

Matthias Unholzer, Peter Michl, Thomas Lützkendorf

**Ermittlung von Kennwerten
für den Energiebedarf von
Personenaufzügen in Wohn-
und Nichtwohngebäuden – ein
Beitrag zur Vervollständigung der
Energiebilanz**

F 2958

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9568-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

*Forschungsprojekt:
Ermittlung von Kennwerten für den Energiebedarf von
Personenaufzügen in Wohn- und Nichtwohngebäuden –
ein Beitrag zur Vervollständigung der Energiebilanz*

Abschlussbericht (Mai 2015)

Forschungsprogramm

Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMUB (ehem. BMVBS)

Projektlaufzeit

1. August 2012 bis 01. Februar 2014 (verlängert bis 31. Mai 2015)

Förderkennzeichen

II 3-F20-11-1-018 / SWD-10.08.18.7-12.11

Die Verantwortung für den Inhalt des Abschlussberichtes liegt beim Autor.

im Auftrag

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von

Dipl.-Wi.-Ing Matthias Unholzer (mit Unterstützung durch Dipl.-Wi.-Ing. Peter Michl, Abschnitt 6.4)

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bereich II / Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Ökonomie und Ökologie des Wohnungsbaus

(Leiter Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf)

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Praxispartner

ThyssenKrupp Elevator AG

Patrick Bass (PSLM/R&D), Sascha Froemming (Product/R&D)

ThyssenKrupp Allee 1

45143 Essen



Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung.....	9
Zusammenfassung.....	10
1. Veranlassung und Zielsetzung.....	12
2. Herangehensweise und Aufbau des Berichts	15
3. Methodische Voraussetzungen und Grundlagen	16
3.1 Frühere Forschungsprojekte.....	16
3.1.1 Elektrizitätsverbrauch und Einspar-Potenziale (S.A.F.E).....	16
3.1.2 Optimierung der Energieeffizienz bei Aufzügen (E4).....	17
3.1.3 Analyse des Energieverbrauchs (Beier).....	19
3.1.4 Standby-Optimierung (Schweizerische Eidgenossenschaft).....	19
3.2 Richtlinien und Normen.....	20
3.2.1 VDI 4707 Blatt 1.....	20
3.2.2 VDI 4707 Blatt 2.....	23
3.2.3 E DIN EN ISO 25745-1	24
3.2.4 E DIN EN ISO 25745-2.....	25
3.2.5 SIA 380/4	26
4. Anlagentypologie	28
4.1 Treibscheibenaufzüge (Traktionsaufzüge).....	29
4.2 Hydraulikaufzüge	30
5. Gebäudetypologien.....	31
5.1 Wohngebäude	31
5.1.1 Dimensionierung der Aufzüge.....	31
5.1.2 Bestimmung der Fahrtenzahl und der Fahrtbetriebszeit	32
5.1.3 Wohngebäude-Typologie (Förderbedarfsmatrix)	33
5.2 Nichtwohngebäude	34
5.2.1 Dimensionierung der Aufzüge.....	35
5.2.2 Nichtwohngebäudetypen in Deutschland.....	35
6. Erarbeitung der Energiekennwerte	37
6.1 Planung der Messkampagne	37
6.1.1 Auswahl der Messtechnik und Entwicklung eines Leitfadens	37
6.1.2 Geeignete Auswahl von Messobjekten	37
6.2 Durchführung der Messkampagne.....	38
6.2.1 Pilotmessungen	38
6.2.2 Finale Messungen und Hochrechnungen	40

Methode mit Kennwertebaukasten (ausführliches Verfahren).....	41
Methode mit Korrekturfaktoren (vereinfachtes Verfahren)	42
6.3 Auswertung von Produktdokumentationen	43
6.4 Beschreibung und Analyse des Datensatzes der Messungen	43
Univariate Betrachtung.....	47
Multivariate Betrachtung	50
6.5 Entwicklung des Kennwertedatenblatts	52
6.6 Alternative zum Kennwertedatenblatt: die vereinfachte Berechnung.....	53
7. Fazit und Ausblick.....	56
Anhang 1: Wohngebäudetypologie / Förderbedarf.....	57
Anhang 2: Anlagen-Gebäude-Matrix (ursprünglich geplante Version)	58
Anhang 3: Leitfaden für Messkampagne.....	59
Literatur	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erweiterung der Bilanzgrenzen (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [1])	13
Abbildung 2: Checkliste Vertiefungsmodul Aufzüge (Quelle: http://www.ressource-deutschland.de/)	14
Abbildung 3: Verteilung der ca. 650.000 Aufzüge im Gebäudebestand in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung und [2])	18
Abbildung 4: Energieverbräuche in GWh nach Gebäudetyp mit Methode 2 (Quelle: eigene Darstellung und [2])	18
Abbildung 5: Relativer Vergleich des Energiebedarfs unterschiedlicher Antriebsarten, ausgehend vom polumschaltbaren Antrieb (Quelle: [3])	30
Abbildung 6: Geschosfaktor (Quelle: [4])	32
Abbildung 7: Wochenmessung an drei Aufzügen (Quelle: ThyssenKrupp)	40
Abbildung 8: Tagesgang Thyssenhaus (Quelle: ThyssenKrupp)	40
Abbildung 9: Häufigkeiten der abhängigen metrischen Variablen (JVVDI und JVWM in kWh/Jahr, QVDIWM und ASTVDI in %)	47
Abbildung 10: Häufigkeiten der unabhängigen metrischen Variablen	48
Abbildung 11: Häufigkeiten der Eingangsgrößen zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs nach VDI 4707 Blatt 1 (LASTBY in W, VDIREF in Wh)	48
Abbildung 12: Häufigkeiten der Eingangsgrößen zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs auf Basis der Wochenmessungen (pro Wochentag in Wh)	49
Abbildung 13: Häufigkeiten der kategorialen unabhängigen Variablen	49
Abbildung 14: Abhängige vs. kategoriale unabhängige Variablen (JVVDI und JVWM in kWh, QVDIWM und ASTVDI in %)	50
Abbildung 15: Verbrauch der Referenzfahrt nach VDI in Abhängigkeit der Ausführung von Antrieb und Regelung (in Wh)	51
Abbildung 16: Anteile der installierten Ausführungen von Antrieb und Regelung innerhalb der Nutzungskategorien	51
Abbildung 17: Förderhöhen (in m), Tragfähigkeiten (in kg) und Nenngeschwindigkeiten (in m/s) vs. Gebäudetyp und Nutzungskategorie	52

(Abbildungen ohne Quellenangaben wurden vom Autor erstellt.)



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Energieverbrauch typischer Seilaufzüge mit frequenzgeregelten, getriebelosen Antrieben mit PM-Motoren (Quelle: [5])	17
Tabelle 2: geschätzter jährlicher Energiebedarf in GWh von Aufzügen und Fahrtreppen in Deutschland (Quelle: [2], vom Autor ins Deutsche übersetzt)	17
Tabelle 3: Nutzungskategorien für Aufzüge nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [6])	21
Tabelle 4: Lastkollektiv (in Anlehnung an [6])	21
Tabelle 5: Leistungsaufnahme im Stillstand in Klassen eingeteilt nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [6])	22
Tabelle 6: Energiebedarfsklassen für das Fahren nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [6])	22
Tabelle 7: Energieeffizienzklassen eines Aufzugs mit $Q = 630$ kg und $v = 1$ m/s (Quelle: [6])	22
Tabelle 8: Gewichtung der Betriebsmodi zur Ermittlung des Stillstandsbedarfs nach VDI 4707 Blatt 2 (Quelle: [7])	23
Tabelle 9: Technologiefaktoren nach VDI 4707 Blatt 2 (Quelle: [7])	24
Tabelle 10: Nutzungskategorien für Aufzüge nach E DIN EN ISO 25745-2:2013-06 (Quelle: [8])	26
Tabelle 11: Zeitverhältnisse der Stillstandszeiten Nach D DIN EN ISO 25745-2:2013-06 (Quelle: [8])	26
Tabelle 12: Wirkungsgrad des Antriebs (Quelle:[9])	27
Tabelle 13: Wirkungsgrad der Regelung (Quelle:[9])	27
Tabelle 14: Wirkungsgrad der Rekuperation (Quelle:[9])	27
Tabelle 15: Geschwindigkeit (Quelle:[9])	27
Tabelle 16: Anzahl der Fahrten pro Jahr je nach Benutzung (Quelle: [9])	28
Tabelle 17: Auslegung von Aufzügen für einfache Wohngebäude (Quelle: [10])	31
Tabelle 18: Wohnungsbelegung in Personen (Quelle: [11])	33
Tabelle 19: Auslegung von Aufzügen für Bürogebäude (Quelle: [10])	35
Tabelle 20: Nichtwohngebäudetypen (Quelle: [12])	36
Tabelle 21: modernisierte Bestandsanlage nach 2005 (Quelle: ThyssenKrupp)	38
Tabelle 22: modernisierte Bestandsanlage nach 1995 (Quelle: ThyssenKrupp)	39
Tabelle 23: modernisierte Bestandsanlage nach 2005 (Quelle: ThyssenKrupp)	39
Tabelle 24: Kennwertebaukasten (eigene Darstellung)	42
Tabelle 25: Abkürzungsverzeichnis der metrischen Variablen	44
Tabelle 26: Abkürzungsverzeichnis der kategorialen Variablen	44
Tabelle 27: Numerische Zusammenfassung der metrischen Variablen	45
Tabelle 28: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen	45
Tabelle 29: Numerische Zusammenfassung der metrischen Variablen im reduzierten Datensatz	46
Tabelle 30: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen im reduzierten Datensatz	46
Tabelle 31: Energiekennwerte (kWh je Aufzug pro Jahr) als Bandbreiten in Abhängigkeit der Nutzungskategorie	53

(Tabellen ohne Quellenangaben wurden vom Autor erstellt.)



Vorbemerkung

Der Abschlussbericht mit Stand Mai 2015 bezieht sich auf das Forschungsprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau: „Ermittlung von Kennwerten für den Energiebedarf von Personenaufzügen in Wohn- und Nichtwohngebäuden – ein Beitrag zur Vervollständigung der Energiebilanz“. Das Projekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, ehem. BMVBS) über das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) gefördert und mit zusätzlichen Mitteln und Eigenleistungen der ThyssenKrupp Elevator AG (Praxispartner) realisiert.

Die Verantwortung für den Inhalt des Abschlussberichtes liegt beim Autor.
(Förderkennzeichen II 3-F20-11-1-018 / SWD-10.08.18.7-12.11)

Der Autor bedankt sich für die zur Verfügung gestellten Fördermittel des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB) und für die Unterstützung durch den Praxispartner.

Zusammenfassung

Personenaufzüge in Wohn- und Nichtwohngebäuden tragen in einem Umfang zum Energieverbrauch von Gebäuden bei, der bei einer umfassenden Analyse der energetischen Qualität nicht mehr vernachlässigt werden kann. Sie weisen nicht zuletzt durch die zunehmend höheren (gesetzlichen) energetischen Anforderungen an Gebäude einen steigenden relativen Anteil an der Gesamtenergiebilanz auf, der insbesondere bei der Planung bislang noch nicht hinreichend genau abgeschätzt bzw. mit Kennwerten beschrieben werden kann. Dies ist insbesondere für gesamtenergetisch bilanzierte Gebäude von besonderer Bedeutung. Gleichzeitig wird das barrierefreie Bauen und damit der Einsatz von Personenaufzügen durch den demografischen Wandel immer wichtiger. Dies führt in der Tendenz zu einer Zunahme des Energieaufwandes für den Personentransport in Gebäuden.

In diesem Forschungsvorhaben wurden Methoden und Arbeitsgrundlagen zur Ermittlung und Interpretation von spezifischen Energiekennwerten von neuen sowie bestehenden Personenaufzügen behandelt und aufbereitet. Im Ergebnis sollen die in der Vergangenheit oft auf Schätzungen beruhenden Angaben und Pauschalwerte des Energiebedarfs einer Aufzugsanlage durch empirisch belegbare oder aus Berechnungen abgeleitete Energiekennwerte (teilweise angegeben in Bandbreiten) konkretisiert werden. Diese können u.a. für die Erstellung von Ökobilanzen und Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Aufzüge sowie die Lebenszykluskostenrechnung genutzt werden. Unterschiedliche Anlagentypen (differenziert nach Technologien) sollen in Abhängigkeit des Gebäudetyps (Betriebsbedingungen, Nutzungsintensität) hinsichtlich ihres Einflusses auf die Energiebilanz eines Gebäudes und damit der energieverbrauchsbedingten Umweltwirkungen analysiert werden. Die Differenzierung der Energiekennwerte von Personenaufzügen nach technischen Eigenschaften und Gebäudemerkmalen soll helfen, bisher oft genutzte pauschale Ansätze zu ersetzen und Unsicherheiten im Umgang mit der Beschreibung des Energiebedarfs von Personenaufzügen in der Nutzungsphase zu überwinden.

Der Vergleich von berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch im realen Betrieb mit einem geeigneten Messkonzept (u.a. zur Erfolgskontrolle von Energiekonzepten, Soll-Ist-Vergleich) setzt einheitliche Systemgrenzen voraus. So ist aus Sicht des Autors der elektrische Energiebedarf von Aufzügen in der Planung auch deshalb zu berücksichtigen, weil er später in der Nutzungsphase i.d.R. im Gesamtstromverbrauch des Gebäudes erfasst wird (wenn auch nicht in jedem Falle separat ausgewiesen). Im öffentlich rechtlichen Energiebedarfsausweis ist dieser zur Zeit jedoch nicht enthalten. Planern soll insbesondere für die frühe Planungsphase mit den Forschungsergebnissen eine Orientierungshilfe für Aufzugsanlagen zur Verfügung gestellt werden, um nachvollziehbare Aussagen zum Energieverbrauch in der Nutzungsphase treffen zu können.

Für Neuanlagen (hier ab Baujahr 2010 als Schwerpunkt der Untersuchungen) und einige Bestandsanlagen sollen die Energieverbräuche durch eine Messkampagne ermittelt und in Abhängigkeit von Nutzungsrandbedingungen aufbereitet und dargestellt werden. Zur Bildung und Validierung der Kennwerte werden bereits existierende Normen und Richtlinien zur Energiebedarfsberechnung bei Aufzugsanlagen eingesetzt. Die Ergebnisse könnten dazu beitragen, diese Normen und Richtlinien weiterzuentwickeln.

Die Eigenleistungen des Projektpartners bestanden vereinbarungsgemäß u.a. darin, die Messkampagne zu planen und durchzuführen. Aufgrund unternehmensinterner und organisatorischer Umstände wurden vom Praxispartner eine deutlich geringere Anzahl von Anlagen gemessen als ursprünglich vereinbart. Zudem wurden die Daten zeitlich stark verzögert ausgeliefert. Diese Umstände führten dazu, dass die Projektziele und die Erwartungen an die Ergebnisse im fortgeschrittenen Projektverlauf entsprechend angepasst werden mussten.

Trotz der notwendigen Anpassungen wurden folgende Ziele erreicht:

- Erarbeitung und Aufbereitung methodischer Grundlagen zur Abschätzung des Energiebedarfs von Personenaufzügen,

- Entwicklung einer Anlagen- und Gebäudetypologie,
- Angabe von möglichen Bandbreiten der jährlichen Energieverbräuche in Abhängigkeit der Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1,
- Herleitung einer vereinfachten Formel zur Abschätzung des Energiebedarfs von Personenaufzügen.

1. Veranlassung und Zielsetzung

In der aktuellen EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden¹ (European Directive Energy Performance of Buildings - EPBD) wird gefordert, bei der öffentlich rechtlichen Energiebedarfsberechnung in den Mitgliedsstaaten mindestens die Beheizung, Klimatisierung, Belüftung und eingebaute Beleuchtung zu berücksichtigen.

Darüber hinausgehend sind auch bei den zentralen Diensten und der allgemeinen Haustechnik, wie z.B. den Aufzügen, mittlerweile nicht mehr zu vernachlässigende Anteile am Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes zu erkennen. Entsprechende Hinweise enthalten u.a. zurückliegende Forschungsvorhaben mit Anteilen der Aufzüge von bis zu 10 % [13]. Die Datenbank des Energielabels „Green Rating“ nennt immerhin 5 % (Stand 2012) des Gesamtendenergieaufwands neben Beleuchtung, Lüftung, Kühlung und Heizung [14]. Mögliche Bandbreiten sind dabei in Abhängigkeit der Gebäudenutzung stark variabel.

In der ab 01.05.2014 in Kraft getretenen novellierten Energieeinsparverordnung EnEV 2014² sind Aufzüge nach wie vor nicht in den Bilanzierungsumfang integriert.³ Bei zunehmend sinkendem thermischen Energiebedarf für Heizung und Kühlung sowie elektrischen Energiebedarf für Beleuchtung und Lüftung ist jedoch zu erwarten, dass der anteilige Energiebedarf von Aufzügen noch weiter ansteigen und damit zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Insbesondere bei Gebäuden mit ausgeglichener Energiebilanz, wie z.B. Net-Zero-Energy-Buildings⁴ (Net-ZEBs), und bei Gebäuden mit positiver Energiebilanz, wie z.B. das Effizienzhaus Plus⁵, ist es entscheidend, alle relevanten Energieverbräuche, d.h. auch die nutzerspezifischen und die allgemeinen haustechnischen Verbräuche, zu bilanzieren. Die systematische Erweiterung der Bilanzgrenzen zeigt Abbildung 1. Während im Wohnungsbau nach bisher gültiger EnEV 2009 (bzw. nach aktuell gültiger EnEV 2014) zur Ermittlung des Energiebedarfs für Heizung und Warmwasser die Normenreihen DIN 4108 und DIN 4701 relevant sind, wird im Nichtwohnungsbau auch die fest eingebaute Beleuchtung nach der Normenreihe DIN V 18599 berücksichtigt⁶. Darüber hinausgehend wird vom Autor empfohlen, zukünftig neue Verfahren anzuwenden bzw. noch stärker zu etablieren sowie Datengrundlagen zu entwickeln, die die Energiebedarfsermittlung von Aufzügen, z.B. nach der Richtlinienreihe VDI 4707 oder auf der Basis von Messungen unter realitätsnahen Bedingungen, erlauben.

1 Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rats vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

2 Die am 01.05.2014 in Kraft getretene novellierte Energieeinsparverordnung wird teilweise auch als EnEV 2013 bezeichnet.

3 vgl. <http://www.bmub.bund.de/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-und-sanieren/energieeinsparverordnung/> (zuletzt geprüft am 10.04.2015)

4 vgl. www.enob.info

5 vgl. <http://www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/wege-zum-effizienzhaus-plus/> (zuletzt geprüft am 10.04.2015)

6 Nach EnEV 2014 ist die DIN V 18599 auch für Wohngebäude anzuwenden, sofern diese gekühlt werden.

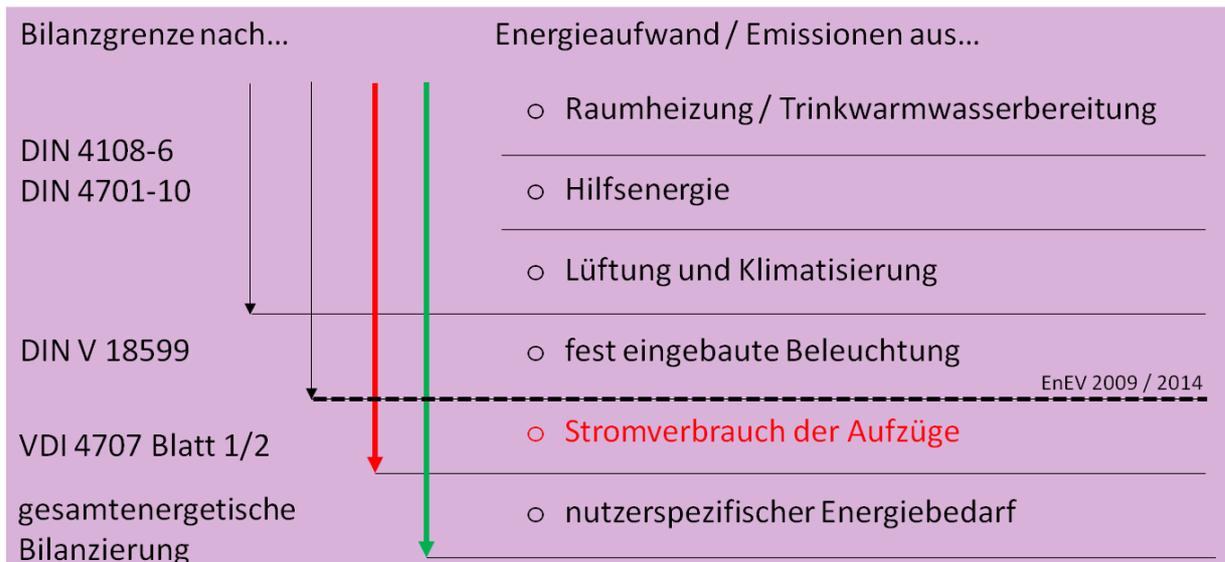


Abbildung 1: Erweiterung der Bilanzgrenzen (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an [1])

Vor diesen Hintergründen zeigt sich, dass Methoden und Hilfsmittel zur Abschätzung bzw. Berechnung des Energiebedarfs aller im Gebäude vorhandenen Verbraucher in unterschiedlichen Planungsphasen gefragt sind. Der vorliegende Forschungsbericht liefert hierzu einen Beitrag für Personenaufzüge in Wohn- und Nichtwohngebäuden.

