhorn, Abteilungsleiter, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Leiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis), Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart.

der Daten wurde teilweise nur unter der Bedingung gestattet, dass die einzelnen Bildungsstätten nicht namentlich benannt werden. Aus diesem Grund ist in der Auswertung kein Bezug zwischen Wert und Gebäude zu erkennen.

2.3 Ermittelte Gebäudekennwerte

Die Auswertung der analysierten Kennwerte erfolgt in tabellarischer und graphischer Form. Es werden Analysen von Heizenergieverbrauch und Stromverbrauch bezogen auf die gesamte Grundfläche durchgeführt, eine Aufteilung in beheizte niederthermierte und unbeheizte Bereiche war nicht möglich, ebenso musste der Versuch, die Brauchwasserverbräuche auszuwerten, eingestellt werden, da diese Daten nur sehr selten erfasst werden. Aus der Gesamtheit der Daten werden jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen ermittelt.

3. Verbräuche der untersuchten Gebäude

Die übermittelten Werte besitzen sowohl beim Heizenergieverbrauch als auch beim Stromverbrauch ein großes Spektrum, so dass eine Unterteilung in die unterschiedlichen Bildungsstätten wie Kindergärten, Schulen, Fachhochschulen und Universitätsgebäude von Anfang an durchgeführt werden musste. Zum Vergleich wurden jedoch auch die Verbräuche aller Bildungseinrichtungen gesamtheitlich statistisch ausgewertet.

3.1 Heizenergieverbrauch

In Bild 1 sind die Spektren des Heizenergieverbrauchs für die verschiedenen Bildungsgebäudetypen dargestellt. Während die Kindergärten, Schulen, Schulsporthallen und Fachhochschulen ähnliche Verteilungen und Mittelwerte aufweisen, weichen die Werte der Universitätsgebäude davon ab. Vor allem die Bereichsbreite mit Heizenergieverbrauchswerten bis zu $1479 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ist viel größer als bei den anderen Gebäudetypen. Tabelle 1 enthält die Zusammenstellung aller statistisch ausgewerteten Kenngrößen zum Heizenergieverbrauch der Bildungsgebäude.

3.1.1 Kindergärten

Die 35 ausgewerteten Gebäude weisen einen Heizenergieverbrauch im Bereich zwischen 67 und $509 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf. Das arithmetische Mittel errechnet sich zu $221 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Berücksichtigt man ausschließlich die Gebäude innerhalb der Standardabweichung, so reduziert sich die Anzahl auf 25

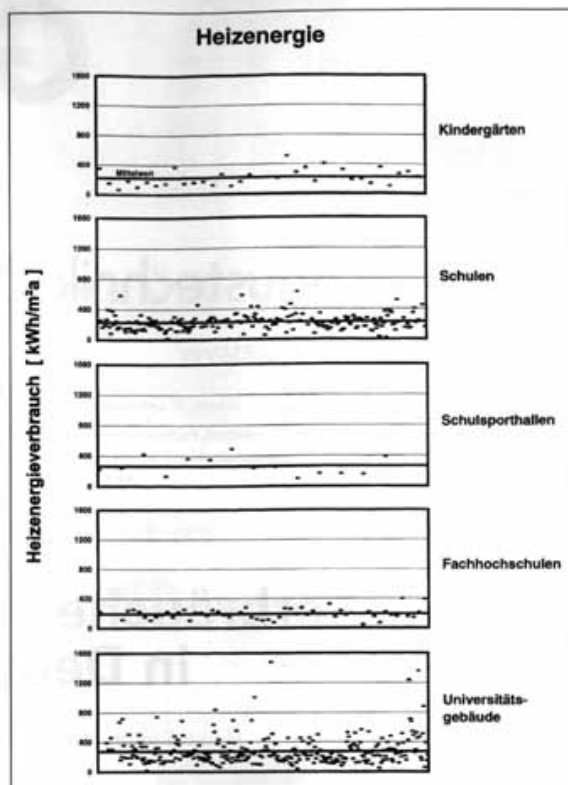


Bild 1. Übersicht über die Spektren der Heizenergieverbrauchswerte bezogen auf die Grundfläche der verschiedenen Bildungsgebäudetypen. Der Mittelwert ist jeweils als waagerechte Gerade eingetragen.

bzw. 70% und der Mittelwert auf $201 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Bild 2 stellt die Gesamtheit aller Kindergarten-Heizwärmeverbräuche denen gegenüber, die sich innerhalb der Standardabweichung befinden. Durch diese Reduzierung der Wertemenge können die größten Abweichungen ausgeschlossen werden.

3.1.2 Schulen

Bei den Schulen konnte bei insgesamt 199 Gebäude der Heizenergieverbrauch ausgewertet werden. In einem vorgefundenen Bereich von 3 bis $800 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ergibt sich ein arithmetisches Mittel von $230 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Reduziert man den Wertebereich auf Werte innerhalb der Standardabweichung, um eventuelle Fehlwerte oder krasse Exoten auszuschließen, erhält man einen Mittelwert von

Tabelle 1. Zusammenstellung der statistischen Kenngrößen wie Mittelwert, Standardabweichung und Mittelwert innerhalb der Standardabweichung für den Heizenergieverbrauch der Bildungsgebäudetypen.

Gebäudetyp	Anzahl der Gebäudedaten	vorgefundener Bereich	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung	Anzahl der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung
	–	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	–
Kindergärten	35	67,0... 509,0	221,0	$\pm 101,2$	201,2	25
Schulen	199	3,0... 800,0	230,6	$\pm 143,1$	211,4	177
Schulsporthallen	14	98,0... 489,0	261,9	$\pm 120,0$	238,2	7
Fachhochschulen	59	44,1... 393,9	190,6	$\pm 66,8$	191,3	43
Universitätsgebäude	301	16,5... 1478,9	272,8	$\pm 187,7$	226,6	258

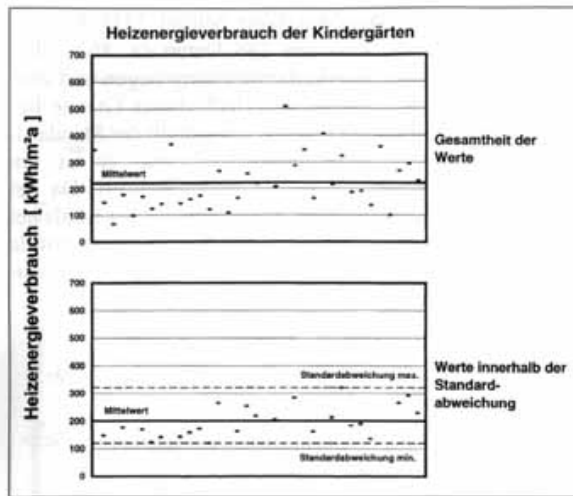


Bild 2. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von Kindergärten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

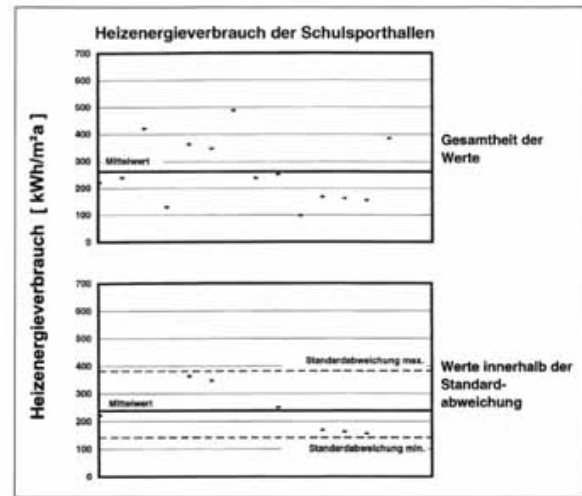


Bild 4. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von Schulsporthallen als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

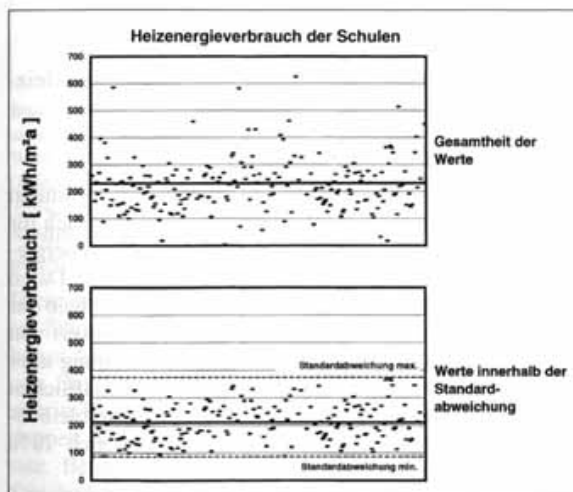


Bild 3. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von Schulen als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

211 kWh/m²a. Er liegt 10 kWh/m²a höher ist als der entsprechende Wert bei den Kindergärten. *Bild 3* zeigt im oberen Teil die Gesamtheit aller ausgewerteten Heizenergieverbräuche und im unteren Teil diejenigen Werte, die innerhalb der Standardabweichung verbleiben. Es ist zu erkennen, dass hier vermehrt Werte im unteren Bereich ausgeschlossen werden. Bei Heizenergieverbräuchen bis hinab zu 3 kWh/m²a handelt es sich jedoch auch um untypische Werte. Mit 89% aller Werte innerhalb der Standardabweichung führen die verbleibenden Werte zu einer verdichteten Aussage.