Die realitätsnahe Abschätzung bzw. Berechnung des Energiebedarfs von Aufzügen soll einerseits dazu dienen, auf zukünftige gesetzliche und normative Anforderungen vorbereitet zu sein. Andererseits werden belastbare Voraussetzungen geschaffen, um zukünftige Energiekosten, z.B. im Rahmen einer Lebenszykluskostenrechnung, besser prognostizieren zu können. Angaben über zu erwartende Energieverbräuche in der Nutzungsphase von Aufzügen könnten darüber hinaus in hersteller- und produktspezifischen Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Aufzüge den Planern und Entscheidern zur Verfügung gestellt werden. Ein großer Aufzughersteller bot EPDs für zwei Standardaufzüge bereits an.⁷ Der Energiebedarf in der Nutzungsphase ging darin als pauschaler Wert mit einer angenommenen Anzahl von Fahrten (Starts) pro Jahr ein.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens bieten die Möglichkeit, den Energiebedarf während der Nutzungsphase in Abhängigkeit verschiedener Nutzungsszenarien und Gebäudetypen auszuwählen und somit eine realitätsnähere Aussage zu gewährleisten. Es ist zu erwarten, dass derartige Informationen zunehmend von Planern und Entscheidern abgefragt werden. Die „International EPD Cooperation (IEC)“ erarbeitet zur Zeit einen Entwurf für „Product Category Rules“ (PCR) für Aufzüge.^{8 9} Weitere internationale Normungstätigkeiten zur Nachhaltigkeit von Bauwerken nennen zur Beurteilung der Umweltqualität von Gebäuden anhand der gebäudebezogenen Energieverbräuche in der Nutzungsphase explizit auch Aufzüge (Zitat): „Der gebäudebezogene Energiebedarf anderer gebäudeinterner technischer Systeme, die für die technische und funktionale Leistung des Gebäudes notwendig sind, jedoch nicht durch die Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden abgedeckt sind (wie z.B. **Aufzüge**, Fahrtreppen, Sicherheits- und Kommunikationssysteme), sind [...] einzubeziehen; dies muss gesondert dokumentiert werden [...]“. ([15]).

Im Entwurf zur DIN EN 16627:2013 (Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden – Methoden) werden die „Szenarien für die Energienutzung im Betrieb“ wie folgt beschrieben (Zitat): „Die Szenarien müssen die Annahmen bezüglich des Energieverbrauchs beschreiben, einschließlich der durch die Nutzung der folgenden Systeme verbrauchten Energie (brauchen sich aber nicht darauf zu beschränken): Heizung, Kühlung, Be- und Entlüftung, Haushaltswarmwasser, Beleuchtung und Steuerung, wie in

7 vgl. <http://www.kone.com/en/responsibility/> (für „KONE MonoSpace“ Stand 2010, für „KONE EcoSpace“ Stand 2012, zur Zeit nicht verfügbar, 16.04.2015)

8 UN CPC 4354, vgl. <http://unstats.un.org/unsd/cr/registry/regcs.asp?Cl=25&Lg=1&Co=435> (zuletzt geprüft am 10.04.2015)

9 vgl. <http://www.environdec.com/en/PCR/Detail?Pcr=9211#.VUiAsBnF-R> (zuletzt geprüft am 05.05.2015), aktueller Entwurf des Dokuments vom 04.05.2015

der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden festgelegt. **Aufzüge und Fahrtreppen sowie sonstige gebäudeinterne technische Systeme müssen ebenfalls eingeschlossen sein.**“

Im Rahmen der Klimaschutzinitiative¹⁰ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit wurde das VDI Zentrum Ressourceneffizienz ins Leben gerufen. Es setzt sich aus Experten unterschiedlichster Fachrichtungen zusammen mit dem Ziel, Industrie und Baubranche rund um das Thema Ressourceneffizienz zu beraten. Der verantwortungsvolle und nachhaltige Umgang mit Ressourcen durch den Einsatz innovativer Produkte und Verfahren sowie durchdachter Strategien steht dabei im Mittelpunkt.¹¹ Im Baubereich wird hierzu auch ein Vertiefungsmodul Aufzüge, das für die Thematik der Energieeffizienz von Aufzügen sensibilisiert, angeboten. Mit Hilfe einer Checkliste können Entscheider, Betreiber und Eigentümer eine erste Einschätzung über den energetischen Zustand ihrer Aufzugsanlagen erhalten (Abbildung 2). Die darin enthaltenen Punkte orientieren sich an Empfehlungen aus dem E4-Projekt (siehe auch Abschnitt 3.1.2) [3].

The image shows a web-based checklist for elevator energy efficiency. It is organized into two columns of questions. At the top left, there are input fields for 'Ihre PLZ:' and 'Gebäudetyp:' with a dropdown menu currently showing 'Wohngebäude'. The questions are as follows:

- Frage 1:** Sind die mechanischen Komponenten Ihres Aufzugs durch fachgerechte Montage und regelmäßige Wartung leichtgängig und reibungsarm?
 - ja
 - nahezu
 - nein
 - weiß nicht
- Frage 2:** Besitzt Ihr Aufzug eine LED-Fahrkorbbeleuchtung?
 - ja
 - nein
 - weiß nicht
- Frage 3:** Ist alle weitere, zum Aufzug gehörende Beleuchtung (z. B. der Informationsanzeigen im Fahrkorb) energiesparend ausgeführt?
 - ja, alle
 - ja, teilweise
 - nein
 - weiß nicht
- Frage 4:** Werden bei Nichtbenutzung des Aufzugs einzelne Komponenten ausgeschaltet oder in den Schlaf- bzw. Soft Off Modus versetzt?
 - ja, alle
 - ja, teilweise
 - nein
 - weiß nicht
- Frage 5:** Bei mehreren Aufzügen: Ist deren Betrieb im Verbund optimiert?
 - ja
 - nein
 - weiß nicht
 - trifft nicht zu
- Frage 6:** Werden die Schachtentlüftung, der Lüfter und das Klimagerät des Triebwerksraums sowie die Schwellenheizung temperaturgesteuert betrieben?
 - ja, alle
 - ja, teilweise
 - nein
 - weiß nicht
- Frage 7:** Verfügt Ihr Aufzug über ein modernes Triebwerk mit hohem Wirkungsgrad bzw. geringer Leistungsaufnahme?
 - ja
 - nein
 - weiß nicht

Abbildung 2: Checkliste Vertiefungsmodul Aufzüge (Quelle: <http://www.ressource-deutschland.de/12>)

¹⁰ vgl. <https://www.klimaschutz.de/de/projekt/kompetenzzentrum-ressourceneffizienz> (zuletzt geprüft am 10.04.2015)

¹¹ vgl. <http://www.vdi-zre.de/home/was-ist-re/begriffsdefinition/> (zuletzt geprüft am 10.04.2015)

¹² vollständige Adresse zum Ausfüllen des Formulars: <http://www.ressource-deutschland.de/12/instrumente/ressourcenchecks/ressourcenchecks-gebäude/aufzuege/ressourcencheck-aufzuege/> (zuletzt geprüft am 10.04.2015)

2. Herangehensweise und Aufbau des Berichts

Der vorliegende Abschlussbericht baut methodisch auf Erfahrungen und Ergebnissen früherer (internationaler) Forschungsvorhaben sowie auf deutschen und internationalen Normungstätigkeiten und Richtlinienarbeiten zur Energieeffizienz von Aufzügen auf. Der in diesem Abschlussbericht verfolgte Ansatz unterscheidet sich von bisherigen Aktivitäten durch das Ziel, Energiekennwerte bzw. Bandbreiten von Kennwerten empirisch zu ermitteln, die Planer projektspezifisch nutzen können. Dabei sollen technische Eigenschaften der Aufzugsanlage in Kombination mit Merkmalen des Gebäudes berücksichtigt werden.

Messungen an realen Anlagen mit darauf aufbauenden Analysen und Berechnungen waren wesentliche Voraussetzungen für die Durchführung des Projektes. Dabei wurden einerseits etablierte Normen und Richtlinien herangezogen und andererseits neue Verfahren entwickelt. Zu Projektbeginn war geplant, Energiekennwerte in verschiedenen „Qualitätsstufen“ und Genauigkeitsgraden anzubieten. Dabei sollten im günstigsten Fall Grenz- und Zielwerte (vergleichbar zu [16]) angegeben werden – zumindest jedoch plausible Bandbreiten für eine realitätsnahe Abschätzung (auch Korridore genannt).

Vom Projektpartner wurde eine geringere Anzahl von Messungen durchgeführt als geplant. Eine deutliche Anpassung der Ziele und damit auch der Vorgehensweise wurde notwendig. Der ursprünglich entwickelte methodische Rahmen bleibt davon unberührt. Dieser lässt sich zu einem späteren Zeitpunkt bei entsprechend besserer Datenlage weiterhin nutzen.

Nach der Aufarbeitung bereits existierender Arbeiten werden der Wohn- und Nichtwohngebäudebestand typologisiert, um den „Förderbedarf“¹³ zu ermitteln. Während bei Wohngebäuden konkrete Typvertreter definiert bzw. von einer existierenden Typologie abgeleitet werden, kann der inhomogene Nichtwohngebäudebestand zunächst nur in übergeordnete Gebäudeklassen, wie z.B. Verwaltungs- bzw. Bürogebäude, unterteilt werden.

Ursprüngliches Ziel war es auch, wie oben schon erwähnt, u.a. nach Vorbild des „LEE - Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau“ (IWU) [16] Grenz- und Zielwerte als spezifische Kennwerte angeben zu können. Eine direkte Übernahme der Systematik des LEE-Ansatzes ist jedoch nicht sinnvoll, da der bei Energiekennwerten für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung übliche Flächenbezug (z.B. Nettogrundfläche nach DIN 277) bei Aufzügen i.d.R. keine sinnvolle Aussage liefert. Vielmehr wird bei Aufzügen die Angabe eines Jahresverbrauchs bzw. -bedarfs pro Anlage angestrebt. Eine spätere Umrechnung dieser Werte auf Gebäudeflächen ist denkbar, kann aber aus Sicht des Autors nur dazu dienen, die Verbräuche von Aufzügen in bekannte Systematiken einzuordnen und grob zu vergleichen - keinesfalls jedoch als Planungsgrundlage.

¹³ im Sinne des Personenaufkommens und der Gebäudehöhe

3. Methodische Voraussetzungen und Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst Ergebnisse und Herangehensweisen früherer Forschungsprojekte aufgearbeitet. Aktuelle Normungs- und Richtlinienarbeiten werden aufgenommen und hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit analysiert. Hiermit wird ein Beitrag dazu geleistet, den aktuellen Stand der Forschung zusammenfassend darzustellen und eine Ausgangsbasis für den eigenen Forschungsansatz zu schaffen.

Zur Verwendung der Begriffe Energiebedarf und Energieverbrauch in diesem Forschungsbericht ist an dieser Stelle eine kritische Anmerkung einzufügen. Üblicherweise (z.B. im Zusammenhang mit dem öffentlich rechtlichen Energieausweis) wird der Begriff Energiebedarf bei einem berechneten Bedarf unter der Annahme von Randbedingungen verwendet. (Dieser Begriff wird auch dann verwendet, wenn der Energiebedarf unter realitätsnahen Bedingungen simuliert wird.) Vom Energieverbrauch wird jedoch immer dann gesprochen, wenn es sich um einen gemessenen Wert im realen Betrieb handelt. Es ist deshalb möglich, dass in Abhängigkeit der angenommenen Randbedingungen und Systemgrenzen Energiebedarf und Energieverbrauch voneinander abweichen. Da in den folgenden Abschnitten sowohl im Zusammenhang mit früheren Forschungsprojekten als auch mit Normen und Richtlinien von Messungen (Verbräuchen) auf zukünftigen Bedarf geschlossen wird, ist die konsequente Trennung der beiden Begriffe nicht immer möglich.

3.1 Frühere Forschungsprojekte

Die betrachteten früheren Forschungsprojekte wurden zwischen 2005 und 2010 durchgeführt und beschäftigen sich einerseits mit dem Energieverbrauch von Aufzügen zur Hochrechnung bei Gebäudebeständen und andererseits mit der Optimierung des Energieverbrauchs im Stillstand (Standby-Verbrauch). Weitere Veröffentlichungen, die sich mit Verkehrsströmen in Gebäuden, dem Förderbedarf und damit indirekt mit dem Energiebedarf von Aufzügen auseinandersetzen liegen bereits aus den 1990er Jahren und früher vor.¹⁴ Ausgewählte Erkenntnisse hieraus werden in Abschnitt 5 u.a. zur Ermittlung der Anzahl der Fahrten pro Tag bzw. der täglichen Fahrtzeit beschrieben und genutzt.

3.1.1 Elektrizitätsverbrauch und Einspar-Potenziale (S.A.F.E)

Der Schlussbericht des Forschungsvorhabens der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz (S.A.F.E.) entstand im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Schweiz) und wurde im November 2005 veröffentlicht. Nach derzeitigem Wissensstand des Autors war dies die erste Publikation, die sich mit der Thematik systematisch auf der Basis von Messungen auseinandersetzt [5].

Es wurden Stromverbrauchsmessungen in der Schweiz an 33 Aufzügen verschiedener Hersteller durchgeführt. Die gemessenen Aufzüge werden in einer Technologiematrix spezifiziert und so ausgewählt, dass bis zum damaligen Zeitpunkt gängige Technologien repräsentiert werden. Der überwiegende Teil der Anlagen befindet sich in Wohn- und Bürogebäuden. Tabelle 1 gibt die Ergebnisse der Hochrechnungen wieder. Es ist ersichtlich, dass bei niederfrequentierten Anlagen der Stromverbrauch im Stillstand (Standby), z.B. für Kabinenbeleuchtung, mit 83 % überwiegt. Bei höher frequentierten Anlagen in mittleren und großen Bürogebäuden bzw. Krankenhäusern nimmt der anteilige Stromverbrauch im Stillstand ab, d.h. der Stromverbrauch für das Fahren überwiegt.

¹⁴ vgl. <https://www.peters-research.com/index.php/support/articles-and-papers> (zuletzt geprüft am 12.04.2015)

Gebäude/Nutzung	Nutzlast [kg]	Geschwindigkeit [m/s]	Anzahl Halte	Wh pro Fahrt (ohne Standby)	Fahrten pro Jahr	kWh pro Jahr (inkl. Standby)	Anteil Standby [%]
Wohnhaus klein	630	1	6	4	40.000	950	83
Büro-/Wohnhaus mittel	1000	1,5	8	13	200.000	4.350	40
Spital, Büro groß	2000	2	12	19	700.000	17.700	25

Tabelle 1: Energieverbrauch typischer Seilauflzüge mit frequenzgeregelten, getriebelosen Antrieben mit PM-Motoren¹⁵ (Quelle: [5])

Aus diesen Hochrechnungen lassen sich mögliche Verbesserungsstrategien ableiten: Möglichkeiten zur weiteren Reduzierung des Energiebedarfs bei niederfrequentierten Anlagen sind zunächst bei den Stillstands-Stromverbrauchern zu suchen, wo hingegen bei höher frequentierten Anlagen das meiste Verbesserungspotential in der Antriebstechnologie zu finden ist. Dennoch wird in [5] darauf hingewiesen, dass besonders ineffiziente Kabinenbeleuchtungen, z.B. mit Halogen-Glühlampen, auch bei höher frequentierten Anlagen „nicht unwesentlich“ zum Gesamt-Elektrizitätsverbrauch beitragen können.

Zur Hochrechnung des erwarteten Energiebedarfs typischer Seilauflzüge könnten die in Tabelle 1 aufgeführten Kennwerte „Wh pro Fahrt“ herangezogen werden. Würde man bei der Kategorie „Büro/Wohnhaus mittel“ den Standby-Anteil hinzurechnen, ergäbe sich beispielsweise ca. 22 Wh (anstelle 13 Wh) pro Fahrt. Diese Kennwerte stellen ein sehr grobes Hilfsmittel für Abschätzungen dar. Sie können jedoch unter der Annahme, dass die Länge der Fahrten über den Nutzungszeitraum gleichmäßig verteilt ist, als erster Anhaltspunkt herangezogen werden.

3.1.2 Optimierung der Energieeffizienz bei Aufzügen (E4)

Das E4-Projekt wurde durch das Programm „Intelligent Energy Europe“ der Europäischen Kommission gefördert.¹⁶ Auftragnehmer war die ISR-University of Coimbra (Portugal), die zusammen mit den Partnern, dem Europäischen Aufzugsverband (ELA), der italienischen Energie- und Umweltagentur (ENEA), dem Fraunhofer ISI (Deutschland) und der polnischen Energiesparagentur (KAPE) im März 2010 den Endbericht veröffentlichte [17]. Der Energieverbrauch von Aufzügen und Fahrtreppen in Deutschland wurde in einem „Country Report“ [2], basierend auf der Beschreibung der zugrundeliegenden Energieverbrauchsmessungen [18], separat behandelt.

Zwei Methoden werden zur Abschätzung des Energieverbrauchs aller Aufzüge und Fahrtreppen herangezogen. Methode 1 basiert auf der angegebenen Nennleistung der Antriebsmotoren der betrachteten Anlagen und den Abschätzungen zum Stromverbrauch im Stillstand aus dem in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Projekt [5]. Der Methode 2 liegen Messungen an realen Anlagen zugrunde. Die sich daraus ergebenden Hochrechnungen für Deutschland sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Methode		Energieverbrauch Fahrt	Energieverbrauch Stillstand	Energieverbrauch Gesamt
1	Aufzüge	1.104	1.202	2.206
	Fahrtreppen	304	11	315
	Gesamt	1.408	1.213	2.521
2	Aufzüge	2.829	1.135	3.964
	Fahrtreppen	304	11	315
	Gesamt	3.133	1.146	4.279

Tabelle 2: geschätzter jährlicher Energiebedarf in GWh von Aufzügen und Fahrtreppen in Deutschland (Quelle: [2], vom Autor ins Deutsche übersetzt)

¹⁵ Synchronmotoren mit Permanentmagnet

¹⁶ vgl. www.e4project.eu (zuletzt geprüft am 12.04.2015)

Es zeigt sich deutlich, dass der Energieverbrauch für das Fahren der Aufzüge bei Anwendung von Methode 1 gegenüber Methode 2 deutlich unterschätzt wird. Die Schätzung des Stromverbrauchs im Stillstand von Methode 1, die auf [5] basiert, korrespondiert jedoch relativ gut mit dem Ergebnis von Methode 2.

Bezieht man sich auf die Ergebnisse von Methode 2, so verbrauchen die ca. 650.000 Aufzüge in Deutschland jährlich knapp 4 TWh elektrische Energie. Dies entspricht im Jahr 2010 0,8 % des deutschen Gesamtstromverbrauchs [2]. Dabei verteilen sich die installierten Aufzüge gemäß Abbildung 3 auf die Gebäudetypen des Gebäudebestands in Deutschland. Es dominieren Wohn- und Bürogebäude.

Nach Methode 2 teilt sich der Energieverbrauch für das Fahren und für den Stillstand gemäß Abbildung 4 auf. Es wird in Abbildung 4 zudem wieder deutlich, dass der Energieverbrauch für den Stillstand bei Wohngebäuden überwiegt. Bei anderen hochfrequentierten Nutzungsarten dominiert der Energieverbrauch für das Fahren. Bei Aufzügen in öffentlichen Verkehrsbereichen (z.B. Bahnhöfe oder Flughäfen) wird hier ein weitgehend ausgeglichenes Verhältnis angegeben.

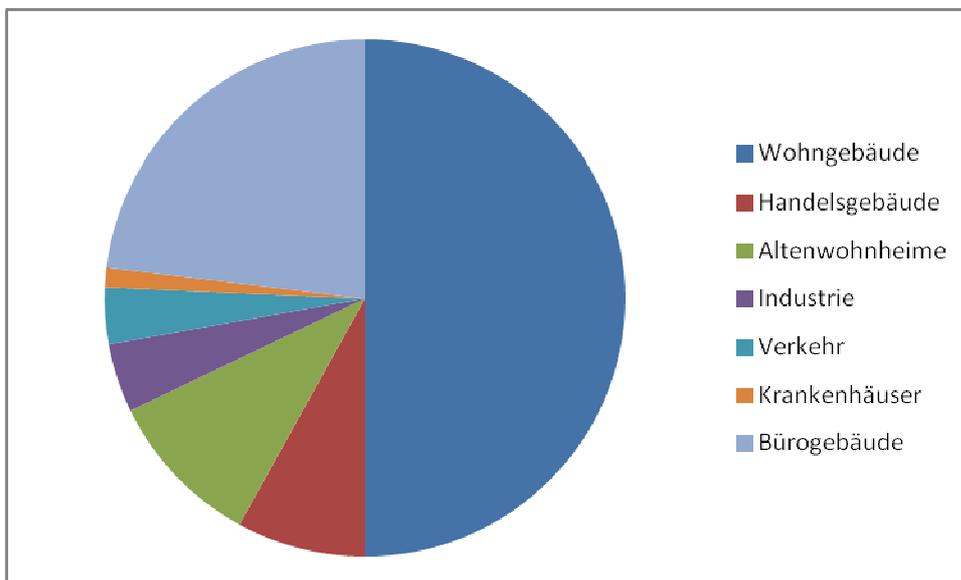


Abbildung 3: Verteilung der ca. 650.000 Aufzüge im Gebäudebestand in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung und [2])

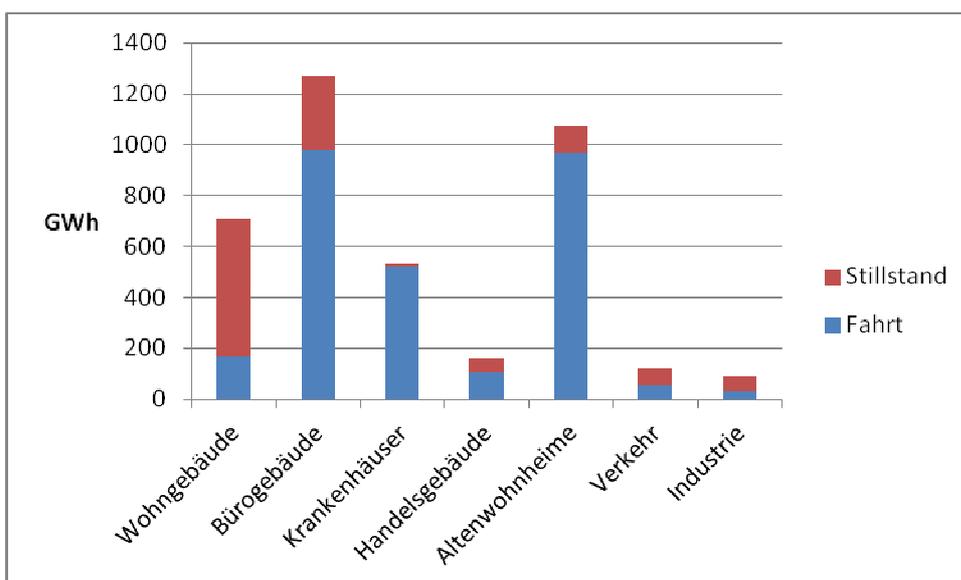


Abbildung 4: Energieverbräuche in GWh nach Gebäudetyp mit Methode 2 (Quelle: eigene Darstellung und [2])

3.1.3 Analyse des Energieverbrauchs (Beier)

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt „Analyse des Energieverbrauchs und exemplarische Lösungen für relevante Verbrauchssektoren in Krankenhäusern“ untersuchte den Energieverbrauch von 20 Krankenhäusern mit jeweils 300 bis 600 Betten [13]. Der Abschlussbericht, der neben den typischen Untersuchungsgegenständen auch einen Abschnitt zu Aufzügen enthält, wurde im Juni 2009 veröffentlicht. Hier wurde festgestellt, dass der Energieverbrauch von Aufzügen etwa 5 % des Gesamtenergieverbrauches eines Krankenhauses beträgt.

Messungen ergaben zudem, dass ein Aufzug in einem Krankenhaus durchschnittlich 17.794 kWh elektrische Energie pro Jahr für Stillstand und Fahrt benötigt. Dieser Wert bezieht sich auf einen kumulierten Fahrzeitanteil von 24 % an der Gesamtbetriebszeit (d.h. ca. 6 Stunden Fahrzeit und 18 Stunden Stillstandszeit bei einer angenommenen Betriebsbereitschaft von 24 Stunden), wobei verschiedene Baujahre und verschiedene Technologien in diesen Wert einfließen. Man könne diesen Verbrauchswert „als groben Anhaltswert“ für die Beurteilung des Energieverbrauchs eines Aufzugs verwenden, wenn die Fahrzeit identisch ist. Der ermittelte Wert korrespondiert mit der entsprechenden Angabe im beschriebenen Forschungsprojekt in Abschnitt 3.1.1 (Tabelle 1, Zeile Spital).

3.1.4 Standby-Optimierung (Schweizerische Eidgenossenschaft)

Die drei zuvor erläuterten Forschungsprojekte kommen zu dem Ergebnis, dass der Energiebedarf im Stillstand bei niederfrequentierten Aufzügen den Gesamtenergiebedarf dominiert. Der Forschungsbericht zur „Standby-Optimierung bestehender Aufzugsanlagen“ entstand im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Schweiz) und wurde im Juli 2010 veröffentlicht [19]. Untersucht wurden dabei Möglichkeiten, bestehende Anlagen mit einer herstellerunabhängigen Lösung zur nahezu kompletten Abschaltung der Steuerung im Stillstand nachträglich auszurüsten. Getestet wurde die Nachrüstlösung an einem Aufzug in einem Hochhaus mit überwiegender Büronutzung (18 Haltestellen, Nennlast 1.600 kg, Nenngeschwindigkeit 2,5 m/s, getriebeloser Antrieb mit Frequenzumrichter) und an einem Aufzug in einem Wohnhaus mit sechs Haltestellen und einer Nennlast von 450 kg bei einer Nenngeschwindigkeit von 1,0 m/s (Antrieb auch getriebelos mit Frequenzumrichter).

Der jährliche elektrische Energiebedarf des Aufzugs im Bürogebäude beträgt nach VDI 4707 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 3.2.1) 8.183 kWh. Die Leistungsaufnahme dieses Aufzugs im Stillstand beträgt 39 W. Bei einer angenommenen Stillstandszeit von 21 Stunden (Nutzungskategorie 4 nach DIN 4707 Blatt 1) sowie einer Komplettabschaltung nachts wäre mit der Standby-Optimierung eine Reduzierung des Stillstandsbedarf um ca. 30 % realisierbar. Die erzielte Einsparung ist, verglichen mit dem Gesamtverbrauch, mit ca. 1,5 % relativ gering.

Im Wohnhaus wurde eine Anlage analysiert, die nach VDI 4707 Blatt 1 einen jährlichen Stromverbrauch von 1.114 kWh aufweist. Im Stillstand wurde eine Leistungsaufnahme von 103 W gemessen, was einem durchschnittlichen Wert entspricht. Bei einer wohnhaustypischen, angenommenen Stillstandszeit von 23,5 Stunden (Nutzungskategorie 2 nach DIN 4707 Blatt 1) käme der Stillstandsbedarf auf einen Jahreswert in Höhe von 883 kWh. Das entspricht ca. 80 % des Gesamtverbrauchs im Ausgangszustand, der durch eine Standby-Optimierung deutlich reduziert werden könnte.

Aus den Ergebnissen dieser Studie lässt sich zusammenfassend festhalten:

- Eine nachträgliche Standby-Optimierung ist sinnvoll, wenn die bestehende Anlage einen anteilig überdurchschnittlich hohen Stillstandsbedarf aufweist und in Abhängigkeit der Gebäudenutzung eine hohe durchschnittliche Stillstandszeit festzustellen ist.
- Das zeitweise Abschalten von Aufzugsanlagen oder Teilen davon (z.B. Beleuchtung) ist mit den Anforderungen an die Verfügbarkeit (Nutzerzufriedenheit) und die Sicherheit in Einklang zu bringen.

- Vor dem nachträglichen Einbau einer Standby-Optimierung in ältere Aufzugsanlagen ist zu prüfen, ob bei der Steuerung durch die regelmäßig wiederkehrenden Abschaltvorgänge eine Verringerung der Lebensdauer zu erwarten ist. (Nach Einschätzung des Autors sind elektronische Steuerungen der 1980er und 1990er Jahre nach jahrelangem Dauerbetrieb hierzu nur bedingt geeignet. Der dadurch evtl. zu erwartende (vorzeitige) Ausfall von Bauteilen könnte den Nutzen der Energieeinsparmaßnahme möglicherweise durch notwendige Reparaturkosten und Reduzierung der Verfügbarkeit relativieren.)

3.2 Richtlinien und Normen

Zur vergleichbaren und nachvollziehbaren Abschätzung und Berechnung des Energiebedarfs sowohl von einzelnen Komponenten als auch kompletten Aufzügen sind belastbare Vorgehensweisen und Rechenmethoden heranzuziehen. In den folgenden Abschnitten werden deutsche und europäische Richtlinienarbeiten bzw. Normungstätigkeiten erläutert, die teilweise später für die Auswertung der eigenen Messungen angewendet werden. Dazu ist anzumerken, dass sich die Richtlinien und Normen auf die Anlagentechnik beziehen. Der Förderbedarf (beispielsweise Förderhöhe und Anzahl der Fahrten pro Tag) wird berücksichtigt, jedoch nicht hergeleitet, da er durch das Gebäude und dessen Nutzung verursacht wird. Methodische Grundlagen hierzu werden in Abschnitt 5 diskutiert.

3.2.1 VDI 4707 Blatt 1

Die VDI-Richtlinie 4707 Blatt 1 wurde im März 2009 veröffentlicht [6]. Sie dient der transparenten Berechnung, Beurteilung und Kennzeichnung des Energiebedarfs von Aufzügen. Entscheidend bei dieser Richtlinie zur Vergabe eines Energieeffizienzlabels ist die Berücksichtigung der Einsatzbedingungen in Abhängigkeit des Gebäudetyps (Nutzungskategorie). Es wird dazu zwischen Energiebedarfsklassen (nur anlagenabhängig) und Energieeffizienzklassen (auch gebäudeabhängig) unterschieden.

Nach VDI 4707 Blatt 1 setzt sich der Gesamtenergiebedarf eines Aufzugs zusammen aus:

- dem Stillstandsbedarf (auch Standby-Bedarf genannt) und
- dem Fahrtbedarf.

Unter Stillstandsbedarf wird die Leistungsaufnahme bei abgeschaltetem Triebwerk, d.h. bei stehendem Aufzug verstanden. Verbraucher, wie z.B. die Kabinenbeleuchtung, Stockwerkanzeigen und Notrufsysteme, beeinflussen den Stillstandsbedarf. Triebwerksraum- und Schachtbeleuchtung werden nicht berücksichtigt, da sie nicht zum Betrieb des Aufzugs erforderlich sind und i.d.R. nur vorübergehend für Instandhaltungsarbeiten eingeschaltet werden. Der Stillstandsbedarf ergibt sich aus der Leistungsaufnahme (in Watt) und der täglichen Stillstandszeit des Aufzugs. Die Leistungsaufnahme im Stillstand kann vom Hersteller angegeben werden oder an einer bestehenden Anlage gemessen werden (fünf Minuten nach Beendigung der letzten Fahrt gemäß derzeitiger Definition nach VDI 4707 Blatt 1). Die tägliche durchschnittliche Stillstandszeit kann aus der Nutzungskategorie des Aufzugs abgeschätzt (Tabelle 3) oder gebäudespezifisch ermittelt werden.

Nutzungskategorie	1	2	3	4	5
Nutzungsintensität/häufigkeit	sehr gering/ sehr selten	gering/ selten	mittel/ gelegentlich	stark/ häufig	sehr stark/ sehr häufig
Durchschnittliche Fahrzeit [Stunden/Tag]	0,2 (≤ 0,3)	0,5 (> 0,3 -1)	1,5 (> 1,2)	3 (> 2 – 4,5)	6 (> 4,5)
Durchschnittliche Stillstandszeit [Stunden/Tag]	23,8	23,5	22,5	21	18
Typische Gebäude- und Verwendungsarten	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 6 Wohnungen kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit wenig Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 20 Wohnungen kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit 2 bis 5 Geschossen kleine Hotels Lastenaufzug mit wenig Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 50 Wohnungen kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit bis zu 10 Geschossen mittlere Hotels Lastenaufzug mit mittlerem Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit mehr als 50 Wohnungen kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit über 10 Geschossen große Hotels kleines bis mittleres Krankenhaus Lastenaufzug in Produktionsprozessen bei einer Schicht 	<ul style="list-style-type: none"> Büro- und Verwaltungsgebäude über 100 m Höhe großes Krankenhaus Lastenaufzug in Produktionsprozessen bei mehreren Schichten

Tabelle 3: Nutzungskategorien für Aufzüge nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [6])

Der Fahrtbedarf des Aufzugs wird durch vier sogenannte Referenzfahrten ermittelt, deren Fahrtzyklus wie folgt definiert ist:

1. Beginn mit offener Tür,
2. Tür schließen,
3. Fahrt auf oder ab über die volle Förderhöhe,
4. Tür öffnen und sofort wieder schließen,
5. Fahrt auf oder ab über die volle Förderhöhe,
6. Tür öffnen,
7. Ende mit offener Tür.

Die vier Referenzfahrten werden jeweils mit unterschiedlichen Beladungen durchgeführt, und anschließend wird ein gewichteter Durchschnittsverbrauch gebildet, um eine möglichst realitätsnahe Verbrauchsvorhersage zu erhalten (Tabelle 4).

Referenzfahrt Nr.	Beladung in % der Nennlast	Gewichtung (Anteil Fahrten in % der Gesamtfahrten)
1	0	50
2	25	30
3	50	10
4	75	10

Tabelle 4: Lastkollektiv (in Anlehnung an [6])

Vereinfachend kann auch nur eine Referenzfahrt durchgeführt werden. Der gemessene Energieverbrauch ist dann mit einem sogenannten Lastfaktor k zu multiplizieren. Bei üblichen Treibscheibenaufzügen mit Gegengewicht und Halblastausgleich¹⁷ beträgt dieser Faktor 0,7.

Der nun ermittelte Referenzbedarf für die Fahrt in Wh wird in Relation gesetzt zur Nennlast des Aufzugs in kg und der Wegstrecke in m (Förderhöhe). Dies wird als spezifischer Energiebedarf für das Fahren bezeichnet. Zur Berechnung des jährlichen Gesamtenergiebedarfs werden der Stillstandsbedarf über die Stillstandszeiten und die Anzahl der Tage pro Jahr sowie der Fahrtbedarf über die Fahrzeiten und die Anzahl der Tage pro Jahr aufsummiert. Stillstands- und Fahrtbedarf werden zudem gemäß der Tabellen 5 und 6 Energiebedarfsklassen A bis G zugeordnet.

Leistung [W]	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 800	≤ 1600	> 1600
Klasse	A	B	C	D	E	F	G

Tabelle 5: Leistungsaufnahme im Stillstand in Klassen eingeteilt nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [6])

Spez. Energieverbrauch [mWh/(kg m)]	≤ 0,56	≤ 0,84	≤ 1,26	≤ 1,89	≤ 2,80	≤ 4,20	4,20
Klasse	A	B	C	D	E	F	G

Tabelle 6: Energiebedarfsklassen für das Fahren nach VDI 4707 Blatt 1 (Quelle: [6])

Zur Bestimmung der Energieeffizienzklasse des Aufzugs werden der Stillstandsbedarf und der spezifische Fahrtbedarf (bezogen auf die Nutzlast und die zurückgelegte Wegstrecke) zueinander in Relation gesetzt (Gleichung 1).

$$E_{\text{Aufzug, spez, max}} = E_{\text{Fahren, spez, max}} + \frac{P_{\text{Stillstand, max}} \times t_{\text{Stillstand}} \times 1000}{Q \times v_{\text{nenn}} \times t_{\text{Fahren}}} \quad (1)$$

Für einen Aufzug mit einer Tragfähigkeit (Nennlast) von $Q = 630$ kg und einer Fahrgeschwindigkeit von $v = 1$ m/s ergeben sich damit beispielhaft Grenzwerte für die Einordnung in eine Energieeffizienzklasse von A bis G in Abhängigkeit der Nutzungskategorie (Tabelle 7). Es ist zu erkennen, dass sich innerhalb jeder Effizienzklasse die Grenzwerte bei zunehmender Nutzungshäufigkeit der Anlage verschärfen. So kann beispielsweise ein Aufzug, der in Nutzungskategorie 1 (kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit wenig Betrieb) die Energieeffizienzklasse A erreicht in Nutzungskategorie 5 (Büro- und Verwaltungsgebäude über 100m Höhe) mit den gleichen technischen Eigenschaften nur in Effizienzklasse E eingestuft werden.

Energieeffizienzklasse	Spezifischer Energiebedarf [mWh/(kg*m)]				
	Nutzungskategorie				
	1	2	3	4	5
A	≤ 3,18	≤ 1,60	≤ 0,89	≤ 0,71	≤ 0,63
B	≤ 6,09	≤ 2,91	≤ 1,50	≤ 1,15	≤ 0,97
C	≤ 11,75	≤ 5,40	≤ 2,58	≤ 1,88	≤ 1,52
D	≤ 22,88	≤ 10,18	≤ 4,54	≤ 3,12	≤ 2,42
E	≤ 44,78	≤ 19,38	≤ 8,09	≤ 5,27	≤ 3,86
F	≤ 88,15	≤ 37,36	≤ 14,78	≤ 9,14	≤ 6,32
G	> 88,15	> 37,36	> 14,78	> 9,14	> 6,32

Tabelle 7: Energieeffizienzklassen eines Aufzugs mit $Q = 630$ kg und $v = 1$ m/s (Quelle: [6])

Kritisch wird in der VDI 4707 Blatt 1 angemerkt, dass bei der Überprüfung von angegebenen Herstellerkennwerten oder Kennwerten aus früheren Messungen bestehender Anlagen Abweichungen in Größenordnungen von +/- 20 % auftreten können. Dies kann durch Alterung, verschiedene Wartungsstrategien, Änderungen technischer Details oder Einstellungen und nicht zuletzt durch Streuungen bei der Produktqualität und der

¹⁷ Halblastausgleich bedeutet, dass das Gegengewicht um etwa die Hälfte der zulässigen Nennlast schwerer ist als das Fahrkorbgewicht ohne Beladung.

Messtechnik bedingt sein. Diese möglichen Abweichungen werden auch in der Messkampagne dieses Forschungsprojekts analysiert (vgl. Abschnitt 6).

3.2.2 VDI 4707 Blatt 2

Im Juni 2012 wurde Blatt 2 der Richtlinienreihe VDI 4707 als Entwurf herausgegeben und im Oktober 2013 freigegeben [7]. Der Energiebedarf eines Aufzugs wird hier auf Basis des Energiebedarfs einzelner Komponenten ermittelt. Hierzu werden Anforderungen an die von den Komponentenherstellern zu liefernden Kenndaten sowie deren Ermittlung beschrieben. Aus diesen Angaben lässt sich, im Unterschied zu Blatt 1, der Energiebedarf des Aufzugs ohne Referenzfahrt ausschließlich anhand geeigneter Produktdokumentationen berechnen.

Blatt 2 unterscheidet wie Blatt 1 zwischen Stillstands- und Fahrtbedarf. Zur Ermittlung des Stillstandsbedarfs werden zusätzlich sogenannte Betriebsmodi definiert, die sich durch die Aufweckzeiten¹⁸ unterscheiden, nachdem der Aufzug mindestens fünf Minuten stillstand. Es wird zwischen folgenden Modi unterschieden:

- P0: Komponente in Betrieb,
- S0: Komponente aus, jedoch sofort wieder einsatzbereit,
- S1: Komponente aus (Schlafmodus) und nach höchstens drei Sekunden wieder einsatzbereit,
- S2: Komponente aus (Soft-Off-Modus) und nach höchstens 60 Sekunden wieder einsatzbereit.

Für die in Blatt 1 definierten Nutzungskategorien werden nach Blatt 2 Zeitanteile der verschiedenen Betriebsmodi innerhalb der gesamten Stillstandszeit festgelegt (Tabelle 8). Die Hersteller sind nun gefordert, für die Modi S0, S1 und S2 die jeweilige Leistungsaufnahme separat auszuweisen, um den Stillstandsbedarf präzise berechnen zu können.

Nutzungskategorie nach Blatt 1	1	2	3	4	5
Betriebsmodus	Anteil [%]				
S0	1	2	5	7	10
S1	24	33	60	73	85
S2	75	65	35	20	5

Tabelle 8: Gewichtung der Betriebsmodi zur Ermittlung des Stillstandsbedarfs nach VDI 4707 Blatt 2 (Quelle: [7])

Wird von einer Komponente ein Betriebsmodus nicht unterstützt, so ist der Anteil des Betriebsmodus mit der kürzeren Aufweckzeit zum dem des nichtunterstützten zu addieren. Wird gar kein S-Modus unterstützt, so wird angenommen, dass die Komponente dauernd in Betrieb ist und die differenzierten Angaben zu den jeweiligen Leistungsaufnahmen der verschiedenen S-Modi entfallen.

Bei der Berechnung des Fahrtbedarfs für Treibscheibenaufzüge wird zwischen motorischem und generatorischem Betrieb unterschieden, um Energierückspeisung ins Netz erfassen zu können. Hierzu werden im Wesentlichen erfasst:

- der Wirkungsgrad der gesamten Anlage und
- die Entwicklungsstufe der eingesetzten Technologie.

Der Wirkungsgrad der gesamten Anlagen setzt sich zusammen aus dem Wirkungsgrad des Schachtes (Reibungsverluste an den Führungsschienen), dem Wirkungsgrad des Motors (thermische Verluste), dem Wirkungsgrad des Getriebes, sofern nicht getriebelos (mechanische Verluste), und dem Wirkungsgrad des Umrichters, sofern vorhanden (thermische Verluste).

¹⁸ Die Aufweckzeit wird nach VDI 4707 Blatt 2 definiert als die Zeit, die Komponenten benötigen, um aus dem Energiesparmodus wieder in den Betrieb zurückzukehren. Da sich die Aufweckzeiten mehrerer Komponenten u.U. kumulieren, kann die Reaktionszeit des Aufzugs vom Geben eines Fahrbefehls bis zum Beginn der Fahrt größer sein.

Die eingesetzte Antriebstechnologie wird mit einem Technologiefaktor bewertet. Aus Tabelle 9 geht hervor, dass (bis Ende der 70er Jahre übliche) polumschaltbare Antriebe gegenüber der heute zum Einsatz kommenden Umrichter-Technologie deutliche Effizienz Nachteile aufweist. Antriebe mit Spannungsstellern (Thyristor-Regler bzw. Phasenanschnittsregler) waren ab Anfang der 1980er bis Mitte der 1990 bei Neuanlagen und Modernisierungen üblich und stellen bereits ein fast vierzigprozentiges Einsparpotential gegenüber polumschaltbaren Antrieben dar.

Technologie	Technologiefaktor
Umrichter	0,34
Spannungssteller	0,67
Polumschaltung	1,8

Tabelle 9: Technologiefaktoren nach VDI 4707 Blatt 2 (Quelle: [7])

Der genaue Rechengang ist Blatt 2 Anhang B zu entnehmen (Alternative zur Referenzfahrt in Blatt 1).

3.2.3 E DIN EN ISO 25745-1

Im September 2010 wurde der Entwurf der DIN EN ISO 25745-1 herausgegeben [20]. Er stellt im Anhang ergänzend ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des Energieverbrauchs von Aufzügen bereit. Es wird dabei betont, dass dieses Verfahren auf Durchschnittsfaktoren und Schätzwerten beruht und zum Einsatz kommen kann, wenn „ein vollständigeres oder geeigneteres Verfahren nicht zur Verfügung steht.“ Es kann angenommen werden, dass dies auch gilt, wenn keine ausreichenden Daten zur Anwendung der VDI 4707 Blatt 1 oder 2 vorliegen.

Unter folgenden Voraussetzungen kann das vereinfachte Verfahren angewandt werden:

- gleichmäßige Belegung des Gebäudes über alle Stockwerke,
- Anzahl der Halte in Aufwärtsrichtung entspricht jener in Abwärtsrichtung,
- keine Energierückspeisung vorgesehen,
- keine Eingriffe einer „Verkehrsfluss-Steuerung“,
- keine signifikante Anzahl an Halten unterhalb der Hauptzugangsebene (z.B Erdgeschoß),
- keine zusätzliche Energie für das Durchfahren einer „Express-Zone“ berücksichtigt.