3.1.3 Sporthallen

Die 14 bundesweit ausgewerteten Heizenergieverbräuche, die getrennt für Sporthallen in Schulen ermittelt wurden, ergeben einen Mittelwert von 262 kWh/m²a. Reduziert man die Wer-

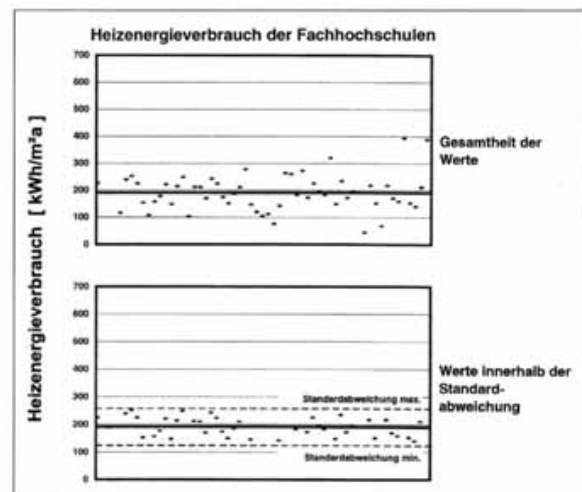


Bild 5. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von Fachhochschulen als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

temenge auf die 7 Hallen, die sich innerhalb der Standardabweichung befinden, so erhält man einen Mittelwert von 238 kWh/m²a. Aufgrund der kleinen Restmenge der Werte, ist die statistische Sicherheit etwas geringer als bei den anderen Gebäudetypen. *Bild 4* zeigt, dass vor allem „Ausreißer“ nach oben aus der Standardabweichung herausfallen. In [1] erfolgt eine Auswertung von 92 Stuttgarter Schulen mit Turnhallen. In der Arbeit wird gezeigt, dass der Mittelwert sich in den letzten 10 Jahren von 165 auf 125 kWh/m²a durch die Einführung eines Energie-Management mit angegliedertem Energie-Kontroll-System reduzieren ließ.

3.1.4 Fachhochschulen

Bei den 59 bundesweit ermittelten Daten für Fachhochschulgebäude ergeben sich Heizwärmeverbräuche zwischen 44 und 394 kWh/m²a; der Mittelwert beträgt 191 kWh/m²a.

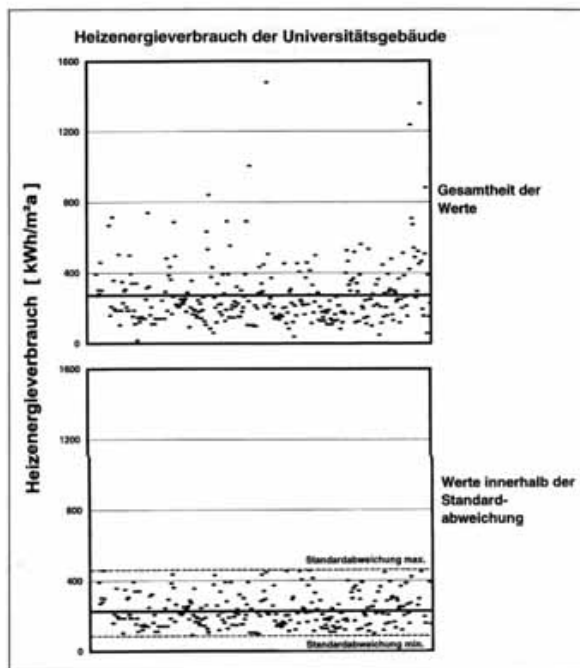


Bild 6. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von Universitätsgebäuden als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

Innerhalb der Standardabweichung befinden sich mit 43 Werten knapp 73% der Ausgangswertemenge. Der daraus resultierende Mittelwert hat sich mit $191 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ gegenüber der Gesamtmenge nicht verändert. Der Vergleich zwischen Gesamtwertebereich und Standardabweichung auf Bild 5 zeigt, dass sowohl im oberen als auch im unteren Bereich Werte bei der Standardabweichung unberücksichtigt bleiben.

3.1.5 Universitätsgebäude

Die 301 ausgewerteten Daten für die Universitätsgebäude decken einen Heizenergieverbrauchsbereich von 17 bis zu

$1479 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ab. Der Mittelwert beträgt $273 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Bild 6 verdeutlicht, dass mit 258 Daten ca. 86% aller Werte innerhalb der Standardabweichung liegen und dass vor allem hohe Verbräuche außerhalb dieser Grenze liegen. Der Mittelwert aller Gebäude innerhalb der Standardabweichung ergibt sich zu $227 \text{ kWh/m}^2\text{a}$; er ist um $46 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ geringer als der Gesamtmittelwert. Da bei den Universitätsgebäuden die Streubreite größer ist als bei anderen hier behandelten Bildungseinrichtungen, wurde versucht, die Gebäude entsprechend ihrer Nutzung aufzuteilen, und zwar in:

- Geisteswissenschaftliche Institutsgebäude
- Medizinische, biologische, chemische und pharmazeutische Institutsgebäude
- Ingenieurwissenschaftliche und sonstige naturwissenschaftliche Institutsgebäude
- Separate Hörsäle
- Rechenzentren
- Gebäude für Universitätsverwaltungen, Bibliotheken und Mensen
- Außenanlagen.

Tabelle 2 enthält die statistischen Kenngrößen des Heizenergieverbrauchs dieser Untergruppen.

Geisteswissenschaftliche Institutsgebäude

Trennt man die von geisteswissenschaftlichen Instituten genutzten Gebäuden von den restlichen, so ergibt sich für die 96 vorliegenden Gebäude ein mittlerer Heizenergieverbrauch von $237 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Verdichtet man die Daten durch ausschließliches Verwenden der Daten innerhalb der Standardabweichung, so erhält man einen Mittelwert von $210 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Bild 7 enthält die Gegenüberstellung aller Heizenergieverbräuche von geisteswissenschaftlichen Instituten und den in der Standardabweichung verbleibenden. Mit 75 von ehemals 96 Daten befinden sich 78% innerhalb der Standardabweichung.

Tabelle 2. Zusammenstellung der statistischen Kenngrößen wie Mittelwert, Standardabweichung und Mittelwert innerhalb der Standardabweichung für den Heizenergieverbrauch von Universitätsgebäuden und ihren Untergruppen.

Art des Universitätsgebäudes/ Institut	Anzahl der Gebäudedaten	vorgefundener Bereich	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung	Anzahl der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung
	–	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	–
Geisteswissenschaft	96	93,0... 691,8	237,2	$\pm 106,4$	210,2	75
Medizin, Biologie, Chemie, Pharmazie	27	197,6... 715,8	454,8	$\pm 137,0$	425,8	19
Ingenieur- und sonstige Naturwissenschaften	87	16,5... 498,8	206,5	$\pm 95,8$	190,1	62
Hörsäle	10	119,4... 399,0	249,5	$\pm 92,0$	226,4	7
Rechenzentren	9	47,7... 481,6	240,0	$\pm 174,2$	140,4	5
Verwaltung, Bibliothek, Mensa	57	35,3... 880,4	237,8	$\pm 164,3$	195,7	47
Außenanlagen	15	121,3... 1478,9	696,5	$\pm 401,1$	568,7	11
Gesamt	301	16,5... 1478,9	272,8	$\pm 187,7$	226,6	258

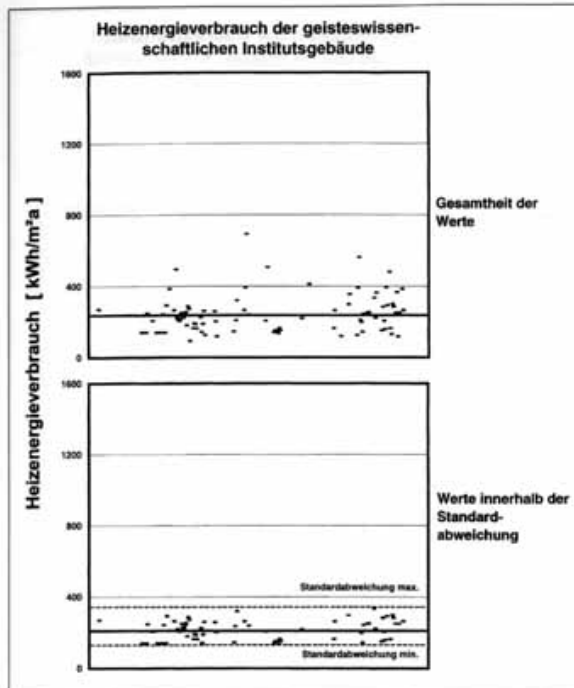


Bild 7. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von geisteswissenschaftlichen Institutsgebäuden an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

Medizinische, biologische, chemische und pharmazeutische Institutsgebäude

Diese spezielle Gruppe von naturwissenschaftlichen Instituten führt in der Ausbildung Versuche durch, die sowohl einen hohen Strom- als auch Heizenergieverbrauch erwarten lassen. Die 27 ausgewerteten Heizenergieverbräuche befinden sich im Bereich von 198 bis 716 kWh/m²a. Sie sind also fast doppelt so hoch wie die der geisteswissenschaftlichen Institute. Begrenzt man die Wertemenge auf den Bereich der Standardabweichung, so verbleiben noch 19 Gebäude mit einem Mittelwert von 426 kWh/m²a, wie *Bild 8* zeigt.