Es gilt dann folgende Gleichung für die während eines Jahres von einem Aufzug verbrauchte Energie E_L in kWh¹⁹:

$$E_L = \frac{S \times P \times t_h}{4 + E_{Standby}} \quad (2)$$

Dabei sind:

- S die Anzahl der Fahrten pro Jahr,
- P die Nennleistung des Antriebsmotors in kW,
- t_h die Fahrzeit²⁰ zwischen der Hauptzugangsebene und dem höchsten angefahrenen Stockwerk,
- $E_{Standby}$ der jährliche Stromverbrauch im Stillstandsbetrieb.

Vorgeschlagen wird im Entwurf der Norm, dass der Wert für S vom Planer bzw. dem Architekten bereitgestellt werden oder bei einer vergleichbaren Anlage einem Fahrtenzähler entnommen werden kann. P wird vom Hersteller des Aufzugs bereitgestellt bzw. kann vom Typenschild des Antriebsmotors abgelesen werden. t_h kann ebenso vom Planer bzw. dem Architekten bereitgestellt werden oder bei einer vergleichbaren Anlage gemessen werden.

¹⁹ Bei Gleichung 1 ist zu beachten, dass die Energie zunächst in Ws umzurechnen ist, wenn die Fahrzeit typischerweise in Sekunden angegeben wird.

²⁰ von dem Augenblick an, in dem die Türen geschlossen wurden, bis zu dem Augenblick, in dem sie sich wieder öffnen

Die Abschätzung des Energieverbrauchs nach Gleichung 2 wird auch im CIBSE Guide D: 2010 (Transportation systems in buildings) beschrieben [11]. Die dortigen Ausführungen verdeutlichen, dass die o.g. Annahmen auch darauf basieren, dass die Kabine regelmäßig mit ca. 40 bis 50 % der Nennlast beladen ist. Ein abwärts fahrender Aufzug mit Halblastausgleich benötigt während der Fahrt bei konstanter Geschwindigkeit (Nenngeschwindigkeit) bei einer Beladung von nur ca. 25 % etwa 50 bis 60 % mehr Energie als bei mindestens halber Ausnutzung der Nennlast. Im Gegenzug blieben bei einer Ausnutzung von ca. 75 % abwärts und geringer Beladung aufwärts jegliche Potentiale einer Energierückspeisung unberücksichtigt. Die Größenordnung der möglichen Energierückspeisung läge in diesem Fall in der Höhe des Energieverbrauchs bei nur hälftiger Ausnutzung der Nennlast.

Die DIN EN ISO 25745-1 wurde im Februar 2013 freigegeben. Der oben beschriebene Ansatz (Gleichung 2) entfällt dort. Die Nutzbarkeit bleibt aus Sicht des Autors unter den beschriebenen Randbedingungen jedoch gegeben (vgl. [11]).

3.2.4 E DIN EN ISO 25745-2

Im Juni 2013 erschien der Entwurf der DIN EN ISO 25745-2. Es wird ein zur VDI 4707 Blatt 1 vergleichbarer Ansatz verfolgt, den Energiebedarf des Aufzugs spezifisch über die Energiemenge pro kg Traglast und zurückgelegtem Fahrweg zu ermitteln. Auf Details zur Berechnung wird in diesem Abschnitt nicht erneut eingegangen.

Ein wichtiger Unterschied zur VDI 4707 Blatt 1 besteht in der Beschreibung der Nutzungskategorien. Während bei VDI 4707 Blatt 1 die wesentliche Definition über die durchschnittliche Fahrt- und Stillstandszeit vorgenommen wird, enthält Anhang A der DIN EN ISO 25745-2 eine typische Anzahl von Fahrten für jede Nutzungskategorie. Zudem wird eine weitere Nutzungskategorie 6 (äußerst hoch) hinzugefügt (Tabelle 10). Die Nutzungskategorien 1 bis 5 sind mit denen der VDI 4707 Blatt 1 vergleichbar. Es ist somit auf diesem Wege eine Übersetzung der Fahrt- und Stillstandszeiten in die Anzahl der Fahrten pro Tag möglich. Betrachtet werden in diesem Forschungsvorhaben nach Auswertung der Messdaten die Nutzungskategorien 2 bis 4.

Nutzungskategorie	1	2	3	4	5	6
Nutzungsintensität/häufigkeit	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch
Anzahl der Fahrten je Tag (n_d) Typischer Bereich	50 (≤ 75)	125 (75 – 200)	300 (200 – 500)	750 (500 – 1000)	1500 (> 1000)	2500 (> 2000)
Typische Gebäude- und Verwendungsarten	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 6 Wohneinheiten Pflegeeinrichtung kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit wenig Betrieb U-Bahn-Stationen 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 20 Wohneinheiten kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit 2 bis 5 Etagen kleine Hotels Parkplätze von Bürogebäuden allgemeine Parkplätze Bahnhöfe Bibliothek Unterhaltungszentren Stadien 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit bis zu 50 Wohneinheiten kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit bis zu 10 Etagen mittelgroßes Hotels Flughäfen Universität kleines Krankenhaus Einkaufszentrum 	<ul style="list-style-type: none"> Wohnhaus mit mehr als 50 Wohneinheiten großes Büro- oder Verwaltungsgebäude mit mehr als 10 Etagen großes Hotel 	<ul style="list-style-type: none"> sehr großes Büro- oder Verwaltungsgebäude mit einer Höhe von über 100 m 	<ul style="list-style-type: none"> sehr großes Büro- oder Verwaltungsgebäude mit einer Höhe von über 100 m
Typische Nenngeschwindigkeit [m/s]	0,63	1,00	1,60	2,50	5,00	5,00

Tabelle 10: Nutzungskategorien für Aufzüge nach E DIN EN ISO 25745-2:2013-06 (Quelle: [8])

Als weiterer Unterschied zur VDI 4707 Blatt 1 wird der Energiebedarf für Bereitschaft und Stillstand in drei Phasen unterteilt (prozentualer Anteil an der gesamten Stillstandszeit (vgl. Tabelle 11)).

Nutzungskategorie	1	2	3	4	5	6
Nutzungsintensität/häufigkeit	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch
Bereitschaftsmodus	13 %	23 %	36 %	45 %	42 %	
Stillstand nach 5 Minuten	55 %	45 %	31 %	19 %	17 %	
Stillstand nach 30 Minuten	32 %	32 %	33 %	33 %	41 %	

Tabelle 11: Zeitverhältnisse der Stillstandszeiten Nach D DIN EN ISO 25745-2:2013-06 (Quelle: [8])

3.2.5 SIA 380/4

Zur Berechnung des Energiebedarfs von Aufzügen wird in der Richtlinie SIA 380/4 des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) [9] eine Methode vorgeschlagen, die weniger Eingangsdaten als die VDI 4707 benötigt, jedoch nicht so stark vereinfacht wie der oben beschriebene Ansatz im ursprünglichen Entwurf der DIN EN ISO 25745-1.

Nach Gleichung 3 ergibt sich der jährliche Energiebedarf E_A eines Aufzugs aus dem durchschnittlichen Energiebedarf pro Fahrt E_F , der Anzahl F der Fahrten pro Jahr und dem Strombedarf für Hilfsbetriebe²¹ E_{AH} . Als wesentlicher Unterschied zu den oben beschriebenen Normen und Richtlinien ist hierin der Energiebedarf für den Stillstand nicht berücksichtigt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Leistungsaufnahme für Hilfsbetriebe im Stillstand 150 bis 200 W und während der Fahrt 400 bis 500 Watt betragen kann.

$$E_A = (F \times E_F) + E_{AH} \quad (3)$$

Die Anzahl der Fahrten ergibt sich nach Gleichung 4 aus der Anzahl der Benutzer B im Gebäude und der Anzahl der Fahrten pro Benutzer pro Jahr F_B . Dabei wird angenommen, dass die Kabine durchschnittlich mit 20 % der maximal zulässigen Personenzahl P_{NL} belegt ist.

$$F = \frac{B \times F_B}{0,2 \times P_{NL}} \quad (4)$$

Zur Berechnung des Energiebedarfs pro Fahrt E_F ist zunächst die maximale Masse M_K der Kabine (bei voller Beladung, d.h. bei maximal zulässiger Personenanzahl) und die Masse des Gegengewichts M_G zu bestimmen. Diese ergeben sich aus den Gleichungen 5 und 6, wobei die durchschnittliche Masse pro Person mit 75 kg angenommen wird und das Gegengewicht als Halblastausgleich ausgelegt ist. Der Faktor x wird vom angenommenen Leergewicht der Kabine bestimmt (bei normalen Personenaufzügen zwischen 1,5 und 2, bei Hochgeschwindigkeitsaufzügen zwischen 2 und 3).

$$M_K = P_{NL} \times 75 \times x \quad (5)$$

$$M_G = M_K + 0,5 \times (P_{NL} \times 75) \quad (6)$$

Schließlich sind noch Annahmen zu den Wirkungsgraden des Antriebs, der Antriebsregelung, einer evtl. vorhandenen Energierückspeisung (Rekuperation) und der Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit der maximalen Förderhöhe h_{max} zu treffen (Tabellen 12 bis 15).

Wirkungsgrad des Antriebs	η_A	Schneckengetriebe + Asynchronmotor	50 %
		Planetengertriebe + Asynchronmotor	60 %
		getriebelos + Synchronmotor + Frequenzumrichter	65 %
		Hydraulikaufzug	50 %

Tabelle 12: Wirkungsgrad des Antriebs (Quelle:[9])

Wirkungsgrad der Regelung	η_{Re}	Feinabsteller	70 %
		Spannungsregelung	80 %
		Frequenzumrichter	100 %
		Hydraulikaufzug	100 %

Tabelle 13: Wirkungsgrad der Regelung (Quelle:[9])

Wirkungsgrad der Rekuperation (Re)	η_{Re}	mit Rekuperation	50 %
		ohne Rekuperation	0 %

Tabelle 14: Wirkungsgrad der Rekuperation (Quelle:[9])

Fahrgeschwindigkeit (Nenngeschwindigkeit)	v_A	hoher Komfort (möglichst kurze Fahrzeit)	$h_{max} / 20$ s
		mittlerer Komfort	$h_{max} / 25$ s
		bescheidener Komfort	$h_{max} / 30$ s

Tabelle 15: Geschwindigkeit (Quelle:[9])

²¹ Unter „Hilfsbetriebe“ werden nach SIA 380/4 Steuerung, Magnetbremse und Ventilatoren zur Kühlung dieser Einheiten verstanden.

Gleichung 7 ergibt nun den Energiebedarf pro Fahrt E_F für den Traktionsaufzug (Hydraulikaufzug wird im vorliegenden Forschungsbericht nicht näher betrachtet, siehe auch Abschnitt 4.2).

$$E_F = P_{NL} \times 75kg \left[(0,175 \times g_e \times h_{eff}) + \left((x - 0,4) \times \frac{v^2}{2} \right) \right] \times (1 - \mu_{Rk}) / (\mu_{Rk} \times \mu_A) \quad (7)$$

Die Richtlinie SIA 380/4 wurde 2006 freigegeben. Der darin wiedergegebene Berechnungsansatz wurde gegenüber 1996 vereinfacht. Hinzu gekommen ist zudem eine für alle Berechnungsverfahren hilfreiche Aufstellung der Fahrten pro Benutzer und Fahrten pro m² Geschoßfläche in Abhängigkeit der Raumnutzung bezogen auf ein Jahr (Tabelle 16).

Raumnutzung	Benutzer	Fahrten pro Benutzer	Fahrten pro m ² GF
Wohnraum, Schlafzimmer	Bewohner	1500	40
Hotelzimmer	Bett	1000	100
Einzel-, Gruppenbüro	Arbeitsplatz	1400	100
Großraumbüro	Arbeitsplatz	1400	140
Sitzungszimmer	Sitzplatz	500	170
Schulzimmer	Sitzplatz	800	270
Hörsaal	Sitzplatz	2000	2000
Spezialräume	Sitzplatz	1200	500
Restaurant	Sitzplatz	2500	2100
Selbstbedienungsrest.	Sitzplatz	1600	1300
Küche zu Restaurant	Arbeitsplatz	600	60
Küche z. Selbstbedrest.	Arbeitsplatz	500	50
Bettzimmer	Bett	2900	200
Stationszimmer	Arbeitsplatz	600	600
Produktion (grob)	Arbeitsplatz	1000	50
Produktion (fein)	Arbeitsplatz	1000	50
Lagerhalle	Arbeitsplatz	1000	100
Parkhaus	Parkplatz	800/3100	30/80

Tabelle 16: Anzahl der Fahrten pro Jahr je nach Benutzung (Quelle: [9])

4. Anlagentypologie

Im vorliegenden Forschungsbericht werden Personenaufzüge in Wohn- und Nichtwohngebäuden betrachtet. Relevant sind dabei Aufzugsanlagen, die nach den technischen Regeln für Aufzüge (TRA 200 - 400) bzw. nach den Normen DIN EN 81 - 1 und 2 errichtet wurden. Förderanlagen, die nicht unter die Aufzugsrichtlinie 95/16/EG fallen, werden nicht betrachtet (z.B. Baustellenaufzüge, Homelifts (Einfachaufzüge) oder Fahrtreppen). Der Betrieb der betrachteten Aufzugsanlagen wird durch die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) geregelt. Diese wird durch die Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) konkretisiert und ersetzt seit dem 01.01.2003 die bisherige Aufzugsverordnung. Im Sinne der Betriebssicherheitsverordnung gelten Aufzüge als überwachungsbedürftige Anlagen. Durch eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) sind diese Anlagen wiederkehrend auf ihren ordnungsgemäßen Zustand zu überprüfen (Haupt- und Zwischenprüfung im abwechselnd jährlichen Rhythmus, nicht zu verwechseln mit Wartung). Ist ein Aufzugsbetreiber gleichzeitig Arbeitgeber gilt der Aufzug zudem als Arbeitsmittel. Arbeitgeber sind über die einmalige sicherheitstechnische Bewertung hinausgehend zu einer Gefährdungsbeurteilung verpflichtet. Dabei werden Abweichungen vom Stand der Technik in beiden Fällen mittels einer Checkliste nach DIN EN 81 - 80 ermittelt. Maßnahmen zur freiwilligen Erhöhung der Sicherheit bestehender Aufzugsanlagen können als Chance zur gleichzeitigen energetischen Verbesserung aufgefasst werden [21]. Bei Neuanlagen trifft diese Abhängigkeit nicht zu, weil die Mindestanforderungen an die Sicherheit nach DIN EN 81 - 1 und 2 immer verbindlich sind. Einen Überblick zum aktuellen Stand der Normung zu Aufzügen findet man z.B. in einer Zusammenfassung des VDMA [22]. Ab Mitte 2015 gilt eine novellierte Betriebssicherheitsverordnung mit entsprechenden Auswirkungen auf die re-

levanten TRBS.²² Die Normen DIN EN 81 - 1 und 2 sollen durch die DIN EN 81 - 20 und 50 ergänzt bzw. ersetzt werden.²³

4.1 Treibscheibenaufzüge (Traktionsaufzüge)

Zur Entwicklung der Anlagen-Gebäude-Matrix (Anhang 2) werden die betrachteten Treibscheibenaufzüge im Gebäudebestand Deutschlands in vier Klassen unterteilt:

- Neuinstallationen (bestmöglich),
- Neuinstallationen (Standard),
- Bestand (modernisiert),
- Bestand (Originalzustand).

Neuinstallationen sind zum Zeitpunkt der Untersuchungen maximal zwei bis fünf Jahre alt. Die bestmöglichen Neuinstallationen zeichnen sich durch nach derzeitigem Stand der Technik optimale energetische Eigenschaften mit getriebelosem Antrieb, Frequenzumrichter (VVVF) mit Energierückspeisung und Steuerung mit Standby-Optimierung aus. Diese Technologie kann sowohl mit Maschinenraum als auch maschinenraumlos (MRL) betrieben werden. Ein möglicher geringer Einfluss dieses zuletzt genannten Unterschiedes auf die energetischen Eigenschaften wird hier vernachlässigt.

Neuinstallationen (Standard) entsprechen nach wie vor dem Stand der Technik, nutzen jedoch nicht alle verfügbaren Einsparpotentiale. Energierückspeisung, die bis vor wenigen Jahren ohnehin nur Hochleistungsaufzügen vorbehalten war, ist nicht vorhanden. Im Bereich der Steuerung werden nicht alle verfügbaren Standby- und Abschaltoptionen realisiert. Anstelle des getriebelosen Antriebs ist alternativ ein Antrieb mit Getriebe installiert, der einen geringeren Antriebswirkungsgrad aufweist. Die Variante mit Getriebe kann nur mit Maschinenraum realisiert werden.

Der modernisierte Bestand wird in vier Baualtersklassen aufgeteilt. Der nach 2005 modernisierte Bestand ist technisch mit den Neuinstallationen (Standard) vergleichbar. Anlagen, die ab 1995 modernisiert wurden, sind überwiegend mit Antrieben mit Getriebe ausgestattet. Alternativ zum Frequenzumformer (VVVF) kommt die Vorgängertechnologie, die Phasenanschnittsregelung (VVVF) zum Einsatz, die einen ungünstigeren Wirkungsgrad aufweist. Bei den Steuerungen kommen erstmals leistungsfähige Bus-Systeme (z.B. CAN-Bus) zum Einsatz. Die ab 1985 modernisierten Anlagen sind überwiegend mit Phasenanschnittsregelungen vorzufinden. Für die Schacht- und Kabinenverkabelungen werden teilweise proprietäre Bus-Systeme eingesetzt. Bei Modernisierungen ab 1980 können neben der Phasenanschnittsregelung noch polumschaltbare, d.h. unregelte mit Schwungmassen ausgestattete, Antriebe vorkommen (FV). Die frühen Generationen elektronischer Steuerungen verfügen über keine Bus-Systeme. Schacht- und Kabineninstallation sind i.d.R. komplett diskret verkabelt.

Originale Bestandsanlagen entsprechen ab 1980 den modernisierten Bestandsanlagen. Hinzu kommen hier Baujahre bis 1970, die über teilelektronische Relaissteuerungen verfügen, und Baujahre bis 1960, die über vollmechanische Relaissteuerungen verfügen. Zudem können bei den Baujahren bis 1960 auch eintourige Antriebe auftreten. Leistungsfähige Anlagen mit höheren Nenngeschwindigkeiten treten bis 1970 mit Gleichstromantrieben auf, die von rotierenden Umformern versorgt werden (Ward-Leonard). Ab 1980 wird der Gleichstromantrieb mit statischen Umformern realisiert (geringere Umwandlungs- und Bereitschaftsverluste). Die zuletzt genannte Technologie wird auch häufig ab 1980 zur Modernisierung alter Ward-Leonard-Systeme eingesetzt. Anlagen vor 1970 treten in der Untersuchung nie als modernisiert auf, weil angenommen wird, dass keine noch älteren Anlagen im Bestand sind, die mit dieser Technik modernisiert wurden.

²² <https://www.bmas.de/DE/Themen/Arbeitsschutz/Meldungen/abschluss-neufassung-betriebssicherheitsverordnung-bundeskabinett.html> (zuletzt geprüft am 12.04.2015)

²³ <http://auf.vdma.org/article/-/articleview/4119890> (zuletzt geprüft am 12.04.2015)

Abbildung 5 zeigt zusammenfassend den technologischen Fortschritt. So sind im Vergleich zu polumschaltbaren Antrieben Reduktionen des Fahrtenenergiebedarfs auf ca. 60 bis 20 % erzielt worden (vgl. [3]).

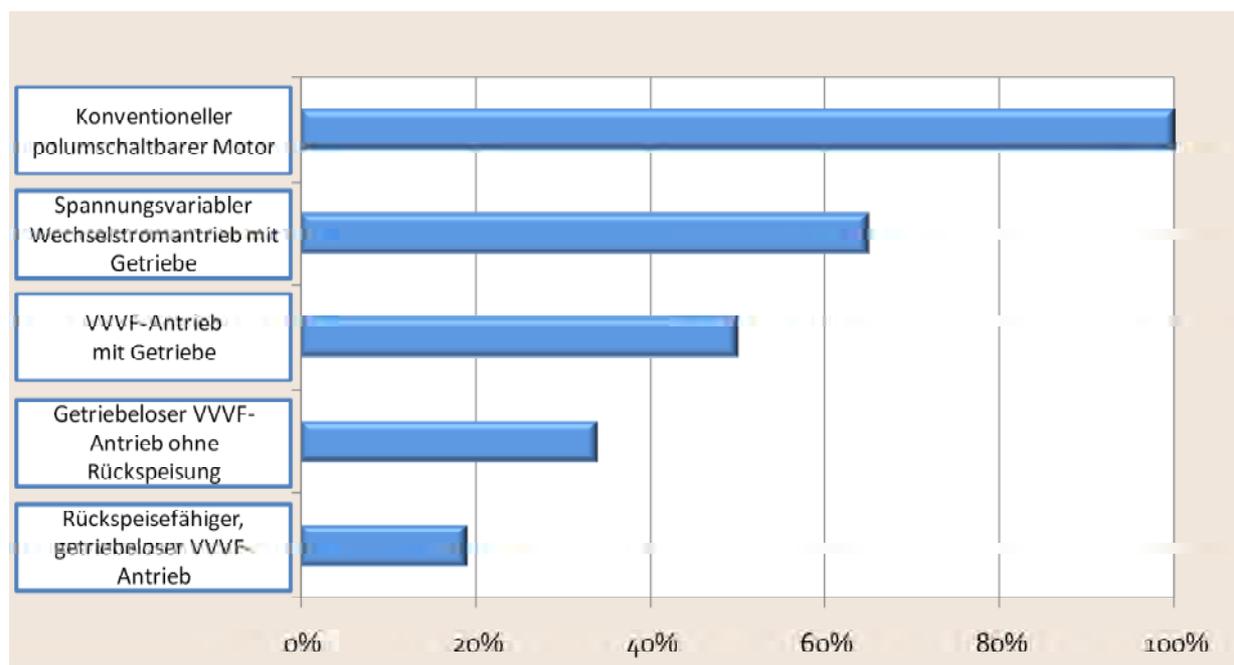


Abbildung 5: Relativer Vergleich des Energiebedarfs unterschiedlicher Antriebsarten, ausgehend vom polumschaltbaren Antrieb (Quelle: [3])

Sämtliche Anlagentypen können zudem nach der Türart differenziert werden. Neben den vollautomatischen Schiebetüren (Schacht- und Kabinentür), die ab 2005 überwiegend mit frequenzgeregelten Türantrieben ausgestattet sind, werden bei Baujahren vor 1985 die damals üblichen Drehtüren als Schachttüren alternativ berücksichtigt. Die Kabinenabschlusstüren (als Falt- oder Schiebetüren) sind bei diesen Varianten überwiegend mit unregelmäßigem Drehstromantrieben ausgestattet. Personenaufzüge ohne Kabinenabschlusstür sind aufgrund gesetzlicher Vorschriften auch im Bestand nicht mehr anzutreffen. Die Entriegelung der Drehtüren erfolgt über eine i.d.R. elektromagnetisch betätigte Riegelkurve, die während der Fahrt angezogen bleibt und so einen zusätzlichen Fahrtenenergiebedarf erzeugt.