Ingenieurwissenschaftliche und sonstige naturwissenschaftliche Institutsgebäude

Die verbleibenden Gebäude der naturwissenschaftlichen Fakultäten weisen sehr ähnliche Werte auf, wie die ingenieurwissenschaftlichen Gebäude, so dass sie zu einer Gruppe zusammengefasst wurden. Der Mittelwert der insgesamt 87 Gebäude beträgt 207 kWh/m²a er ergibt sich aus einem Bereich von 17 bis 499 kWh/m²a. Durch Einschränkung der Wertemenge innerhalb der Standardabweichung bilden die übrig gebliebenen 71 % der Daten einen Mittelwert von 190 kWh/m²a. *Bild 9* zeigt, daß der Bereich der Standardabweichung eng ist. Dass trotzdem ein großer Anteil der Gebäude darin verbleibt, macht deutlich, dass es in dieser Gruppe nur wenige „Ausreißer“ gibt.

Hörsäle

In dieser Gruppe werden die getrennt von anderen Gebäudeteilen eines Universitätskomplexes ermittelten Heizenergie-

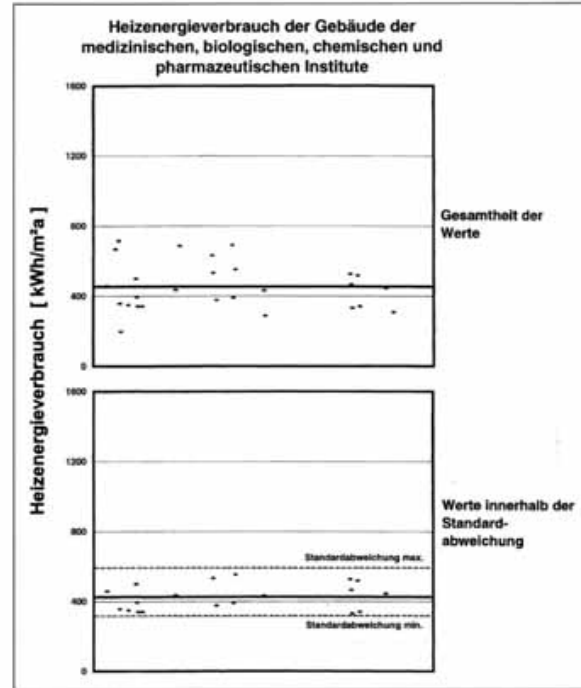


Bild 8. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von medizinischen, biologischen, chemischen und pharmazeutischen Institutsgebäuden an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

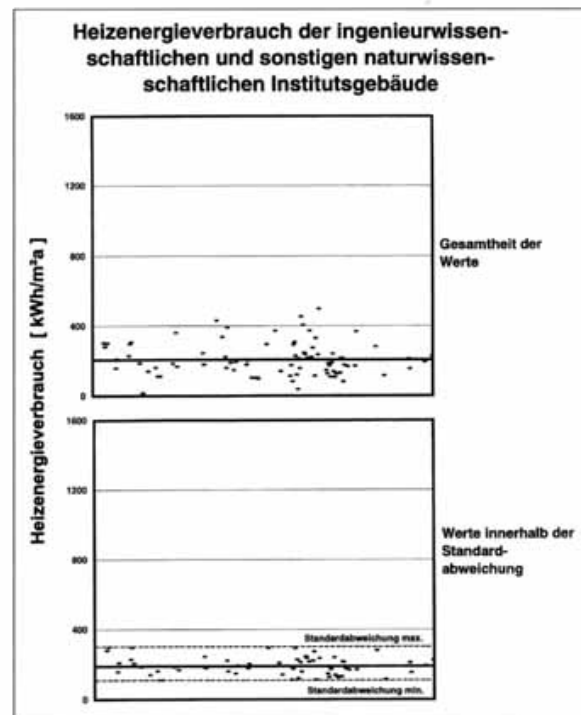


Bild 9. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs von ingenieurwissenschaftlichen und von sonstigen naturwissenschaftlichen Institutsgebäuden an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

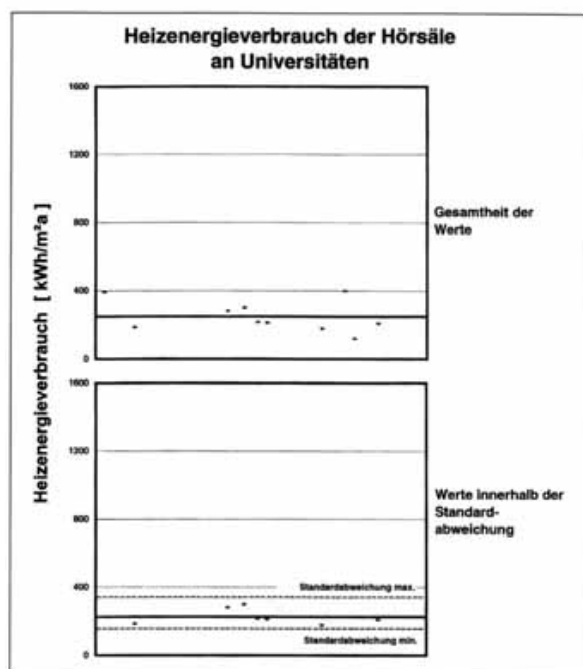


Bild 10. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs der Hörsäle an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

verbräuche berücksichtigt, also nicht die meist kleineren Hörsäle, die direkt Instituten zugeordnet sind und deshalb dort mit abgerechnet werden. Es konnten nur Werte von 10 Hörsaalgebäuden ausgewertet werden, deren Streubreite sich von 119 bis 399 kWh/m²a bewegt und deren Mittelwert 250 kWh/m²a beträgt. Grenzt man über die Standardabweichung weiter ein, so weisen die verbleibenden 7 Gebäude, gemäß *Bild 10*, einen Mittelwert von 226 kWh/m²a auf.

Rechenzentren

Dies sind Gebäude, die aufgrund ihrer technischen Ausstattung hohe interne Gewinne und deshalb einen geringeren Heizenergieverbrauch erwarten lassen. Die Gesamtheit aller Daten der 9 Rechenzentren ergibt allerdings einen Mittelwert von 240 kWh/m²a, der nicht niedriger ist als bei anderen Universitätsgebäudetypen. Der Wertebereich reicht von 48 kWh/m²a bis 482 kWh/m²a. Innerhalb der Standardabweichung befinden sich 5 der 9 Werte, der Mittelwert in

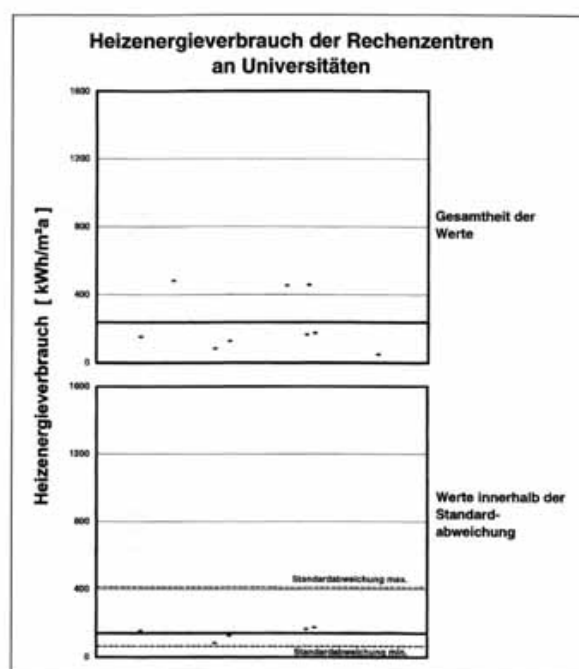


Bild 11. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs der Rechenzentren an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

diesem Bereich beträgt 140 kWh/m²a. Diese deutliche Absenkung geschieht durch das Herausfallen von 3 Gebäuden mit höheren Heizenergieverbräuchen, wie *Bild 11* zeigt. Die Differenz macht klar, wie empfindlich eine kleine Wertemenge auf weitere Reduzierungen reagiert.