Bei der Entwicklung der Anlagentypologie wurde eine vereinfachte, theoretische Entwicklung der Aufzugstechnik und der Modernisierungstätigkeit über fünf Jahrzehnte abgebildet. Zahlreiche weitere Varianten, die sich z.B. durch oft übliche Teilmodernisierungen ergeben können, werden nicht abgebildet. Die Anzahl und Komplexität der möglichen Varianten und Typvertreter würden dann den Ansprüchen einer handhabbaren Typologie nicht mehr genügen. Für die Nutzung im Projektverlauf wurde der oben beschriebene Ansatz noch weiter vereinfacht und reduziert (siehe Abschnitt 6). Die hier entwickelte Basis einer systematischen Beschreibung von Anlagentypen und Epochen kann jedoch für später Forschungsvorhaben mit günstigerer empirischer Datenlage wieder aufgegriffen werden.

4.2 Hydraulikaufzüge

Hydraulikaufzüge werden im Projekt nicht betrachtet, weil der Anteil von Hydraulikaufzügen bei Neuinstallationen in den letzten Jahren durch den vermehrten Einsatz von maschinenraumlosen Aufzügen (MRL) mit kompakten, getriebelosen Antrieben stark zurückgegangen ist [23], [24]. In Deutschland ist deshalb mit einer abnehmenden Bedeutung dieser Antriebsart zu rechnen.

5. Gebäudetypologien

In Abschnitt 3 wurde anhand früherer Forschungsarbeiten sowie existierender Normen und Richtlinien aufgezeigt, dass der Energiebedarf von Aufzügen sowohl von der installierten Anlagentechnik (beschrieben in Abschnitt 4) als auch von der Nutzungsintensität abhängt. Es liegt nahe, die Nutzungsintensität aus der Gebäudeart und der Gebäudenutzung abzuleiten. Methodische Voraussetzungen hierfür sollen in den folgenden Abschnitten für Wohn- und Nichtwohngebäude diskutiert werden. Vorab ist anzumerken, dass alle dem Verfasser bekannten Gebäudetypologien für Deutschland im Wesentlichen zur Abschätzung des Wärmebedarfs für die Beheizung entwickelt wurden. U.a. ist nun zu untersuchen, in wie weit sich existierende Gebäudetypologien dazu eignen, Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Aufzüge abzuleiten (Förderbedarf). Zunächst wird auch hier wieder ein (theoretischer) Rahmen entwickelt, der im weiteren Projektverlauf zunächst nicht vollständig genutzt werden kann.

5.1 Wohngebäude

Der Wohngebäudetyp wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf den Energiebedarf eines Personenaufzugs aus durch:

- die notwendige Dimensionierung (Kabinengröße und Fahrgeschwindigkeit) und
- die zu erwartende Anzahl der Fahrten in Abhängigkeit der Bewohnerzahl.

In den beiden folgenden Abschnitten werden die beiden Größen analysiert, um schließlich in Abschnitt 5.1.3 eine Wohngebäudetypologie für den deutschen Wohngebäudebestand mit den entsprechenden Anforderungswerten herzuleiten.

5.1.1 Dimensionierung der Aufzüge

Zur Auslegung von Aufzügen für einfache Wohngebäude findet sich im Schindler Planungsnavigator 2010 [10] eine tabellarische Empfehlung (Tabelle 17) für die Dimensionierung der Kabinengröße (bezogen auf die Nennlast) und die Aufzugsgeschwindigkeit (Fahrgeschwindigkeit).

Vollgeschosse im Gebäude	Anzahl der Aufzugsnutzer Nennlast [kg] (Anzahl der Aufzüge)						Fahrgeschwindigkeit [m/s]
	< 100	< 200	< 300	< 400	< 500	< 600	
2 - 3	630	-	-	-	-	-	1,0
4	630	630	-	-	-	-	1,0
5	1000	1000	-	-	-	-	1,0
6 - 7	1000	1000	1000	-	-	-	1,0
8 - 9	630 + 1000	630 + 1000	630 + 1000	630 + 1000	630 + 1000	-	1,0
10 - 11	630 + 1000	630 + 1000	630 + 1000	630 + 1000	630 + 2 x 1000	630 + 2 x 1000	1,6
12 - 14	630 + 1000	630 + 1000	630 + 1000	630 + 1000	630 + 2 x 1000	630 + 2 x 1000	1,6

Tabelle 17: Auslegung von Aufzügen für einfache Wohngebäude (Quelle: [10])

Bei Wohngebäuden ab vier Vollgeschossen sind die Musterbauordnung (MBO) [25] der Bauministerkonferenz bzw. die Landesbauordnung (LBO) des jeweiligen Bundeslandes sowie ab acht Vollgeschossen die Hochhausrichtlinie zu beachten [26], denn jedes Vollgeschosß muss dann mit mindestens zwei Aufzügen angefahren werden. Zu Tabelle 17 ist weiterhin anzumerken, dass die darin genannten Empfehlungen aus Sicht des Autors als erste Anhaltspunkte für eine mögliche Planung anzusehen sind. Weitere Aspekte, wie die Kubatur des Gebäudes, die tatsächliche Belegung oder der gewünschte Service-Level werden hier nicht berücksichtigt und müssen im konkreten Planungsfall geprüft und mit einbezogen werden. In [11] wird angemerkt, dass für die Planung im Wohngebäude der Nachmittag als kritische Tagesphase besonders relevant ist, da in diesem

Zeitraum mit hoher Wahrscheinlichkeit Bewohner nach Hause kommen und andere gleichzeitig das Gebäude verlassen.

5.1.2 Bestimmung der Fahrtenzahl und der Fahrtbetriebszeit

Nach VDI 4707 Blatt 1 [6] wird zur Berechnung des Fahrtbedarfs die tägliche Fahrtbetriebszeit nach Gleichung 8 herangezogen, wobei h die Förderhöhe und v_{Nenn} die Nenngeschwindigkeit des Aufzugs bedeuten.

$$t_{Fahren} = \frac{Fahrten_{Tag} \times 0,5 \times h}{v_{nenn}} \quad (8)$$

Hierzu sind Annahmen über die Anzahl der Fahrten pro Tag zu treffen. In der VDI 4707 Blatt 1 wird u.a. vorgeschlagen, den Fahrtbedarf zu schätzen. Ein Teilziel dieses Forschungsberichtes ist es, für verschiedene Wohngebäudetypen jeweils einen Schätzwert zu liefern.

Es ist nicht möglich, die Anzahl der zu erwartenden Fahrten pro Tag und Bewohner sicher anzugeben, da diese einerseits sehr von persönlichen Gewohnheiten und andererseits von der nicht vorauszusagenden Anzahl von Besuchern abhängig ist. Im Rahmen einer Seminararbeit am Lehrstuhl Ökonomie und Ökologie des Wohnungsbaus am KIT wurde auf Basis einiger Annahmen ein möglicher Lösungsansatz zur Abschätzung der Fahrten pro Tag und Bewohner entwickelt [4].

Als Grundannahme werden vier Fahrten pro Bewohner pro Tag angenommen. Dies bedeutet, dass jeder Hausbewohner seine Wohnung zwei Mal am Tag verlässt. Weitere Annahmen sind: Bewohner im Erdgeschoß und im ersten Obergeschoß verwenden keinen Aufzug, mobilitätseingeschränkte Bewohner verwenden den Aufzug jedoch auch im ersten Obergeschoß. Als Altersgrenze für eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, mobilitätseingeschränkt zu sein, wird das ab 2012 erhöhte Renteneintrittsalter²⁴ von 67 Jahren angenommen. Zur Berücksichtigung, dass die Anzahl der Personen, die den Aufzug benutzen, bei zunehmender Anzahl von Vollgeschossen zunimmt, wird ein sogenannter „Geschoßfaktor“ G definiert. G steigt im Bereich von eins bis sieben Stockwerken überproportional an und konvergiert bei einer sehr hohen Geschoßzahl gegen eins (Abbildung 6).

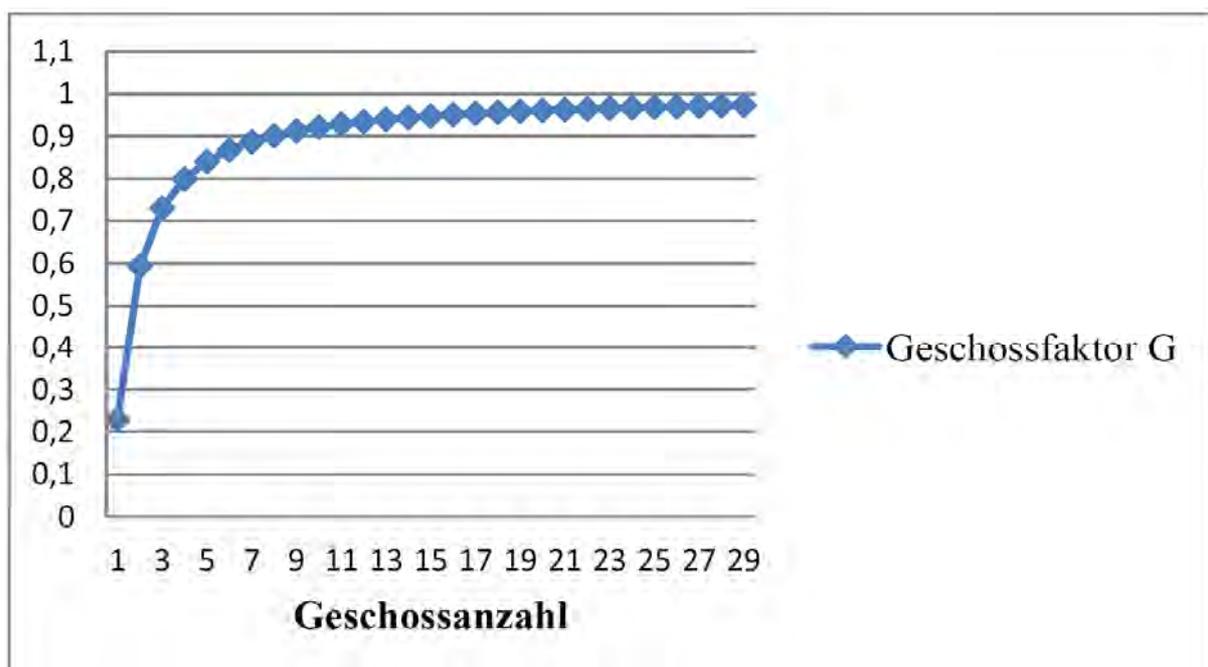


Abbildung 6: Geschoßfaktor (Quelle: [4])

²⁴ vgl. <http://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/neue-regeln-tabelle-wann-sie-ohne-abschlaege-in-rente-gehen-koennen/2790070.html> (zuletzt geprüft am 13.04.2015)

Mathematisch ergibt sich der in Abbildung 6 graphisch dargestellte Geschoßfaktor aus der Geschoßanzahl GA nach Gleichung 9 für Gebäude mit mindestens zwei Geschossen. Die Parameter der Gleichung 9 wurden so gewählt, dass der Arkustangens die in Abbildung 6 gezeigte plausible Form ausbildet. Dies bedeutet, dass bei sehr hohen Gebäuden ein Großteil der Bewohner den Aufzug benutzt (Annäherung an 100 %) bei niedrigen Gebäuden sind es deutlich weniger (bei drei Vollgeschossen z.B. nur noch knapp 60 %).

Zur Bestätigung der Parameter bzw. zur Anpassung dieser an reale Verhältnisse sind in den später betrachteten Gebäudetypen die Anzahl der tatsächlichen Fahrten zu erfassen bzw. hochzurechnen und mit den Schätzungen, basierend auf den Gleichungen 9 und 10 (bzw. 11 und 12), zu vergleichen.

$$G = \tan^{-1}(1,5574 - 1,5574 \times (1,7 \div GA)) \quad (9)$$

Somit kann mit den genannten Annahmen und der Anzahl von Bewohnern $B_{\text{Bedingung}}$ nach Gleichung 10 auf eine Fahrtenzahl pro Bewohner pro Tag geschlossen werden.

$$\text{Fahrten}_{\text{Tag}} = \text{ceil}(4 \times B_{\text{ab 2.OG}} \times G + 4 \times B_{\text{1.OG,ab 67}}) \quad (10)$$

Es ist nochmals anzumerken, dass die Parameter des Geschoßfaktors (Gleichung 9) eigenen Abschätzungen entspringen. Ziel war dabei, zunächst einen plausiblen Verlauf der Funktion (Abbildung 6) zu erhalten, der jedoch bis zum jetzigen Zeitpunkt durch Erhebungen im Gebäudebestand oder durch Ergebnisse der Messkampagne noch nicht verifiziert werden konnte. Vereinfachte Ansätze mit der Angabe sogenannter Treppenfaktoren (anstelle des hier vorgestellten Geschoßfaktors) finden sich in der Literatur und in etablierten Software-Hilfsmitteln ([11] und [27]). Der Treppenfaktor bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, die Treppe zu benutzen, um x % pro zusätzlich zu überwindendem Stockwerk abnimmt. Ein Treppenfaktor von 40 % bedeutet beispielsweise, dass 40 % der Nutzer bei einem Stockwerk die Treppe anstelle des Aufzugs benutzen. Für zwei Stockwerke sind es dann nur noch 40 % der 40 %, also 16 % usw. Zur Abschätzung der Anzahl von Bewohner in einem Wohngebäude wird nach [11] in Abhängigkeit der Wohnungsgröße und des Ausstattungsniveaus die Belegung einer Wohnung nach Tabelle 18 angegeben.

Typ	Komfort	Normal	Niedrig-Einkommen
Studio (1-Zimmer-Wohnung)	1	1,5	2
Wohnung (1 Schlafzimmer)	1,5	1,8	2
Wohnung (2 Schlafzimmer)	2	3	4
Wohnung (3 Schlafzimmer)	3	4	6

Tabelle 18: Wohnungsbelegung in Personen (Quelle: [11])

5.1.3 Wohngebäude-Typologie (Förderbedarfsmatrix)

Die vorgeschlagene Wohngebäude-Typologie (siehe Anhang 1) soll u.a. die zu erwartende Anzahl an Fahrten pro Jahr in Abhängigkeit des Gebäudetyps wiedergeben. Die Struktur der Matrix orientiert sich an der Deutschen Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) in Darmstadt [28]. Dort werden zehn Baualtersklassen von 1916 bis nach 2002 und sieben Gebäudetypen unterschieden:

- Einfamilienhäuser (EFH),
- Reihenhäuser (RH),
- Mehrfamilienhäuser (MFH),
- große Mehrfamilienhäuser (GMH),
- Hochhäuser (HH),
- Sondertyp Fertighäuser (F/F) und
- Sondertypen Mehrfamilienhäuser industrieller Bauweise in den neuen Bundesländern (NBL).

Im Folgenden werden nur Personenaufzüge in Mehrfamilienhäusern, großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern nach 1949 betrachtet. Von den Sondertypen der Mehrfamilienhäuser in den neuen Bundesländern

werden nur die Hochhäuser nach 1970 betrachtet, da diese erst nach 1970 ab acht Stockwerken mit Aufzügen ausgestattet wurden [29]. Die Gebäudetypologie des IWU wurde ursprünglich dazu entwickelt, den Heizwärmebedarf der verschiedenen Gebäudetypen anhand ihrer Geometrie, Ausführung und Ausrichtung der Außenbauteile abschätzen zu können. Drei Informationen aus der IWU Gebäudetypologie lassen sich auch zur Ermittlung des Förderbedarfs heranziehen:

- mittlere lichte Raumhöhe h_{Raum} ,
- Anzahl Vollgeschosse g ,
- Anzahl Wohneinheiten w .

Die durchschnittliche Förderhöhe h jedes Gebäudetyps kann mittels Gleichung 11 aus der Anzahl der Vollgeschosse, der mittleren lichten Raumhöhe und der Annahmen, dass die Zwischendecken ca. 25 cm stark sind und jeder Gebäudetyp unterkellert ist, abgeschätzt werden. Es wird für alle Gebäudetypen eine durchschnittliche Höhe der Kellerräume von 2,40 m angenommen.

$$h = g * (h_{Raum} + 0,25) + 1 * (2,40 + 0,25) \quad (11)$$

Die durchschnittliche Haushaltsgröße in Deutschland beträgt zwei Personen (Jahresdurchschnitt 2010²⁵). Über die Anzahl der Wohneinheiten w kann somit die Anzahl der Bewohner B abgeschätzt werden (noch genauer möglich, wenn zusätzlichen Informationen nach Tabelle 18 verfügbar sind). Nach aktueller Datenlage ist es momentan nicht möglich, eine ernsthafte Unterscheidung der Altersstruktur der Bewohner innerhalb des Gebäudes und ihre Verteilung auf die Stockwerke vorzunehmen. Deshalb wird zur Ermittlung der Anzahl der Fahrten pro Tag Gleichung 10 vereinfacht (Gleichung 12).

$$Fahrten_{Tag} = ceil(4 \times B \times G) \quad (12)$$

Förderhöhen, Anzahl der Fahrten pro Tag und typische Nenngeschwindigkeiten sind nun gemäß der vorangegangenen Ausführungen der Förderbedarfsmatrix im Anhang 1 zu entnehmen. Es wird dabei angenommen, dass in normalen und großen Mehrfamilienhäusern jeweils ein Aufzug installiert ist, in Hochhäusern dagegen zwei. Nach [29] sind in den Hochhäusern der neuen Bundesländer (Sondertypen industrieller Wohnungsbau) nur bei der jüngeren der beiden Baualterklassen zwei Aufzüge anzunehmen. Für Mehrfamilienhäuser wird eine typische Nenngeschwindigkeit von 0,8 m/s angenommen. Die typischen Nenngeschwindigkeiten großer Mehrfamilienhäuser werden unter der Annahme „mittleren Komforts“ nach Tabelle 14 berechnet, d.h. es wird eine maximale Fahrzeit über die gesamte Förderhöhe von ca. 25 Sekunden angenommen. Dabei werden als Minimum 0,8 m/s angenommen. Für die Hochhäuser werden unter der Annahme mäßigen Komforts und einer maximalen Fahrzeit von 30 Sekunden 1,0 bzw. 1,6 m/s nach Rundung ermittelt. Diese Ansätze stehen als Diskussionsgrundlage für zukünftige Forschungsvorhaben und Messkampagnen zur Verfügung, um diese zu validieren bzw. zu kalibrieren.

Alternativ kann, wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, die Anzahl der Fahrten nach DIN EN ISO 25745-2 (siehe Tabelle 10) ermittelt werden. Im Anhang A der Norm werden Nutzungskategorien mit der jeweils typischen Anzahl von Fahrten pro Tag auch für Wohngebäude angegeben [8].

5.2 Nichtwohngebäude

Der Nichtwohngebäudetyp wirkt sich in dreierlei Hinsicht auf den Energiebedarf eines Personenaufzugs aus, und zwar u.a. durch:

- die notwendige Dimensionierung (Kabinengröße und Fahrgeschwindigkeit),
- die zu erwartende Anzahl der Fahrten in Abhängigkeit der Anzahl der anwesenden Personen und

²⁵ vgl. http://www.statistik-portal.de/statistik-portal/de_jb01_jahrtab4.asp (zuletzt geprüft am 13.04.2015)

- die Positionierung der Aufzüge innerhalb des Gebäudes und die Anordnung von sozialen Treffpunkten, wie z.B. die Kantine.

Im Vergleich zum Wohngebäudebestand ist der Nichtwohngebäudebestand in Deutschland sehr heterogen. Es existiert zu Nichtwohngebäuden zum jetzigen Zeitpunkt noch keine mit der IWU-Wohngebäudetypologie vergleichbare systematische Beschreibung des Bestandes. Das IWU entwickelt momentan eine Nichtwohngebäudetypologie²⁶, auf die jedoch zum jetzigen Stand dieses Forschungsberichts noch nicht zugegriffen werden kann.

5.2.1 Dimensionierung der Aufzüge

Zur Auslegung von Aufzügen bei Bürogebäuden findet sich im Schindler Planungsnavigator 2010 [10] eine tabellarische Empfehlung (Tabelle 19) für die Dimensionierung Kabinengröße (Nennlast) und die Aufzugs geschwindigkeit (Fahrgeschwindigkeit).

Vollgeschosse im Gebäude	Anzahl der Aufzugsnutzer Nennlast [kg] (Anzahl der Aufzüge)								Fahrge- schwindigkeit [m/s]
	< 200	< 300	< 400	< 500	< 600	< 800	< 1000	< 1200	
2-3	2 x 630	-	-	-	-	-	-	-	1,0
4	2 x 630	2 x 630	3 x 630	-	-	-	-	-	1,0
5-6	3 x 630	3 x 630	3 x 630	3 x 1000	-	-	-	-	1,0
7-11	3 x 630	3 x 630	4 x 630	4 x 1000	4 x 1275	-	-	-	1,6
12-14	3 x 1000	3 x 1000	4 x 1000	4 x 1000	4 x 1275	-	-	-	1,6
15-17	-	4 x 1000	4 x 1000	5 x 1000	5 x 1275	5 x 1275	-	-	2,5
18-19	-	4 x 1000	4 x 1275	5 x 1000	5 x 1275	5 x 1275	6 x 1275	6 x 1275	2,5
20	-	5 x 1000	5 x 1275	5 x 1275	5 x 1600	5 x 1600	6 x 1600	6 x 1600	3,0

Tabelle 19: Auslegung von Aufzügen für Bürogebäude (Quelle: [10])

Hinsichtlich der Anzahl der Aufzüge sind die Musterbauordnung, die jeweilige Landesbauordnung und ggf. die Hochhausrichtlinie zu beachten (analog zu Abschnitt 5.1.1). Es gelten auch hier ganz besonders die in Abschnitt 5.1.1 zu Tabelle 17 genannten Einschränkungen.

5.2.2 Nichtwohngebäudetypen in Deutschland

Erste Ansätze, Nichtwohngebäude systematisch im Kontext von Energieverbrauchs- und Emissionsminderungsmaßnahmen in der Betriebsphase zu typisieren, wurden 2011 [12] und 2013 [30] veröffentlicht. Da im vorliegenden Forschungsbericht nur Personenaufzüge betrachtet werden, werden Fabrik- und Werkstattgebäude sowie Lagerhallen von vorne herein nicht berücksichtigt, da dort i.d.R. auch Lastenaufzüge anzutreffen sind. Die Nutzung von Aufzügen in Bildungsgebäuden, wie z.B. Schulen und Hochschulen, ist schwer zu systematisieren, da evtl. vorhandene Aufzüge teilweise „verschlüsselt“²⁷ sein können, so dass kein regelmäßiges Nutzungsszenario definiert werden kann und demzufolge keine Untersuchungen im Sinne der Fragestellung des Forschungsberichts sinnvoll sind. Dies gilt analog für Handelsgebäude, Lager- und Sporthallen sowie Kulturgebäude.

²⁶ vgl. <http://www.iwu.de/forschung/energie/laufend/nichtwohngebäudeanalyse/> (zuletzt geprüft am 13.04.2015)

²⁷ nur mit besonderer Zugangsberechtigung, z.B. mit Schlüssel, für einen eingeschränkten Personenkreis nutzbar

Nr.	Nichtwohngebäudetyp
1	Bildungsgebäude
2	Büro- und Verwaltungsgebäude
3	Fabrikgebäude
4	Werkstattgebäude
5	Heilbehandlungsgebäude
6	Handelsgebäude
7	Lagerhallen
8	Sporthallen
9	Schwimmbhallen
10	Kulturgebäude
11	Beherbergungsgebäude

Tabelle 20: Nichtwohngebäudetypen (Quelle: [12])

Nach Tabelle 20 könnten demzufolge von 11 denkbaren Gebäudetypen die Gebäudetypen 2 (Büro- und Verwaltungsgebäude), 5 (Heilbehandlungsgebäude, z.B. Krankenhäuser) und 11 (Beherbergungsgebäude, z.B. Hotels) sinnvoll betrachtet werden. Nach aktuellem Stand und Projektverlauf werden hiervon nur Büro- und Verwaltungsgebäude untersucht. Der Nichtwohngebäudebestand wird in der Anlagen-Gebäude-Matrix (Anhang 2) deshalb grob untergliedert.

6. Erarbeitung der Energiekennwerte

Um die „Anlagen-Gebäude-Matrix“ in Anhang 2 mit Informationen auszustatten und schließlich das „Kennwertedatenblatt“ daraus zu entwickeln, war geplant, Jahresenergiekennwerte u.a. nach VDI 4707 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 3.2.1) sowie auf Basis von Wochenmessungen hochzurechnen. Alternativ - bei nicht durchführbaren Messungen - sollten bei Verfügbarkeit verwertbarer technischer Datenblätter Energiekennwerte nach VDI 4707 Blatt 2 (vgl. Abschnitt 3.2.2) gebildet werden. In Abschnitt 6.2.2 wird schließlich neben den Auswertungen darauf eingegangen, warum die geplante Messkampagne nicht vollständig durchgeführt und damit die ursprünglichen Ziele hinsichtlich der Messergebnisse nicht erreicht wurden.

6.1 Planung der Messkampagne

An realen Anlagen sind Energieverbrauchsmessungen durchzuführen. Im Rahmen der Messkampagne wurde festgelegt, welche Anlagentypen in ausgesuchten Gebäuden aus dem Wartungsbestand des Praxispartners in ausreichender Anzahl aus Gründen der statistischen Belastbarkeit gemessen werden sollen. Vorbereitung und Durchführung erforderten eine sorgfältige Herangehensweise - einerseits zur Sicherstellung verwertbarer Messergebnisse und andererseits, um die Sicherheit der Benutzer und des Wartungspersonals zu gewährleisten sowie gleichzeitig die Verfügbarkeit der Anlagen nicht zu stark zu beeinträchtigen. Geeignete Messmethoden und Protokollierungsmechanismen wurden entwickelt und zunächst bei Pilotmessungen erprobt.

6.1.1 Auswahl der Messtechnik und Entwicklung eines Leitfadens

Um bei den zu messenden Anlagen den Betreibern keine Betriebsunterbrechungen zuzumuten und kritische Eingriffe in die Energieversorgung zu vermeiden, fiel die Entscheidung auf den Einsatz von Stromzangen. Zur Messung der Energieverbräuche für Standby und Fahren kommt ein dreiphasiger Netz- und Stromversorgungsanalysator vom Typ Fluke 435-II²⁸ zum Einsatz. Dieses Gerät ist mobil und verfügt über eine integrierte Datenspeichermöglichkeit. Es erleichtert die Handhabung, weil damit kein zusätzlicher Laptop zur Datenspeicherung notwendig ist. Im Rahmen einer Masterarbeit, die vom Praxispartner betreut wurde, entstand ein Leitfaden (Checkliste und Bedienungsanleitung der Messtechnik), der dem Wartungspersonal zur Durchführung der Messungen an die Hand gegeben wird (siehe Anhang 3).

An jeder in Frage kommenden Anlage sind zwei Messungen durchzuführen:

- Referenzfahrt nach VDI 4707 Blatt 1 sowie
- Wochenmessung (sieben Tage durchgehend) in einer Woche mit „Normalbelegung“ des Gebäudes, d.h. bei Bürogebäuden keine Urlaubszeit oder Feiertage/Brückentage.

6.1.2 Geeignete Auswahl von Messobjekten

Ziel der Auswahl von Messobjekten war in diesem Zusammenhang, für Planer besonders relevante Anlagen-Gebäude-Kombinationen mit möglichst realitätsnahen Kennwerten, basierend auf aussagekräftigen Messwerten, beschreiben zu können. Zunächst sollten der aktuelle technische Stand bei Neuinstallationen (Standard und bestmöglich, höchstens zwei bis fünf Jahre alt) sowie modernisierte Bestandsanlagen nach 1985 erfasst werden.

Bei Wohngebäuden wurden die Messungen auf Mehrfamilienhäuser (MFH, vgl. Abschnitt 5.1.3) konzentriert, weil diese einen großen Anteil im Bestand der betrachteten Wohngebäudetypen ausmachen (38 % der Wohneinheiten bzw. 31 % der Wohnfläche in Deutschland [31]). Einfamilienhäuser wurden nicht betrachtet, und

²⁸ vgl. <http://www.fluke.com/fluke/dede/Leistungsmessgeraete-und-Netzqualitaets-Analysatoren/Netzqualitaetslogger/Fluke-435-Series-II.htm?PID=73939> (zuletzt geprüft am 13.04.2015)

große Mehrfamilienhäuser (7 % aller Wohneinheiten in Deutschland) wurden ebenfalls nicht in die Messkampagne aufgenommen. Der Fokus liegt damit bei Nichtwohngebäuden.

Gemäß der vorangegangenen Ausführungen wurden sogenannte „typische Fälle“ für die Messungen ausgewählt. Dieses Auswahlverfahren wurde angewandt, um auf dem Markt besonders häufig vertretene, für die Grundgesamtheit „charakteristische“ und bekannte Konstellationen möglichst repräsentativ abzudecken (vgl. [32]).

6.2 Durchführung der Messkampagne

Die Messkampagne wurde in zwei organisatorische Abschnitte aufgeteilt: die Pilotmessungen und die finalen Messungen. Die Pilotmessungen dienten im Wesentlichen der Erprobung der ausgewählten Messtechnik, des Leitfadens (Anhang 3) und der geplanten organisatorischen Abläufe, um die späteren finalen Messreihen möglichst reibungslos ablaufen zu lassen.

6.2.1 Pilotmessungen

Drei Pilotmessungen verliefen erfolgreich. Es zeigte sich, dass die ausgewählte Messtechnik grundsätzlich den Anforderungen des Vorhabens entspricht und der Leitfaden vor Ort an den Anlagen umsetzbar sein wird.

Gemessen wurden drei Aufzüge in Bürogebäuden in Essen. Alle drei Anlagen sind mit Frequenzumrichter und verbesserter Mikroprozessorsteuerung mit CAN-Bus sowie eine Anlage mit getriebelosem Antrieb ausgestattet (die anderen beiden mit Getriebe). Die technischen Daten gehen aus den Tabellen 21 bis 23 hervor.

Anlagendaten: Thyssenhaus		
Anlagentyp: Fremdanlage mit Triebwerksraum		
Aufzugtyp		SO61A00
Antrieb		DAB450
Regelgerät		API 130 R
Baujahr		2006
Anzahl Aufzüge		4er Gruppe
Nennlast:	Q	1.350 kg
Nenngeschw.:	V_N	3,5 m/s
Haltestellenzahl:	HST	21
Förderhöhe:	FH	70 m
Gegengewichtsausgleich		45 %
Motor Nennstrom I_N		64 A
Motor Nennleistung P_N		26 kW

Tabelle 21: modernisierte Bestandsanlage nach 2005 (Quelle: ThyssenKrupp)

Anlagendaten: Evonik		
Anlagentyp: Anlage mit Triebwerksraum		
Aufzugtyp		BO61A00
Antrieb		DAF 290 M001
Regelgerät		API 40
Baujahr		1998
Anzahl Aufzüge		6er Gruppe
Nennlast:	Q	1000 kg
Nenngeschw.:	V_N	2,5 m/s
Haltestellenzahl:	HST	21
Förderhöhe:	FH	71 m
Gegengewichtsausgleich		50 %
Motor Nennstrom I_N		39,7 A
Motor Nennleistung P_N		16 kW

Tabelle 22: modernisierte Bestandsanlage nach 1995 (Quelle: ThyssenKrupp)

Anlagendaten: Thyssenhaus Vorbau		
Anlagentyp: Anlage mit Triebwerksraum		
Aufzugtyp		SO51A00
Antrieb		Loher LNLA 180
Regelgerät		CPI 48
Baujahr		2006
Anzahl Aufzüge		2er Gruppe
Nennlast:	Q	450 kg
Nenngeschw.:	V_N	1,2 m/s
Haltestellenzahl:	HST	6
Förderhöhe:	FH	27,5 m
Gegengewichtsausgleich		45 %
Motor Nennstrom I_N		27 A
Motor Nennleistung P_N		14 kW

Tabelle 23: modernisierte Bestandsanlage nach 2005 (Quelle: ThyssenKrupp)

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Wochenmessungen der drei gemessenen Anlagen. Es ist das typische Nutzungsprofil von Bürogebäuden mit gegenüber den regulären Arbeitstagen abnehmender Frequentierung am Wochenende erkennbar. Die Messungen wurden bei Normalbelegung durchgeführt, d.h. keine Haupturlaubszeit, Brücken- oder Feiertage. Der am höchsten frequentierte Aufzug im Thyssenhaus verbraucht durchschnittlich 48 kWh pro Tag, wobei die Energierückspeisung des Antriebs hier bereits berücksichtigt ist. Im Evonik-Gebäude wurden 23,5 kWh pro Tag sowie im deutlich weniger frequentierten Thyssenhaus Vorbau 7 kWh pro Tag als Durchschnittswerte ermittelt.

Abbildung 8 zeigt einen typischen Tagesverlauf in einem Bürogebäude (Thyssenhaus). Zwischen 22.00 und 5.00 Uhr ist der reine Stillstandsverbrauch von ca. 700 Wh pro Stunde zu erkennen. Spitzen sind im morgendlichen Füllbetrieb und zur Mittagszeit im Kantinenbetrieb zu erkennen. In den späteren Nachmittagsstunden nimmt der Energiebedarf pro Stunde kontinuierlich ab, d.h. es sind keine Spitzen mehr zu erkennen. Dies hängt möglicherweise mit flexiblen Arbeitszeitregelungen (Gleitzeit) zusammen.

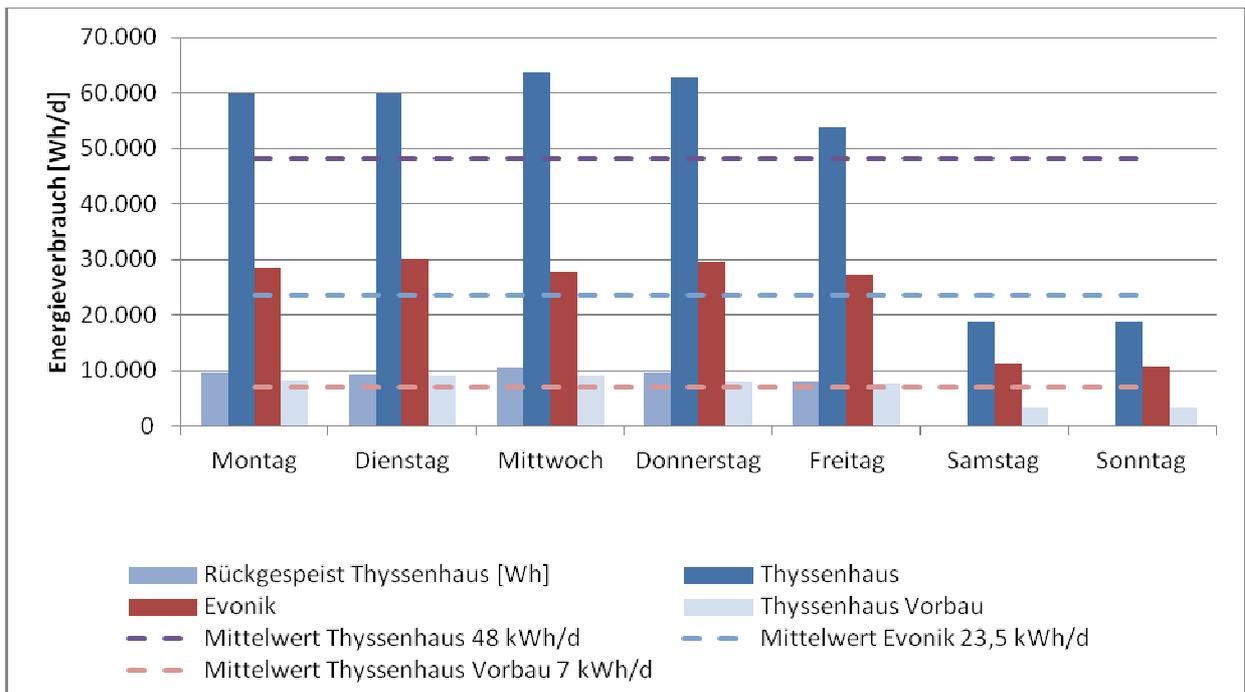


Abbildung 7: Wochenmessung an drei Aufzügen (Quelle: ThyssenKrupp)

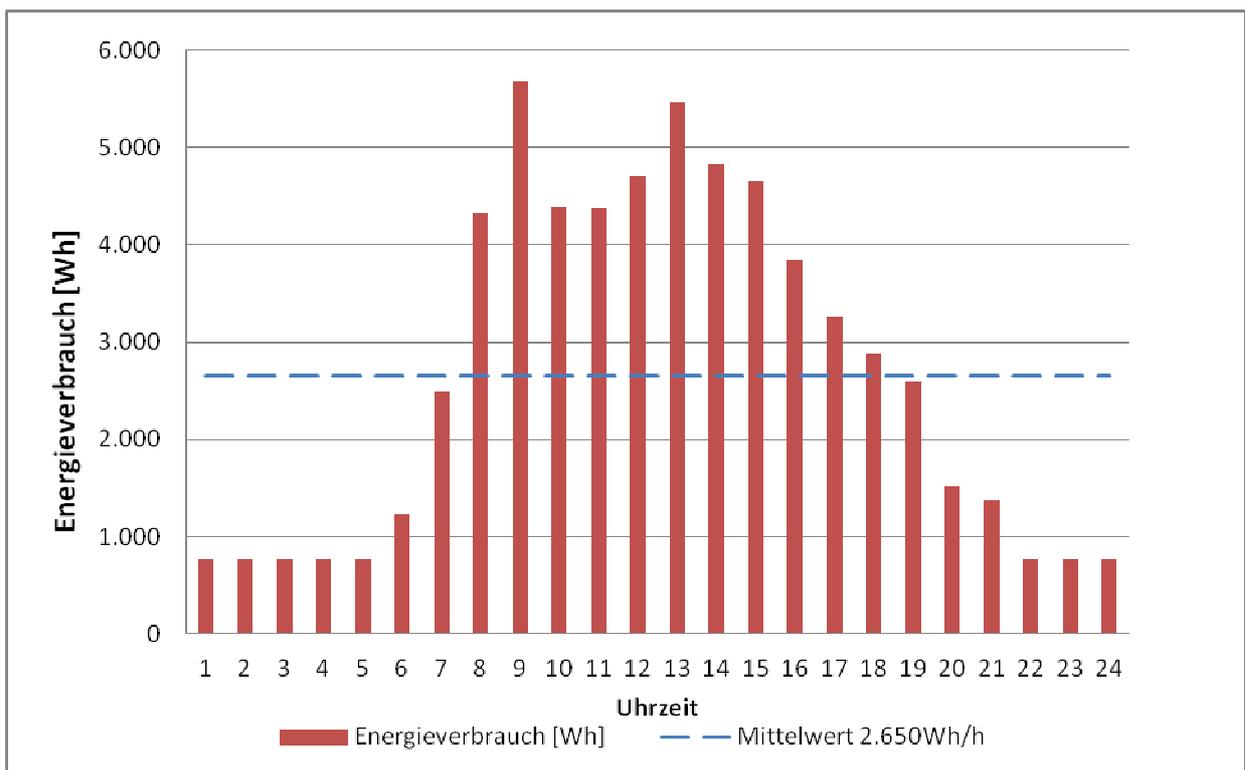


Abbildung 8: Tagesgang Thyssenhaus (Quelle: ThyssenKrupp)

6.2.2 Finale Messungen und Hochrechnungen

Unter den bereits geschilderten Umständen konnten vom Praxispartner schließlich 80 Messungen durchgeführt werden. Die relativ geringe Anzahl erforderte zuvor eine besonders sorgfältige Auswahl der Messobjekte, um den wichtigsten Zielen und Fragestellungen des Projektes gerecht zu werden. Dabei wurden die in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Kriterien zugrunde gelegt und erste reguläre Messungen nach dem Abschluss der Pilotmessungen bis zur Erstellung des zweiten Zwischenberichtes durchgeführt. Die restlichen Messungen wurden anschließend durchgeführt und die Ergebnisse im März 2015 übergeben.

Bei der Ermittlung des Jahresenergiebedarfs einerseits nach VDI 4707 Blatt 1 und andererseits auf Basis der Wochenmessungen ergaben sich bei den frühen Auswertungen erster Messungen zwischen den beiden Verfahren bei Nichtwohngebäuden Abweichungen in verschiedenen Größenordnungen.²⁹ Dabei fiel zunächst auf, dass diese Abweichungen bei Anlagen mit absolut geringerem Energiebedarf (z.B. Neuinstallationen bestmöglich) prozentual größer ausfallen als bei Anlagen mit höherem Energiebedarf. Diese Beobachtungen wurden bei der finalen Auswertung in Abschnitt 6.4 nochmals überprüft.

Allerdings lässt sich aus diesen ersten Beobachtungen eine wichtige methodische Frage kritisch zur Diskussion stellen: Wie erfolgt die Hochrechnung einer Wochenmessung mit Normalbelegung des Gebäudes auf ein Betriebsjahr, um einen Vergleich mit dem Jahresenergiebedarf nach VDI 4707 Blatt 1 herzustellen?

In den folgenden beiden Unterabschnitten werden zwei Verfahren zur Hochrechnung beschrieben. Bei den finalen Auswertungen wurde dann schließlich das vereinfachte Verfahren angewandt.

Methode mit Kennwertebaukasten (ausführliches Verfahren)

Es ist unrealistisch, eine Wochenmessung auf die Gesamtwochenzahl eines Betriebsjahres hochzurechnen, da nicht von ganzjähriger Normalbelegung ausgegangen werden kann. Da die Anlagen bei Wenig- oder Nichtnutzung, z.B. in Urlaubszeiten, i.d.R. betriebsbereit gehalten werden, stellt sich die weitere Frage nach der Verteilung und der Höhe des Standby-Stromverbrauchs über das gesamte Betriebsjahr. Hierzu können bei den untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäuden drei Nutzungsszenarien unterschieden werden:

- Normalbelegung (hier wird von 10 % Abwesenheit ausgegangen),
- Samstag, Sonntag, Feiertage,
- Tage mit reduzierter Belegung (Haupturlaubszeiten).

Dieser Ansatz erfordert dann wiederum zwei weitere zu ermittelnde Größen:

- die Anzahl (Tage) der oben genannten Nutzungsszenarien pro Jahr,
- die Differenzierung der verschiedenen Standby-Modi (z.B. nach VDI 4707 Blatt 2) und ihr Zeitanteil pro Tag eines Nutzungsszenarios.

Hierzu wurde ein sogenannter „Kennwertebaukasten“ entworfen, der das vollständige Nutzungsprofil mit den oben genannten Daten aufnehmen kann und damit den gesamten Jahresenergiebedarf berechnet (Tabelle 24).