Verwaltungsgebäude, Bibliotheken und Mensen

Von den verfügbaren Heizenergieverbräuchen von 57 Gebäuden dieser Gruppe mit einem Mittelwert von 238 kWh/m²a verbleiben 82% innerhalb der Standardabweichung von ± 164 kWh/m²a. Der Mittelwert des Heizenergieverbrauchs dieser Gebäude im Bereich der Standardabweichung reduziert sich auf 195 kWh/m²a, da auch hier, wie *Bild 12* zeigt, vor allem obere Extremwerte nicht berücksichtigt werden.

Außenanlagen an Universitäten

Bei den Außenanlagen handelt es sich meist um Versuchsstätten für Pflanzen und Tiere, also z. B. um beheizte Gewächs-

Tabelle 3. Zusammenstellung der statistischen Kenngrößen wie Mittelwert, Standardabweichung und Mittelwert innerhalb der Standardabweichung für den Stromverbrauch der Gebäudetypen.

Gebäudetyp	Anzahl der Gebäudedaten	vorgefundener Bereich	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung	Anzahl der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung
		kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	
Kindergärten	8	6,0... 72,0	26,3	$\pm 20,1$	22,0	6
Schulen	185	1,0...123,0	26,0	$\pm 19,6$	20,0	155
Schulsporthallen	4	18,4...110,0	63,5	$\pm 39,9$	62,9	2
Fachhochschulen	59	8,4...136,8	47,9	$\pm 27,9$	44,9	45
Universitätsgebäude	303	2,2...931,2	125,8	$\pm 145,0$	81,8	266

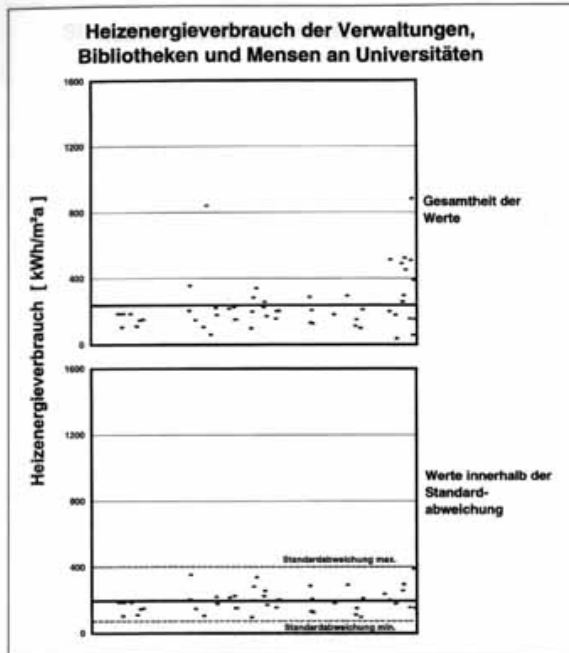


Bild 12. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs der Verwaltungen, Bibliotheken und Mensen an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

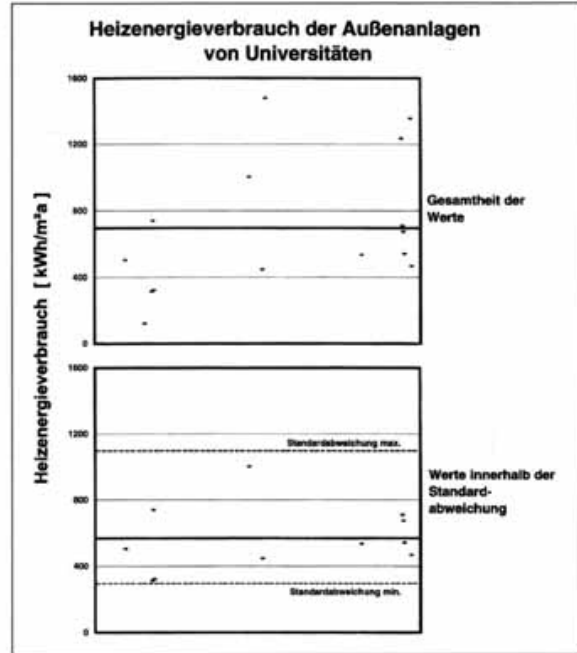


Bild 13. Gegenüberstellung des Heizenergieverbrauchs der Außenanlagen an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

häuser. Für diese Gruppe konnten insgesamt 15 Heizenergieverbräuche ausgewertet werden, deren Mittelwert mit 697 kWh/m²a ein extrem hoher Verbrauch kennzeichnet. Bild 13 zeigt, dass die Streubreite sehr groß ist, was man auch der hohen Standardabweichung von 401 kWh/m²a entnehmen kann. Bei einer Reduzierung der Werte auf die 11 innerhalb der Standardabweichung ergibt sich ein Mittelwert von 569 kWh/m²a, der trotz einer Absenkung von ca. 130 kWh/m²a gegenüber dem unbereinigten Mittelwert immer noch mehr als doppelt so hoch wie die Mittelwerte der Heizenergieverbräuche der restlichen Universitätsgebäude ist.

3.2 Stromverbrauch

Bild 14 zeigt die Spektren des Stromverbrauchs für die verschiedenen Bildungsgebäudetypen. Auch hier zeigt sich, dass die Kindergärten, Schulen, Schulsporthallen und Fachhochschulen ähnliche Mittelwerte und Verteilungen aufweisen, die Universitäten jedoch höhere Verbräuche und einen größeren Streubereich besitzen. In Tabelle 3 sind die statistischen Kenngrößen des Stromverbrauchs der Bildungsgebäudetypen zusammengefasst.

3.2.1 Kindergärten

Betrachtet man die Daten des Stromverbrauchs der Kindergärten getrennt von den anderen Bildungsgebäudetypen, so ergibt sich aus insgesamt 8 Werten im Bereich zwischen 6 kWh/m²a und 72 kWh/m²a ein Mittelwert von 26 kWh/m²a. Durch eine Reduzierung der Wertemenge im Bereich der Standardabweichung fällt, wie Bild 15 zeigt, unter anderem der Extremwert von 72 kWh/m²a aus dem zu betrachtenden Bereich heraus, der Mittelwert verringert

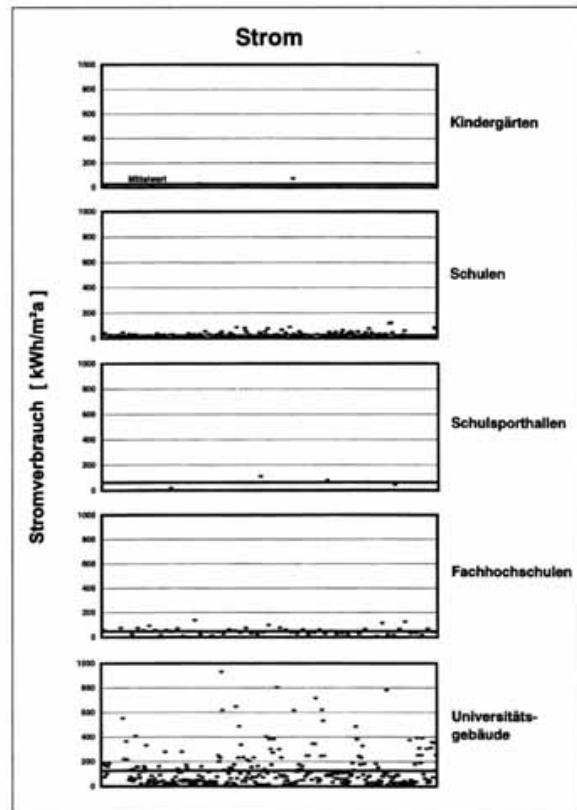


Bild 14. Übersicht über die Spektren der Stromverbrauchswerte bezogen auf die Grundfläche der verschiedenen Bildungsgebäudetypen. Der Mittelwert ist jeweils als waagerechte Gerade eingetragen.