²⁹ Auf mögliche Abweichungen von +/- 20 % wird in der VDI Richtlinie 4707 Blatt 1 hingewiesen.

Fahrprofile Bürogebäude		Leistungsaufnahme		Zeit	Energieverbrauch	Wochenlage mit Normalbelegung	Samstags-/Sonntags-/Feiertage	Tage mit reduzierter Belegung	Betriebstage gesamt	Energieverbrauch
		W	min pro Tag	Wh pro Tag	pro Jahr	pro Jahr	pro Jahr	pro Jahr	kWh pro Jahr	
Normalbelegung	Energieverbrauch Fahrt pro Wochentag			0	0				0	
	P0 Stillstand - Komponenten in Betrieb	0	0	0						
	S0 Stillstand - Komponenten sofort wieder betriebsbereit	0	0	0						
	S1 Stillstand - Komponenten im Sleep-Modus, Aufweckzeit <= 3 Sekunden	0	0	0						
	S2 Stillstand - Komponenten im Soft-Off-Modus, Aufweckzeit <= 60 Sekunden	0	0	0						
	Energieverbrauch pro Wochentag (Normalbelegung)			0						
Samstag/Sonntag/Feiertag	Energieverbrauch Fahrt pro Samstag/Sonntag/Feiertag			0		0			0	0
	P0 Stillstand - Komponenten in Betrieb	0	0	0						
	S0 Stillstand - Komponenten sofort wieder betriebsbereit	0	0	0						
	S1 Stillstand - Komponenten im Sleep-Modus, Aufweckzeit <= 3 Sekunden	0	0	0						
	S2 Stillstand - Komponenten im Soft-Off-Modus, Aufweckzeit <= 60 Sekunden	0	0	0						
	Energieverbrauch pro Samstag/Sonntag/Feiertag			0						
Urlaubszeit	Energieverbrauch Fahrt pro Tag mit reduzierter Belegung			0			0			
	P0 Stillstand - Komponenten in Betrieb	0	0	0						
	S0 Stillstand - Komponenten sofort wieder betriebsbereit	0	0	0						
	S1 Stillstand - Komponenten im Sleep-Modus, Aufweckzeit <= 3 Sekunden	0	0	0						
	S2 Stillstand - Komponenten im Soft-Off-Modus, Aufweckzeit <= 60 Sekunden	0	0	0						
	Energieverbrauch pro Tag mit reduzierter Belegung			0						

Tabelle 24: Kennwertebaukasten (eigene Darstellung)

Die Anwendung des Kennwertebaukastens erfordert zuvor die realitätsnahe, gebäudebezogene Ermittlung der oben genannten, erforderlichen Daten. Für jeden Anlagen-Gebäude-Typ ist hierzu ein Nutzungsprofil zu erstellen. Bei den Wochenmessungen müssten zusätzlich die Bewegungen des Aufzugs und die Leistungsaufnahmen in den jeweiligen Standby-Modi kontinuierlich geloggt werden. Hiermit wäre das Nutzungsprofil für die Normalbelegung, sowie Samstag und Sonntag erstellt. Für Tage mit reduzierter Belegung sind die anteiligen Wochentage, z.B. vom Betreiber des Gebäudes, zu erfragen und die anteiligen Zeitdauern der Standby-Modi abzuschätzen. Idealerweise sollte auch dieses Fahrprofil im Rahmen von Messungen ermittelt werden (Ausblick für die Zukunft - in diesem Projekt nicht realisierbar).

Methoden mit Korrekturfaktoren (vereinfachtes Verfahren)

Sind Wochenmessungen nur zu Zeiten einer Normalbelegung (hier mit höchstens 10 % angenommener Abwesenheit) möglich, kann ein alternatives, vereinfachtes Berechnungsverfahren zum Einsatz kommen. Zunächst wird ein durchschnittlicher kumulierter Tagesenergieverbrauch für die Werktage ermittelt (arithmetisches Mittel der kumulierten Tagesenergieverbräuche der fünf Werktage) und auf das Jahr hochgerechnet (mit angenommenen 52 Wochen und fünf Werktagen pro Woche als „unkorrigierter“ Jahresverbrauch für Werktage). Nun sind zwei weitere Schritte erforderlich: eine Korrektur zur Berücksichtigung von Werktagen mit geringer Belegung (z.B. Haupturlaubszeiten und Feiertage) sowie die Hinzurechnung der Wochenendverbräuche. Ein Werktag mit geringerer Belegung wird mit einem Verbrauch als arithmetisches Mittel der kumulierten Verbräuche von Samstag und Sonntag angenommen. Dieser wird mit der entsprechenden Anzahl dieser Tage auf das Jahr hochgerechnet (z.B. 35 Tage mit 25 Urlaubs- und 10 Feiertagen). Für jeden Standort der gemessenen Anlagen sind die Feiertage zu ermitteln.³⁰ Die Wochenendverbräuche werden mit Faktoren berechnet, die sich jeweils aus dem Verhältnis der kumulierten Tagesverbräuche eines durchschnittlichen Werktages mit Normalbelegung sowie den kumulierten Tagesverbräuchen von Samstag und Sonntag ergeben (beispielsweise Größenordnungen in Höhe von 6 bzw. 4 %). Mit diesen beiden Faktoren lassen sich dann die kumulierten Jahresverbräuche für Samstag und Sonntag aus dem unkorrigierten Jahresverbrauch für Werktage herleiten. Um schließlich zum Jahresgesamtverbrauch zu kommen, ist folgende abschließende Berechnung durchzuführen (Gleichung 13):

$$\begin{aligned}
 \text{Jahresgesamtverbrauch} &= \text{unkorrigierter Jahresverbrauch} + \text{Jahresverbrauch Samstage} \\
 &+ \text{Jahresverbrauch Sonntage} - \text{Jahresdifferenz Werktage_Feiertage}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

³⁰ z.B. <http://www.schnelle-online.info/Arbeitstage-Lehrer.html> (zuletzt geprüft am 13.04.2015)

Wenn sich prinzipiell bei Analysen signifikante Abweichung zwischen VDI 4707 Blatt 1 und Wochenmessungen im realen Betrieb ergeben, spielt letztlich auch die Erwartungshaltung, die Fragestellung und die Perspektive des jeweiligen Akteurs eine Rolle zur qualifizierten Beurteilung der Ergebnisse:

- Geht es dabei um das Ziel, die Effizienz und Qualität eines Produktes unter normierten Randbedingungen zu beschreiben – z.B. aus Sicht des Herstellers von Aufzugsanlagen bzw. Komponenten? In diesem Fall bietet die Richtlinienreihe VDI 4707 ein methodisch nachvollziehbares und anerkanntes Werkzeug zur Erstellung eines Energieeffizienzlabels.
- Oder geht es darum, den Energiebedarf eines Aufzugs unter realitätsnahen, möglicherweise komplexen, Nutzungsszenarien zu prognostizieren – z.B. aus Sicht des Betreibers, der Energiekosten möglichst präzise, z.B. für die Lebenszykluskostenrechnung, vorhersagen muss? Hierzu sollten die Ergebnisse dieses Projekts einen Mehrwert liefern.

6.3 Auswertung von Produktdokumentationen

Zur Berechnung von Energiekennwerten auf Basis technischer Daten (u.a. Wirkungsgrade von Komponenten, Energiebedarf verschiedener Standby-Modi etc.) nach VDI 4707 Blatt 2 sollten ursprünglich technische Dokumentationen des Praxispartners herangezogen werden. Die hierzu erforderlichen Unterlagen konnten jedoch im Rahmen des Projektes nicht für alle Komponenten einer kompletten Aufzugsanlage beschafft werden – auch nicht von Dritten, da sie teilweise aufgrund des erforderlichen Detaillierungsgrades als wettbewerbs sensitiv eingestuft werden. Der Ansatz wird jedoch für spätere Untersuchungen weiterhin empfohlen.

6.4 Beschreibung und Analyse des Datensatzes der Messungen

In den Tabellen 25 und 26 werden sämtliche in diesem Abschnitt eingeführten Variablen mit ihren Abkürzungen, Einheiten und Ausprägungen erläutert (Abkürzungsverzeichnisse). In allen darauffolgenden Tabellen, Schaubildern und erläuternden Texten dieses Abschnitts werden sie einheitlich verwendet.

Tabelle 25 zeigt dabei einen Überblick der metrischen Variablen des gelieferten Datensatzes. Der Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 und der Jahresenergieverbrauch nach hochgerechneten Wochenmessungen stellen die wesentlichen Ergebnisvariablen der durchgeführten Messungen dar (fett markiert), die nach den zuvor beschriebenen Verfahren berechnet wurden und in Abschnitt 6.5 zur Darstellung wesentlicher Ergebnisse herangezogen werden. Welche Abhängigkeiten zu den restlichen Eingangsgrößen bestehen, wie hoch der Anteil des Standby-Verbrauchs am ermittelten Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 ausfällt und die Abweichungen der beiden Ergebnisvariablen voneinander (VDI vs. Wochenmessung) sind weitere Zusammenhänge, die aus der Analyse hervorgehen sollen.

Tabelle 26 fasst die verwendeten kategorialen Variablen zusammen. Neben den gebäudeabhängigen Variablen (Nutzungstyp nach VDI 4707 Blatt 1 sowie Gebäudetyp) sind die technischen Eigenschaften der gemessenen Anlagen darin festgehalten. Es wird zwischen Antrieben mit Getriebe und getriebe los unterschieden. Geregelt werden diese entweder mit einem Spannungsregler (Phasenanschnittsregler) oder mit einem Frequenzregler. Getriebe lose Antriebe können nur mit einem Frequenzregler kombiniert werden. Frequenzregler sind optional mit einer Energierückspeisung (Rekuperation) ausgestattet. Mikroprozessorsteuerungen sind optional mit einer Standby-Optimierung ausgestattet. In den folgenden Analysen wird sich zeigen, dass die Nutzungskategorie (fett markiert) einen entscheidenden Einfluss auf den Jahresenergieverbrauch haben wird.

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
JVVDI	Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1	kWh
JVWM	Jahresenergieverbrauch nach Hochrechnung der Wochenmessungen	kWh
ASTVDI	Anteil des Standby-Verbrauchs am Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1	%
QVDIWM	Abweichung der Hochrechnung der Wochenmessungen zum Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707	%
BAUJ	Baujahr	
NENNG	Nenngeschwindigkeit	m/s
TRAGF	Tragfähigkeit (Nennlast)	kg
FOERD	Förderhöhe	m
LA_STBY	Leistungsaufnahme Standby (Eingangsgröße für Berechnung nach VDI 4707 Blatt 1)	W
VDI_REF	Energieverbrauch der Referenzfahrt nach VDI 4707 Blatt 1	Wh
MO	Energieverbrauch der Wochenmessung am Montag	Wh
DI	Energieverbrauch der Wochenmessung am Dienstag	Wh
MI	Energieverbrauch der Wochenmessung am Mittwoch	Wh
DO	Energieverbrauch der Wochenmessung am Donnerstag	Wh
FR	Energieverbrauch der Wochenmessung am Freitag	Wh
SA	Energieverbrauch der Wochenmessung am Samstag	Wh
SO	Energieverbrauch der Wochenmessung am Sonntag	Wh

Tabelle 25: Abkürzungsverzeichnis der metrischen Variablen

Abkürzung	Erläuterung	Ausprägung
NTYP	Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1	1 / 2 / 3 / 4 / 5
GTYP	Gebäudetyp	Wohngebäude (Wohnen) oder Bürogebäude (Buero)
ANTR	Getriebetyp	mit Getriebe (geared) oder getriebelos (gearless)
REG	Regelgerät	VVFFOR (Spannungsregler)
		VVVFOR (Frequenzregler ohne Energierückspeisung)
		VVVFMR (Frequenzregler mit Energierückspeisung)
STE	Steuerungstyp	Mikroprozessorsteuerung mit Standby-Optimierung (ja)
		Mikroprozessorsteuerung ohne Standby-Optimierung (nein)

Tabelle 26: Abkürzungsverzeichnis der kategorialen Variablen

Die Tabellen 27 und 28 beschreiben den vollständigen Datensatz, der aus den Messungen hervorging – hier zunächst ohne Bewertung (Abkürzungen, Einheiten und Ausprägungen siehe Tabellen 25 und 26). 75 Anlagen konnten aufgrund des vorliegenden Datenumfangs und der gegebenen Datenqualität zunächst ausgewertet werden. Von den ursprünglich 79 auswertbaren Anlagen wurden noch zwei hydraulisch betriebene vorab ausgeschlossen, weil diese Technologie im Projekt nicht berücksichtigt wurde. Zwei weitere Anlagen waren Krankenhäusern zugeordnet. Die Anzahl ist zu gering, um damit einen Gebäudetyp als Klasse abzubilden; diese Anlagen wurden somit ebenfalls von der Auswertung ausgeschlossen. Die metrischen Variablen in Tabelle 27 werden schließlich beschrieben durch:

- die Anzahl der zunächst verwertbaren Messungen (N),
- das arithmetische Mittel (MEAN),
- die Standardabweichung (STD),
- das Minimum (MIN) und das Maximum (MAX),
- die 25 %- und 75 %-Quartile (Q25 und Q75) sowie
- den Median (Q50).

Tabelle 28 gibt wieder, wie oft die jeweils möglichen Ausprägungen der kategorialen Variablen in der Stichprobe auftraten. Es zeigte sich dabei, dass die Nutzungskategorien 1 und 5 nach VDI 4707 Blatt 1, eine Anlage mit Phasenanschnittsregler sowie fünf Anlagen mit Standby-Optimierung stark unterrepräsentiert sind (in der Tabelle rot markiert). Für die folgenden Betrachtungen wurden deshalb weitere 12 Anlagen aus dem Datensatz ausgeschlossen.

	N	MEAN	STD	MIN	Q25	Q50	Q75	MAX
JVVDI	75	5561	7624	137	1574	2865	7043	45175
JVWM	75	4591	5647	135	1125	2867	5995	31314
ASTVDI	75	51	23	8	33	53	69	99
QVDIWM	75	88	39	24	62	77	107	242
BAUJ	75	2009	6	1990	2010	2011	2012	2014
NENNG	75	1,5	1,0	0,6	1,0	1,0	1,6	6,0
TRAGF	75	907	459	300	630	900	1000	2500
FOERD	75	32	26	8	15	22	42	176
LA_STBY	75	232	220	11	100	150	320	1310
VDI_REF	75	69	71	5	20	42	97	368
MO	75	14384	18243	383	2954	8068	16517	95073
DI	75	12934	17456	376	3262	6908	13553	99167
MI	75	12299	16926	358	2993	5074	13454	95519
DO	75	12456	16808	351	2959	7099	13837	94324
FR	75	12077	15213	351	3150	5818	15723	87523
SA	75	9250	9658	353	2832	5782	11976	46370
SO	75	10056	14315	353	2782	5137	11995	103647

Tabelle 27: Numerische Zusammenfassung der metrischen Variablen

	NTYP		GTYP		ANTR		REG		STE	
CAT	FREQ (%)									
1	3 (4,0)	Buero	34 (45,3)	geared	24 (32,0)	VVFFOR	1 (1,3)	ja	5 (6,7)	
2	22 (29,3)	Wohnen	41 (54,7)	gearless	51 (68,0)	VVVFMR	14 (18,7)	nein	70 (93,3)	
3	20 (26,7)					VVFFOR	60 (80,0)			
4	27 (36,0)									
5	3 (4,0)									
Σ	75 (100)									

Tabelle 28: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen

Somit steht ein Datensatz mit insgesamt 63 Anlagen zur Verfügung (reduzierter Datensatz). Aus den Tabellen 27 und 28 ergeben sich somit die reduzierten Tabellen 29 und 30. Es sei an dieser Stelle (nochmals) darauf hingewiesen, dass der vorliegende Stichprobenumfang nicht den ursprünglichen Anforderungen hinsichtlich der Anzahl der Anlagen genügt. Sämtliche Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus den im Folgenden beschriebenen Analysen sind nur für diese Stichprobe zulässig. Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit der existierenden Aufzugsanlagen in Deutschland sind nur bedingt möglich. Ermittelte Energiekennwerte bzw. Bandbreiten sind jedoch als Orientierungswerte für frühe Planungsphasen nutzbar.

Die Untersuchungen konzentrieren sich damit auf die Nutzungskategorien 2 bis 4 nach VDI 4707 Blatt 1. Dabei sind Wohngebäude etwas häufiger vertreten als Bürogebäude, wobei ein Großteil der Anlagen mit getriebelosen Antrieben ohne Energierückspeisung ausgestattet ist. Im Sinne der Definitionen nach Abschnitt 4 handelt es sich bis auf wenige Ausnahmen um Neuinstallationen (Baujahre 2010 bis 2014).

	N	MEAN	STD	MIN	Q25	Q50	Q75	MAX
JVVDI	63	4845	4735	1002	1652	2954	7043	23981
JVWM	63	4217	3967	279	1322	3045	5995	16949
ASTVDI	63	51	21	8	34	54	67	94
QVDIWM	63	90	41	24	62	77	116	242
BAUJ	63	2010	5	1995	2010	2011	2012	2014
NENNG	63	1.4	0.8	0.6	1.0	1.0	1.6	4.0
TRAGF	63	933	459	300	630	975	1000	2500
FOERD	63	30	20	8	15	24	42	86
LASTBY	63	240	222	50	100	170	320	1310
VDIREF	63	65	54	11	21	45	97	268
MO	63	13562	13947	854	3798	9107	16517	62339
DI	63	11461	11785	603	3664	7546	13553	53117
MI	63	10834	11087	840	3441	6653	13454	54011
DO	63	11044	11063	628	3567	7853	13837	49090
FR	63	10992	10327	673	3325	7341	15723	44591
SA	63	10120	10148	564	2909	6972	12103	46370
SO	63	11304	15226	654	3323	6074	13187	103647

Tabelle 29: Numerische Zusammenfassung der metrischen Variablen im reduzierten Datensatz

NTYP		GTYP		ANTR		REG	
CAT	FREQ (%)	CAT	FREQ (%)	CAT	FREQ (%)	CAT	FREQ (%)
2	19 (30,2)	Buero	29 (46,0)	geared	19 (30,2)	VVVFMR	11 (17,5)
3	17 (27,0)	Wohnen	34 (54,0)	gearless	44 (69,8)	VVVFOR	52 (82,5)
4	27 (42,9)						
Σ	63 (100,0)	Σ	63 (100,0)	Σ	63 (100,0)	Σ	63 (100,0)

Tabelle 30: Absolute und prozentuale Häufigkeiten möglicher Ausprägungen der kategorialen Variablen im reduzierten Datensatz

Bei den folgenden Analysen wird nun zwischen univariater und multivariater Betrachtung unterschieden – durchweg bezogen auf den reduzierten Datensatz mit 63 Anlagen.

Univariate Betrachtung

Abbildung 9 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der abhängigen metrischen Variablen, d.h. den Jahresenergieverbräuchen nach VDI 4707 Blatt 1 (JVVDI) und auf Basis der Wochenmessungen (JVWM). Zudem dargestellt sind in Abbildung 9 die Häufigkeiten der aufgetretenen Abweichungen dieser beiden Größen voneinander (QVDIWM) und die Häufigkeiten der aufgetretenen Anteile des Standby-Verbrauchs am Jahresenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 (ASTVDI) – jeweils bezogen auf alle Nutzungskategorien, beide Gebäude- und Antriebstypen sowie beide Ausführungen der Regelgeräte der 63 Anlagen im reduzierten Datensatz. Unterhalb der jeweiligen Häufigkeitsverteilungen sind die dazugehörigen Boxplots mit den 25 %- und 75 %-Quartilen sowie dem Median aufgetragen. Ausreißer werden sowohl innerhalb des anderthalbfachen als auch des dreifachen Interquartilsabstandes (range) dargestellt.

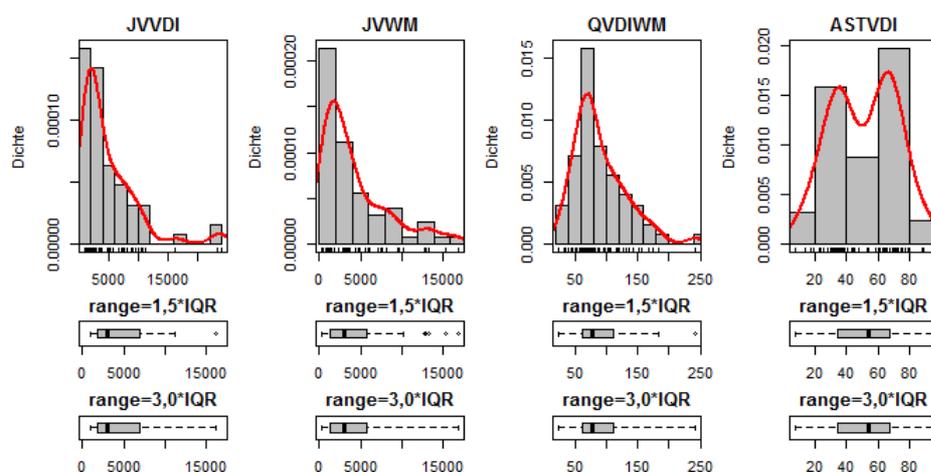


Abbildung 9: Häufigkeiten der abhängigen metrischen Variablen (JVVDI und JVWM in kWh/Jahr, QVDIWM und ASTVDI in %)

Bei beiden Ergebnisvariablen (Jahresenergieverbräuche nach VDI 4707 Blatt 1 und auf Basis der Wochenmessungen) liegt der Median (Q50) jeweils bei ca. 3.000 kWh/Jahr. In beiden Fällen sind innerhalb des dreifachen Interquartilsabstandes ($3,0 \cdot \text{IQR}$) keine Ausreißer zu erkennen. Reduziert man die Bandbreite zur Darstellung von Ausreißern auf den anderthalbfachen Interquartilsabstand ($1,5 \cdot \text{IQR}$), sind bei den Ergebnissen der Wochenmessungen mehr Ausreißer nach oben zu erkennen als bei den Ergebnissen nach VDI 4707 Blatt 1. Die Abweichungen der Wochenmessungen zu den VDI-Ergebnissen verteilen sich jeweils zur Hälfte um einen Wert von 77 % mit größerer Bandbreite nach oben. Der Anteil des Standby-Verbrauchs am Gesamtenergieverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 liefert einen Median von 54 % mit etwas größerer Bandbreite nach unten.