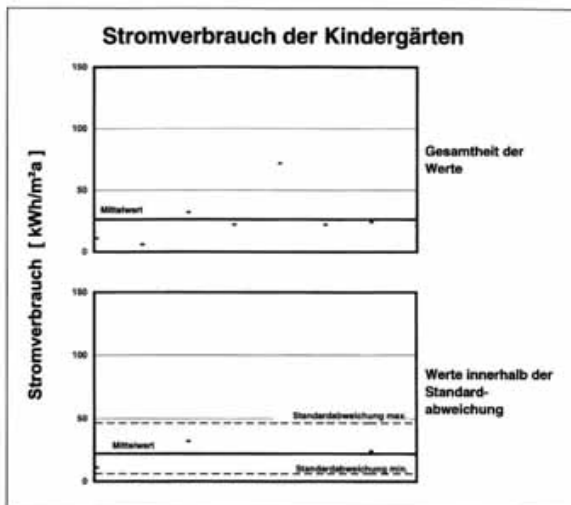


Bild 15. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von Kindergärten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

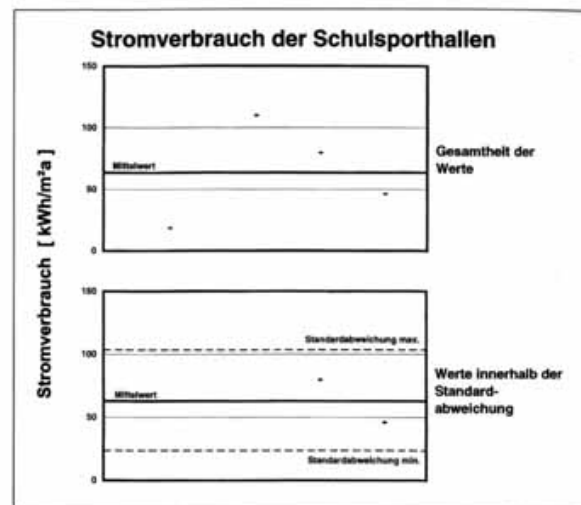


Bild 17. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von Schulsporthallen als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

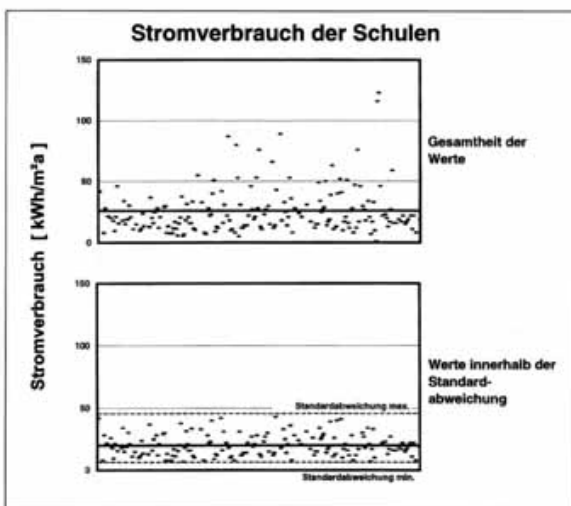


Bild 16. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von Schulen als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

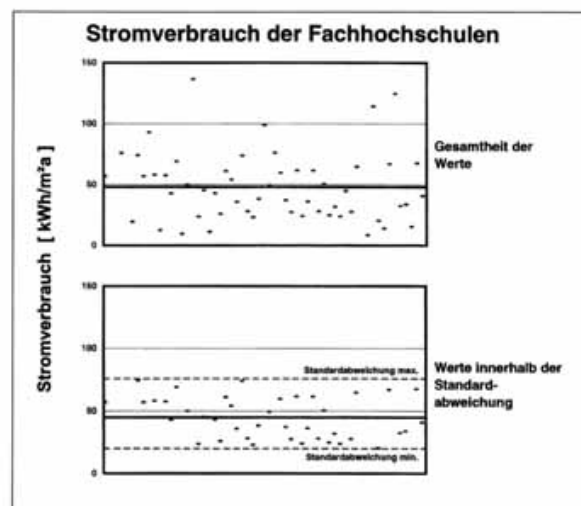


Bild 18. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von Fachhochschulen als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

sich auf $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Da der Stromverbrauch für die geringe Anzahl an Werten doch relativ stark variiert, wurde versucht, die Gebäude in Kindergärten und Kindertagesstätten aufzuteilen. Eine eindeutige Zuordnung zwischen Kindertagesstätten mit längerer täglicher Nutzungsdauer und höheren Verbräuchen durch zusätzlichen Stromverbrauch für z.B. die Zubereitung der Mahlzeiten konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Hier scheinen bauphysikalische Aspekte wie Tageslichtnutzung größere Einflüsse zu haben.

3.2.2 Schulen

Bei den Schulen konnten insgesamt 185 Stromverbräuche ausgewertet werden, die eine Streubreite von $1 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bis $123 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ mit einem Mittelwert von $26 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ aufweisen. Begrenzt man die Wertemenge auf die innerhalb der

Standardabweichung gemäß *Bild 16*, so verbleiben mit 155 noch 84% der Daten in der Auswertung. Der Mittelwert der verbleibenden Daten beträgt jetzt $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, da vor allem Daten im oberen Wertebereich ausgeschlossen werden.

3.2.3 Schulsporthallen

Die 4 ausgewerteten Stromverbräuche der separaten Sporthallen an Schulen decken einen Bereich von $18 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bis $110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ab und weisen damit eine große Streubreite auf. Der Mittelwert beträgt $64 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Nach der Reduzierung der Wertemenge auf die Werte innerhalb der Standardabweichung ergibt sich für die verbleibende Hälfte der Werte ein sehr ähnlicher Mittelwert von $63 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, wie *Bild 17* zeigt. Die Auswertung der 92 Stuttgarter Schulen mit Turnhallen [1] ergibt einen Mittelwert der Gesamtliegenschaft von $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

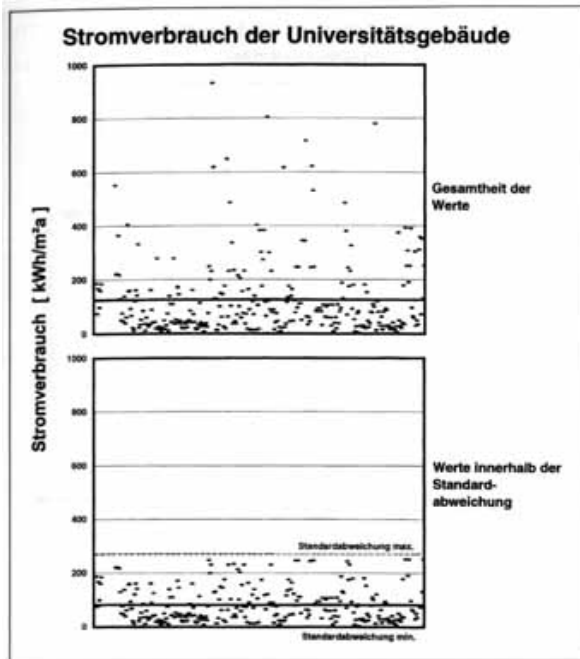


Bild 19. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von Universitätsgebäuden als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

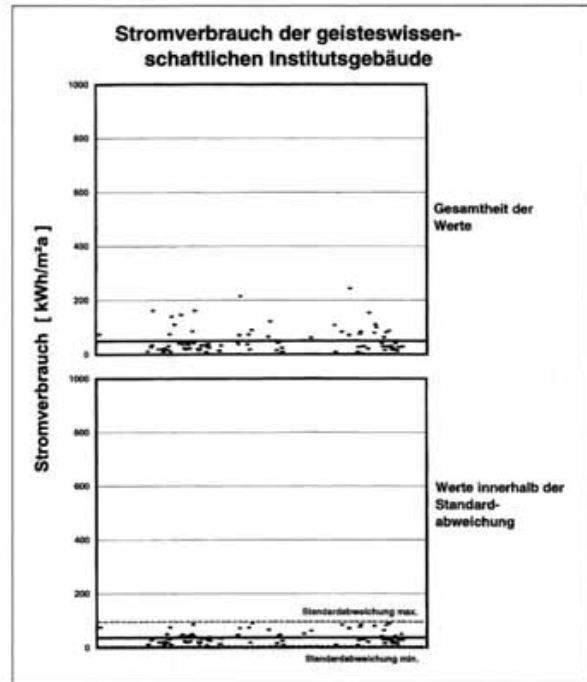


Bild 20. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von geisteswissenschaftlichen Institutsgebäuden an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

3.2.4 Fachhochschulen

Es konnten Stromverbräuche von 59 Fachhochschulen mit Werten zwischen 8 und 137 kWh/m²a ausgewertet werden. Der Mittelwert aller Objekte beträgt 48 kWh/m²a. Nach Einschränkung der Werte im Bereich der Standardabweichung, gemäß *Bild 18*, ergibt sich für die verbleibenden 45 Objekte ein Mittelwert von 45 kWh/m²a.

3.2.5 Universitätsgebäude

Bildet man den Mittelwert aller 303 Stromverbräuche von Universitätsgebäuden, so ergibt sich ein Wert von

126 kWh/m²a. Bei einer Eingrenzung des ursprünglich mit 2 kWh/m²a bis 931 kWh/m²a großen Wertebereichs auf die Standardabweichung, verringert sich der Mittelwert des Stromverbrauchs auf 82 kWh/m²a. Innerhalb der Standardabweichung befinden sich, wie *Bild 19* zeigt, mit 266 Daten ca. 88% der Ausgangswertemenge. Aufgrund der großen Streuung wird auch beim Stromverbrauch eine Unterteilung der Universitätsgebäude nach Nutzung analog der Heizenergieverbräuche vorgenommen, die in *Tabelle 4* zusammengestellt ist.

Tabelle 4. Zusammenstellung der statistischen Kenngrößen wie Mittelwert, Standardabweichung und Mittelwert innerhalb der Standardabweichung für den Stromverbrauch von Universitätsgebäuden und ihren Untergruppen.

Art des Universitätsgebäudes/ Institut	Anzahl der Gebäudedaten	vorgefundener Bereich	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung	Anzahl der Gebäudedaten innerhalb der Standardabweichung
	–	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	–
Geisteswissenschaft	96	3,6...243,6	50,0	± 45,3	36,9	82
Medizin, Biologie, Chemie, Pharmazie	27	53,0...618,2	267,7	± 151,7	243,2	20
Ingenieur- und sonstige Naturwissenschaften	88	2,1...530,5	116,1	± 91,9	89,3	67
Hörsäle	10	12,8...186,9	84,6	± 57,2	109,2	4
Rechenzentren	9	109,7...931,2	566,5	± 256,4	579,7	7
Verwaltung, Bibliothek, Mensa	56	5,1...402,6	114,8	± 107,3	71,5	45
Außenanlagen	17	13,2...803,2	233,9	± 196,7	223,6	14
Gesamt	303	2,2...931,2	125,8	± 145,0	81,8	266

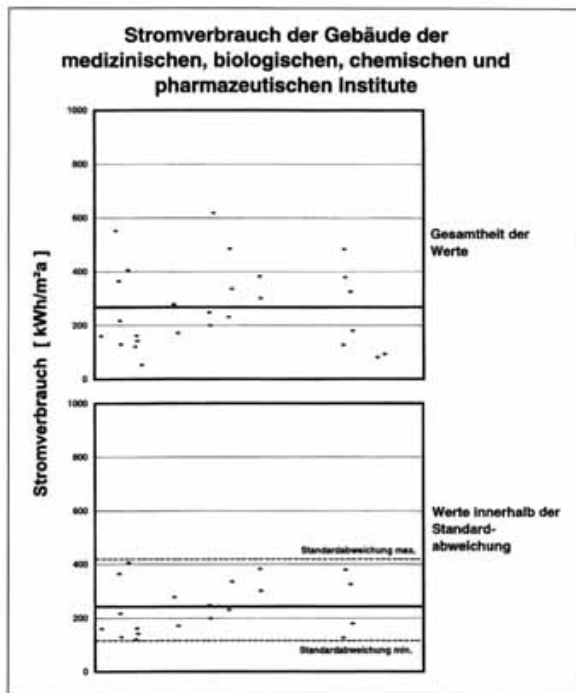


Bild 21. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von medizinischen, biologischen, chemischen und pharmazeutischen Institutsgebäuden an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

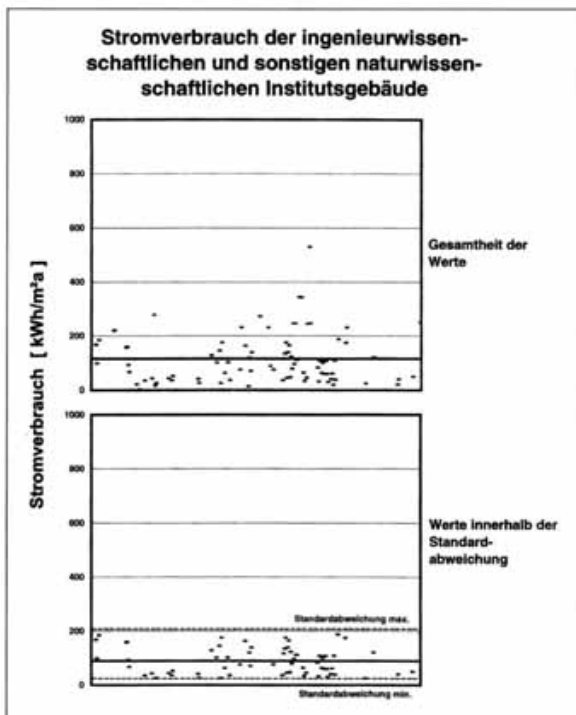


Bild 22. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs von ingenieurwissenschaftlichen und von sonstigen naturwissenschaftlichen Institutsgebäuden an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

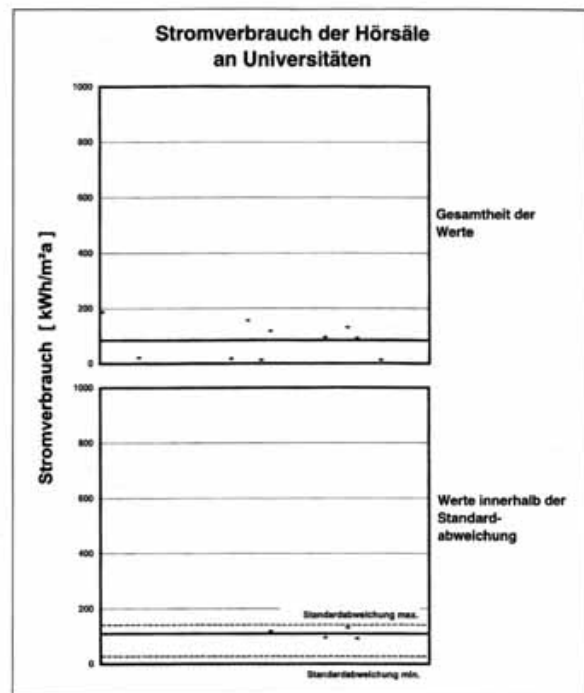


Bild 23. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs der Hörsäle an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

Geisteswissenschaftliche Institutsgebäude

Aus den insgesamt 96 vorliegenden Stromverbräuchen, die geisteswissenschaftlichen Instituten zuzuordnen sind, berechnet sich der Mittelwert zu $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Begrenzt man die Wertemenge auf die 82 Gebäude innerhalb der Standardabweichung gemäß *Bild 20*, das sind 85% aller Werte, so ergibt sich ein Mittelwert von $37 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Auch hier werden vor allem Daten im oberen Wertebereich ausgesondert.

Medizinische, biologische, chemische und pharmazeutische Institutsgebäude

Ähnlich dem Heizenergieverbrauch sind auch beim Stromverbrauch dieser Institute aufgrund von Versuchen höhere Werte als bei den Geisteswissenschaften zu erwarten. Die Stromverbräuche der ausgewerteten 27 Gebäude decken einen Bereich von 53 bis $618 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ab. Innerhalb der Standardabweichung verringert sich der Mittelwert, wie *Bild 21* zeigt, auf $243 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bei 20 zu berücksichtigenden Daten.

Ingenieurwissenschaftliche und sonstige naturwissenschaftliche Institutsgebäude

Wertet man die verfügbaren 88 Stromverbräuche für die verbleibenden naturwissenschaftlichen und die ingenieurwissenschaftlichen Institutsgebäude aus, so erhält man innerhalb eines Wertebereichs von $2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bis $531 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ einen Mittelwert von $116 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. *Bild 22* zeigt, daß bei der Reduzierung der Wertemenge auf 67 Daten innerhalb der Standardabweichung ein Mittelwert von $89 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ entsteht.

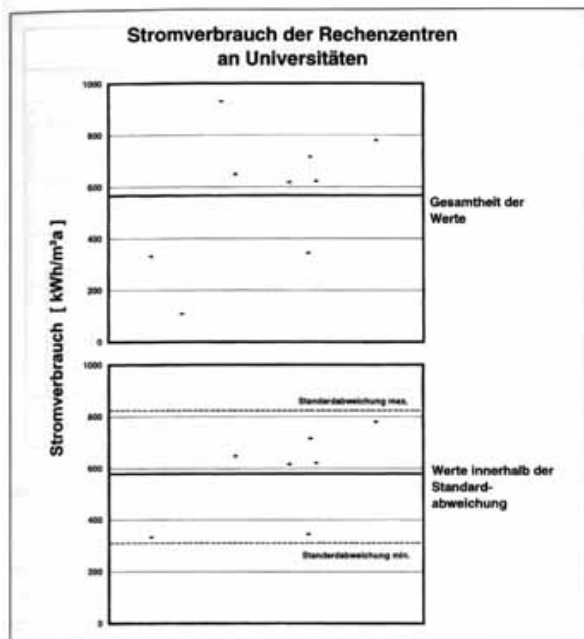


Bild 24. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs der Rechenzentren an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

Hörsäle

Aus den vorliegenden 10 Stromverbräuchen von separaten Hörsälen errechnet sich ein Mittelwert von $85 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Innerhalb der Standardabweichung verbleiben nur 4 Gebäude, die einen Mittelwert von $109 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bilden, wie *Bild 23* zeigt.

Rechenzentren

Die verfügbaren Stromverbräuche von 9 Rechenzentren variieren zwischen $110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und $931 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Berücksichtigt man alle Daten für die Mittelwertberechnung, so ergibt sich ein Wert von $567 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, bei einer Eingrenzung der Wertmenge mittels Standardabweichung, gemäß *Bild 24*, ein Wert von $580 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Diese hohen Stromverbräuche sind bei der technischen Ausrüstung von Rechenzentren zu erwarten gewesen.

Verwaltungsgebäude, Bibliotheken und Mensen

Aus den 56 Stromverbräuchen, die bei Gebäuden gemessen wurden, die Verwaltungen, Bibliotheken und Mensen beinhalten, berechnet sich der Mittelwert zu $115 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Durch Einschränkung der Wertmenge im Bereich der Standardabweichung ergibt sich ein niedrigerer Mittelwert von $72 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. *Bild 25* macht deutlich, dass fast ausschließlich Stromverbräuche im oberen Wertebereich wegfallen.

Außenanlagen an Universitäten

Diese Versuchsanlagen gehen mit 17 Stromverbräuchen in die Auswertung ein. Aus der Gesamtheit aller Werte, die einen Wertebereich von 13 bis $803 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ abdeckt, errechnet sich ein Mittelwert von $234 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Bei der Einschränkung der Wertmenge in den Bereich der Standardabweichung, beträgt er bei 14 in der Auswertung verbleibenden Daten $224 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, wie *Bild 26* zeigt.

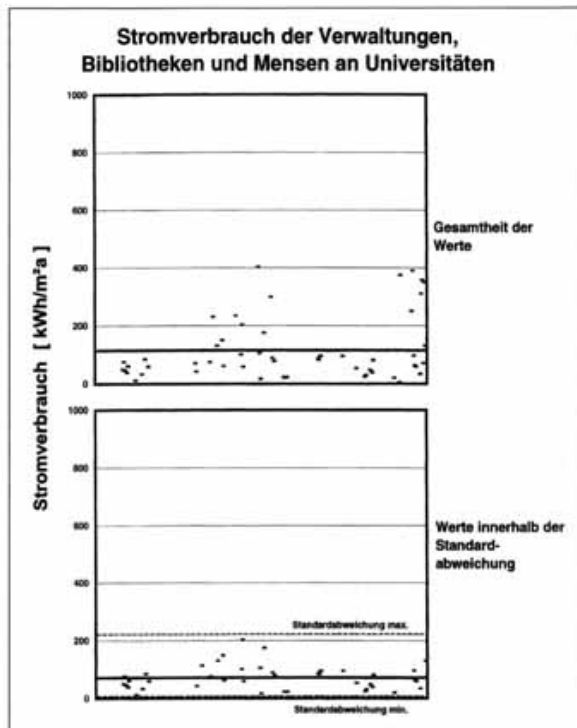


Bild 25. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs der Verwaltungen, Bibliotheken und Mensen an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

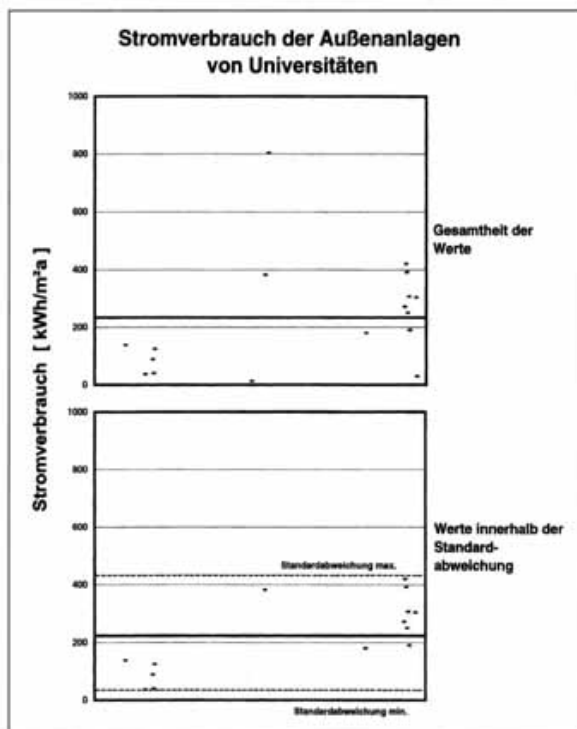


Bild 26. Gegenüberstellung des Stromverbrauchs der Außenanlagen an Universitäten als Gesamtheit der Werte (Bild oben) und als Werte innerhalb der Standardabweichung (Bild unten) mit den jeweiligen Mittelwerten.

4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Heizenergieverbrauch

Der vorgefundene Wertebereich für den Heizenergieverbrauch, bezogen auf die Grundfläche von Bildungsgebäuden in Deutschland, reicht von $3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bis zu $1479 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Aus diesem Grund wurden die Gebäudetypen getrennt voneinander untersucht. Um die „Exoten“ aus dem Wertebereich auszufiltern, wurden ergänzend nur die Daten ausgewertet, die sich innerhalb der Standardabweichung der jeweiligen Gruppe befinden. Bild 27 zeigt die Gegenüberstellung der sich daraus ergebenden Mittelwerte für die Gebäudetypen Kindergärten, Schulen, Schulsporthallen, Fachhochschulen und Universitätsgebäude. Obwohl die Streubreite ursprünglich sehr groß war, ergeben sich nach der Streichung der „Exoten“ relativ ähnliche Mittelwerte. Den höchsten Mittelwert weisen die Sporthallen mit $238 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf, gefolgt von den Universitätsgebäuden mit $226 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Bei den Sporthallen muss allerdings berücksichtigt werden, dass insgesamt nur 14 Heizenergieverbräuche vorlagen und davon nur 7 innerhalb der Standardabweichung berücksichtigt wurden. Die Mittelwerte der Heizenergieverbräuche von Kindergärten, Schulen und Fachhochschulen liegen mit $201 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, $211 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und $191 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ dicht beieinander.

Teilt man die Universitätsgebäude gemäß ihrer Nutzungsart auf, so entstehen größere Divergenzen bei den Mittelwerten innerhalb der Standardabweichung, wie Bild 28 zeigt. Während die geisteswissenschaftlich genutzten Gebäude ebenso wie die Gebäude der Naturwissenschaften ohne Medizin, Biologie, Chemie und Pharmazie zusammen mit den Ingenieurwissenschaften und die Verwaltungen, Bibliotheken und Mensen einen mittleren Heizenergieverbrauch ähnlich dem der Kindergärten auf-

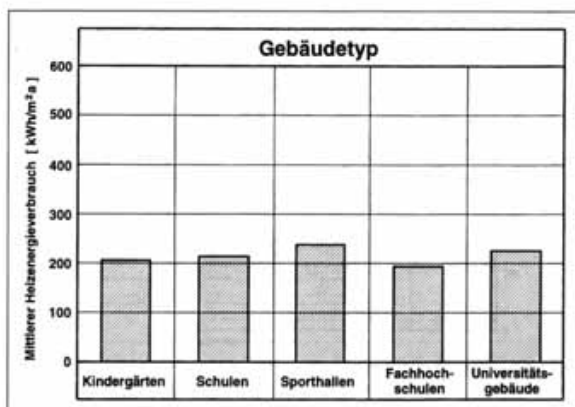


Bild 27. Mittelwerte des Heizenergieverbrauchs der Daten innerhalb der Standardabweichung für die verschiedenen Bildungsgebäudetypen.

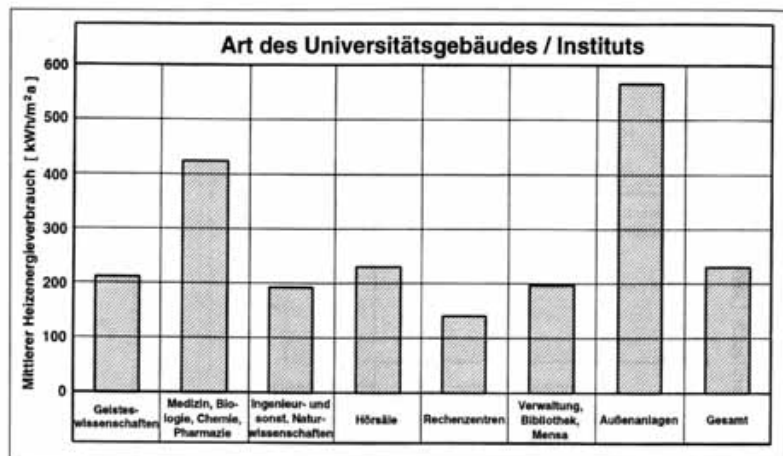


Bild 28. Mittelwerte des Heizenergieverbrauchs der Daten innerhalb der Standardabweichung für die verschiedenen Universitätsgebäudearten.

weisen, weichen die Rechenzentren, die Außenanlagen und die Gebäude für Medizin, Biologie, Chemie und Pharmazie stark von den übrigen Werten ab. Die speziellen Naturwissenschaften benötigen aufgrund der dort durchgeführten Versuche einen höheren Mittelwert von $426 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, die Rechenzentren einen geringen von $140 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf. Hier sorgen die internen Gewinne durch Computer und andere Geräte für eine Entlastung des Heizenergieverbrauchs. Bei den Außenanlagen handelt es sich vermehrt um beheizte Tier- und Pflanzenzuchten, deren mittlerer Heizenergieverbrauch $569 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ beträgt. Die Hörsäle weisen einen gemittelten Heizenergieverbrauch von $226 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf.

Stromverbrauch

Bei Berücksichtigung aller zusammengetragener Stromverbrauchsdaten ergibt sich ein Wertebereich von 1 bis $931 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Die Mittelwerte der Daten innerhalb der Standardabweichung bei den einzelnen Gebäudetypen sind in Bild 29 zusammengestellt. Die mittleren Stromverbräuche von Kindergärten und Schulen liegen bei $22 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bzw. $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Die Fachhochschulen

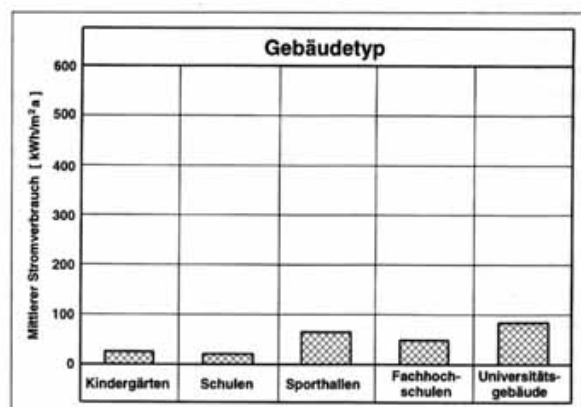


Bild 29. Mittelwerte des Stromverbrauchs der Daten innerhalb der Standardabweichung für die verschiedenen Bildungsgebäudetypen.

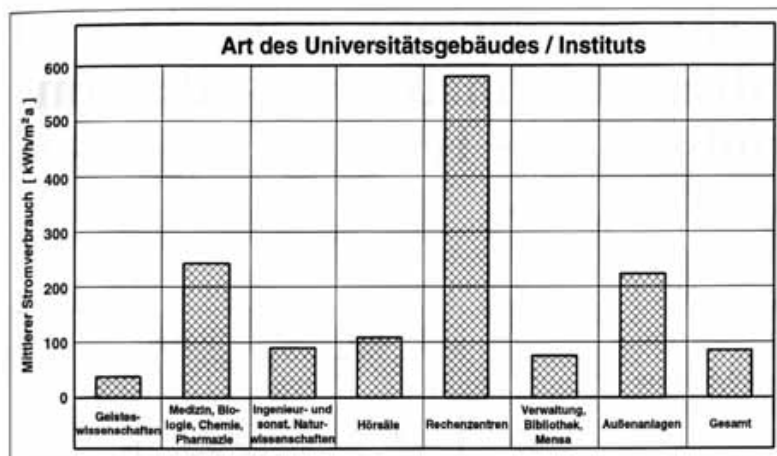


Bild 30. Mittelwerte des Stromverbrauchs der Daten innerhalb der Standardabweichung für die verschiedenen Universitätsgebäudearten.

benötigen gemäß dieser Auswertung durchschnittlich ca. 45 kWh/m²a Strom, also etwa das Doppelte. Aus den 4 ermittelten Stromverbräuchen von separaten Sporthallen errechnet sich ein Mittelwert von 63 kWh/m²a. Hier sollten jedoch für eine gefestigte Aussage noch weitere Daten hinzugefügt werden. Der Mittelwert des Stromverbrauchs aller Universitätsgebäude beträgt 82 kWh/m²a und ist damit viermal so hoch wie die der Schulen.

Unterteilt man die Universitätsgebäude nach ihrer Nutzung, wie in Bild 30, so erkennt man, dass sie recht unterschiedliche, teilweise höhere Mittelwerte aufweisen. Die ingenieurwissenschaftlich genutzten Gebäude mit den ihnen zugeordneten Naturwissenschaften sowie die Verwaltungen, Bibliotheken und Mensen besitzen Mittelwerte ähnlich dem Gesamtuniversitätsmittelwert, nämlich 89 bzw. 72 kWh/m²a. Die geisteswissenschaftlichen Institutsgebäude benötigen im Schnitt nur 37 kWh/m²a. In Hörsälen werden durchschnittlich 109 kWh/m²a Strom für Beleuchtung, raumtechnische Anlagen etc. verbraucht. Medizinische, biologische, chemische und pharmazeutische Institute weisen nicht nur einen hohen mittleren Heizenergie- sondern mit 243 kWh/m²a auch einen hohen mittleren Stromverbrauch auf. Ähnlich verhält es sich bei den Außenanlagen mit 224 kWh/m²a als mittleren Stromverbrauch. Dem eher geringeren Heizenergieverbrauch der Rechenzentren steht, wie bereits angedeutet, ein extrem hoher Stromverbrauch gegenüber. Der Mittelwert des Stromverbrauchs ist mit 580 kWh/m²a ca. 30 mal größer als der der Schulen. Allerdings sollten zur Absicherung der Verbrauchswerte für Rechenzentren und Hörsäle noch zusätzliche Daten ermittelt werden.

Einsparpotential

Bei den hier betrachteten Gebäuden handelt es sich um große, meist mit kompakter Form errichtete Gebäude, die, wenn sie zur Zeit errichtet werden würden, die Wärmeschutzverordnung 1995 einhalten müssten. Der darin vorgeschriebene maximale Heizwärmebedarf läge dann je nach A/V-Verhältnis zwischen 54 und 100 kWh/m²a. Durch energetische Sanierungen kann der Bestand in ähnliche Bereiche gesenkt werden. Einsparungen im Heizenergiebedarf von über 100 kWh/m²a können praktisch erreicht werden, wie Modellvorhaben gezeigt haben, die vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik betreut und anschließend messtechnisch ausgewertet wurden.

Während sich der Heizenergieverbrauch vorher zu ca. 210 bzw. 220 kWh/m²a ergab und damit den bundesdeutschen Mittelwert gut abgebildet hat, stellt sich nach der Sanierung ein Heizenergieverbrauch von ca. 55 bzw. 60 kWh/m²a ein [1]. Dies zeigt, dass die Heizenergieeinsparung im Sanierungsfall 100 kWh/m²a und mehr betragen kann.

Der Stromverbrauch kann entweder durch den Einsatz von energiesparenden Geräten und Beleuchtung oder durch den energieeffizienten Einsatz vorhandener Geräte verringert werden. In einem der oben erwähnten Modellvorhaben wird der Kunstlichtbedarf um 20% durch eine tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung reduziert. Gespart werden kann aber auch z. B. durch Einsatz von blendungsfreien Verglasungen im Sporthallenbereich, damit der dann nicht mehr nötige Sonnenschutz den Kunstlichteinsatz erübrigt. Bei Rechenzentren sollten energiesparende Geräte eingesetzt werden und der Anteil der Stand-by-Zeit zugunsten von gänzlichem Abschalten verringert werden.

Manche der eingegangenen Daten wurden als Verläufe über mehrere Jahre dokumentiert. Hieraus war zu erkennen, dass die Betreiber der Bildungsstätten versuchen, durch betriebliche Maßnahmen den Energieverbrauch der Gebäude zu senken. Eine deutliche Verringerung des Energieverbrauchs und damit auch des CO₂-Ausstoßes kann jedoch nur durch eine durchdachte energetische Sanierung der Gebäudehülle, Heizungsanlage und Anlagentechnik erreicht werden, die dann aber auch wirtschaftliche Gesichtspunkte nicht ganz außer Acht lassen darf.

Literatur

- [1] Kienzlen, V.: Schulen lernen Energiesparen. Erfahrungen mit Energiesparprojekten an Stuttgarter Schulen. BundesBauBlatt 47 (1998) H. 9, S. 20–24.