Abbildung 10 zeigt die Verteilungen der unabhängigen Variablen, wie Baujahre (BAUJ), Nenngeschwindigkeiten (NENNG), Tragfähigkeiten (TRAGF) und Förderhöhen (FOERD). Die Darstellung der jeweils dazugehörigen Boxplots erfolgt (wie in Abbildung 9) mit anderthalbfachem und dreifachem Interquartilsabstand zur Darstellung von Ausreißern.

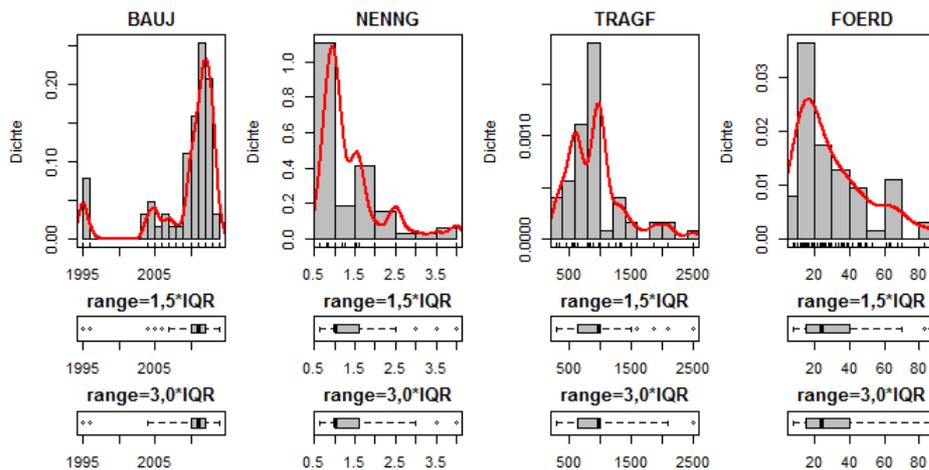


Abbildung 10: Häufigkeiten der unabhängigen metrischen Variablen

Der Median der Baujahre liegt beim Jahr 2011, und ein Großteil der gemessenen Anlagen wurde zwischen 2010 und 2012 installiert (wenige Ausreißer 2005 oder älter). Ein Großteil der gefahrenen Nenngeschwindigkeiten liegt zwischen 1,0 und 1,6 m/s, die Tragfähigkeiten siedeln sich größtenteils zwischen 630 und 1000 kg an, und bei den Förderhöhen sind Anlagen mit 15 bis 42 m vertreten (jeweils mit wenigen Ausreißern).

Die Leistungsaufnahme im Standby (LASTBY) sowie der Energieverbrauch der Referenzfahrt (VDIREF) sind zwei wesentliche Eingangsgrößen für die Berechnung nach VDI 4707 Blatt 1, die sich aus den Messungen ergeben (Abbildung 11).

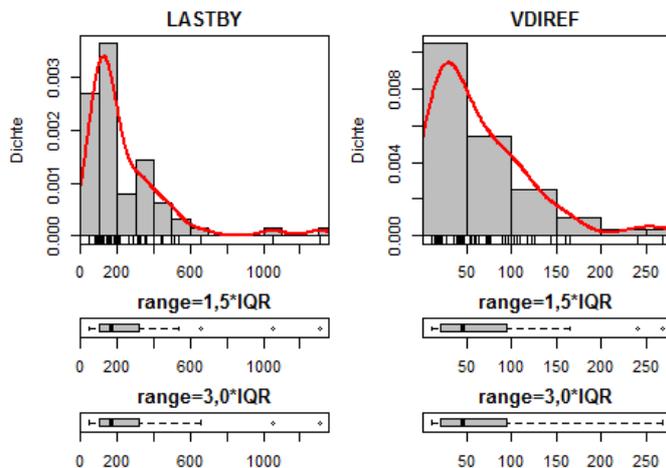


Abbildung 11: Häufigkeiten der Eingangsgrößen zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs nach VDI 4707 Blatt 1 (LASTBY in W, VDIREF in Wh)

Die gemessenen Leistungsaufnahmen im Standby verteilen sich nach Abbildung 11 um einen Median in Höhe von 170 W, und die Energieverbräuche der Referenzfahrten verteilen sich um einen Median in Höhe von 45 Wh. Bei beiden Eingangsgrößen sind wenige, jedoch starke Ausreißer nach oben erkennbar. Auch die Bandbreiten sind jeweils nach oben größer.

Abbildung 12 zeigt die Verteilung der Ergebnisse an den einzelnen Wochentagen (MO bis SO) zur Hochrechnung auf den Jahresenergiebedarf (Eingangsgrößen für die Wochenmessungen).

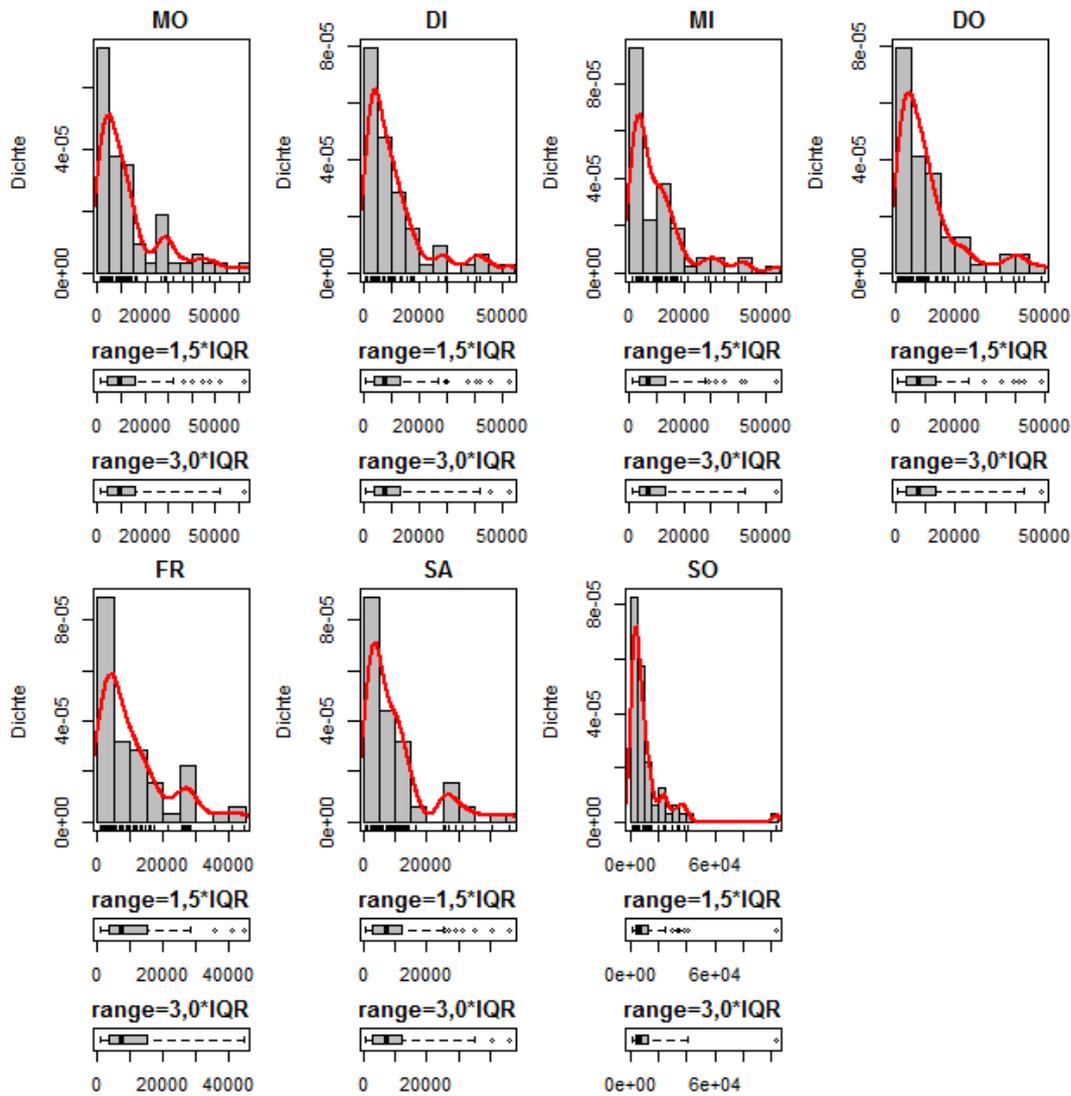


Abbildung 12: Häufigkeiten der Eingangsgrößen zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs auf Basis der Wochenmessungen (pro Wochentag in Wh)

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die Energieverbräuche an den Wochentagen höher ausfallen als am Wochenende. Ein Ausreißer ist bei der Sonntagsmessung einer Anlage festzustellen. Da die restlichen Messungen dennoch plausibel erscheinen, wurde diese Anlage aus der Stichprobe nicht ausgeschlossen, um den geringen Stichprobenumfang nicht noch weiter zu reduzieren.

Abbildung 13 fasst schließlich nochmals die Häufigkeiten der technischen Eigenschaften der Anlagen grafisch zusammen. Die Nutzungskategorien 1 und 5 nach VDI 4707 Blatt 1 sowie die Unterscheidung der Steuerungen nach Standby-Optimierung werden hier aus den bereits genannten Gründen nicht mehr aufgeführt (reduzierter Datensatz, vgl. Zahlen in Tabelle 30).

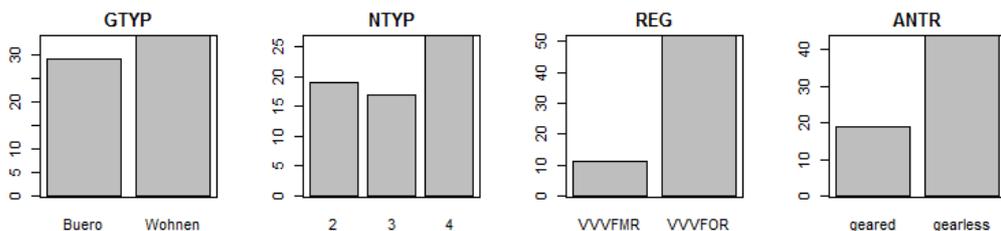


Abbildung 13: Häufigkeiten der kategorialen unabhängigen Variablen

Multivariate Betrachtung

Während die univariate Betrachtung dazu dienen soll, den Datensatz im Überblick zu beschreiben, so ist das Ziel der folgenden multivariaten Betrachtung, Erkenntnisse über mögliche Zusammenhänge zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen zu gewinnen. Oder anders ausgedrückt: Es soll festgestellt werden, welche Einflussgrößen sich auf die ermittelten Jahresenergieverbräuche auswirken. Dazu sei nochmals erwähnt, dass sich der ursprünglich angedachte Detaillierungsgrad (orientiert an der Anlagen-Gebäude-Matrix in Anhang 2) nicht realisieren ließ.

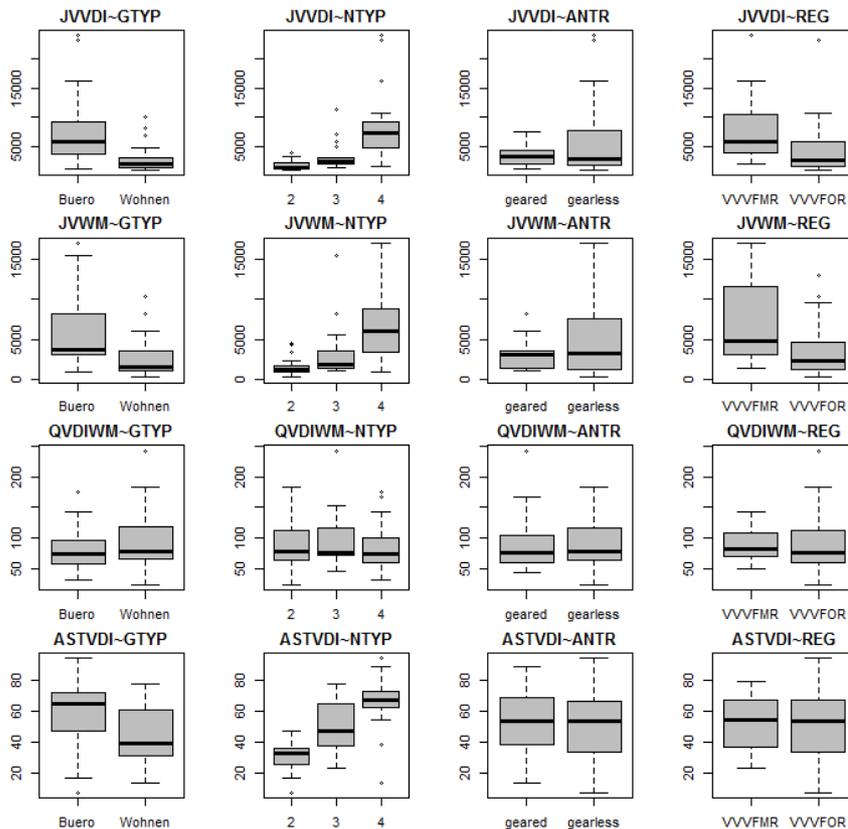


Abbildung 14: Abhängige vs. kategoriale unabhängige Variablen (JVVDI und JWWM in kWh, QVDIWM und ASTVDI in %)

Abbildung 14 trägt die Jahresenergiebedarfskennwerte nach VDI 4707 Blatt 1 (JVVDI) und auf Basis der Wochenmessungen (JWWM) gegen den Gebäudetyp (~GTYP), die Nutzungskategorie (~NTYP), die Antriebsart (~ANTR) sowie die Ausführung des Regelgerätes (~REG) auf - dargestellt jeweils als Boxplots. Gleichmaßen wird dies für die Abweichungen zwischen VDI 4707 Blatt 1 und Wochenmessungen (QVDIWM) sowie für die Anteile der Standby-Verbräuche am Gesamtergebnis nach VDI 4707 Blatt 1 (ASTVDI) gezeigt. Es ist eindeutig feststellbar, dass in dieser Stichprobe sowohl die Energieverbräuche nach VDI 4707 Blatt 1 als auch auf Basis der Wochenmessungen bei Bürogebäuden höher ausfallen. Gleichmaßen steigen die ermittelten Energiekennwerte bei höherer Nutzungskategorie.

Die Abweichungen zwischen JVVDI und JWWM lassen nach Abbildung 14 keinen eindeutigen Zusammenhang zu den unabhängigen Variablen (GTYP, NTYP, ANTR und REG) erkennen.

Erstaunlich ist jedoch nach Abbildung 14 die Beobachtung, dass die Jahresenergieverbräuche nach beiden Verfahren (JVVDI und JWWM) bei getriebelessen Antrieben (gearless) höher ausfallen als bei Getriebeanlagen (geared), ebenso gilt dies in der Stichprobe erstaunlicherweise für Anlagen mit Rückspeisung (VVVFMR), die höhere Werte liefern als Anlagen ohne Rückspeisung (VVVFOR).

Zur näheren Prüfung dieser Beobachtungen zeigt sich mit isolierter Betrachtung der Referenzfahrt nach VDI 4707 Blatt 1 in Abhängigkeit von Antrieb (~ANTR) und Regelung (~REG) dieses Phänomen ebenso in der

Stichprobe (Abbildung 15, Darstellung in Boxplots wie in Abbildung 14). Erwartet hätte man genau das Gegenteil, da beide Technologien (getriebeloser Antrieb und Regelung mit Rückspeisung) zumindest unter stationären Bedingungen niedrigere Verbräuche für das Fahren aufweisen sollten.

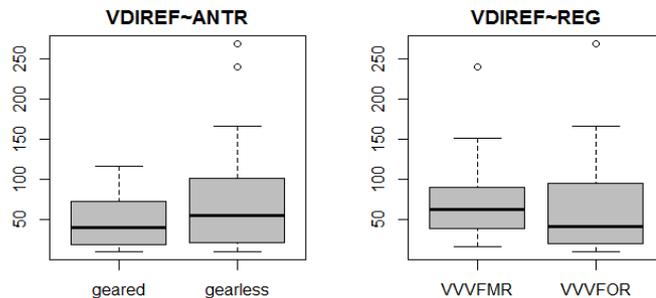


Abbildung 15: Verbrauch der Referenzfahrt nach VDI in Abhängigkeit der Ausführung von Antrieb und Regelung (in Wh)

Ein weiterer Erklärungsversuch, dass sich die absolut höheren Verbräuche bei getriebelosen Antrieben mit Energierückspeisung deshalb ergeben könnten, weil sie überwiegend in Gebäuden mit höheren Nutzungskategorien installiert sind, lässt sich aus der Stichprobe heraus ebenfalls nicht bestätigen. Nach Abbildung 16 sind in allen drei Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1 über 50 % der gemessenen Anlagen mit getriebelosen Antrieben (gearless) ausgestattet. Regelungen mit Energierückspeisung (VVVFMR) sind in Nutzungskategorie 2 erwartungsgemäß nicht vertreten, in den Nutzungskategorien 3 und 4 jedoch auch nur mit ca. 20 bis 30 %.

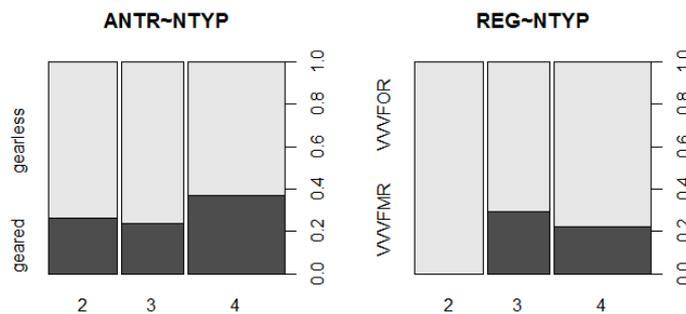


Abbildung 16: Anteile der installierten Ausführungen von Antrieb und Regelung innerhalb der Nutzungskategorien

Auch eine weitere Beobachtung nach Abbildung 14 spricht gegen eine typische Annahme: Der Anteil des Standby-Verbrauchs am Gesamtverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 nimmt bei Bürogebäuden sowie bei Gebäuden mit höherer Nutzungskategorie tendenziell zu (anstatt ab). Einerseits könnte dies damit zusammenhängen, dass bei den höheren Nutzungskategorien innerhalb dieser Stichprobe nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Frequenzregler auffällig höhere Standby-Verbräuche verursachen. (Diese Annahme konnte aufgrund der vorliegenden Daten jedoch nicht geprüft werden.) Dass andererseits gleichzeitig die Kabinenbeleuchtungen innerhalb der Stichprobe bei höheren Nutzungskategorien mit veralteten Leuchtmitteln ausgerüstet sind, wäre denkbar. Angaben zur Kabinenbeleuchtung liegen in der Stichprobe jedoch nicht vor, weshalb dies auch nicht prüfbar ist.

Plausibel erscheint nach Abbildung 14 letztlich die Beobachtung, dass der Anteil des Standby-Verbrauchs (ASTVDI) am Gesamtverbrauch nach VDI 4707 Blatt 1 nicht von der Ausführung des Antriebs (mit oder ohne Getriebe, ~ANTR) sowie dem Vorhandensein einer Energierückspeisung (~REG) beeinflusst wird.

Abbildung 17 zeigt in Boxplot-Darstellung die Zusammenhänge zwischen der Förderhöhe (FOERD), der Tragfähigkeit (TRAGF) sowie der Nenngeschwindigkeit (NENNG) und jeweils dem Gebäudetyp (~GTYP) und der Nutzungskategorie (~NTYP). Bei den Bürogebäuden sind in der Stichprobe erwartungsgemäß die größeren

Förderhöhen, Tragfähigkeiten und höhere Nenngeschwindigkeiten anzutreffen. Ein vergleichbares Bild ergibt sich - ebenso erwartungsgemäß - bei zunehmender Nutzungskategorie.

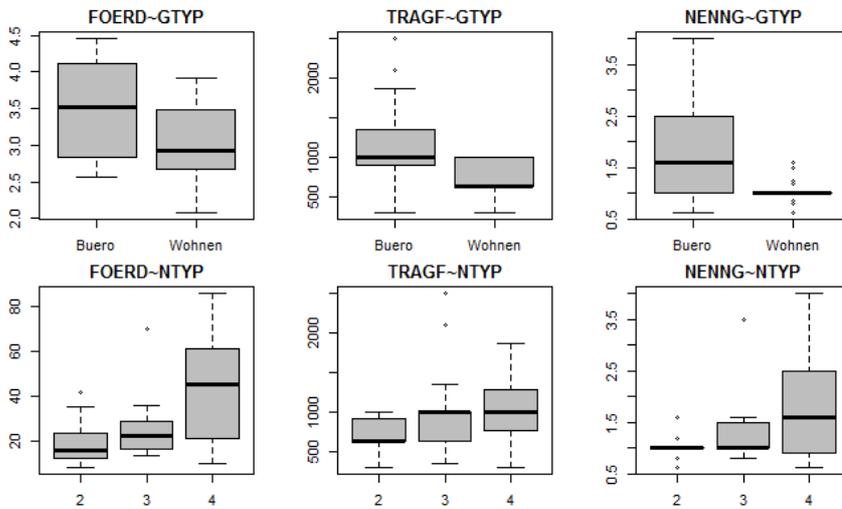


Abbildung 17: Förderhöhen (in m), Tragfähigkeiten (in kg) und Nenngeschwindigkeiten (in m/s) vs. Gebäudetyp und Nutzungskategorie

6.5 Entwicklung des Kennwertedatenblatts

Ein wichtiges Ziel des Forschungsprojektes ist die Erstellung eines praktisch nutzbaren Kennwertedatenblatts für Planer auf Basis der Anlagen-Gebäude-Typologie. Das Kennwertedatenblatt soll somit die Anlagen-Gebäude-Matrix zusammenfassend und vereinfacht wiedergeben und so auch einen „Vor-Ort-Einsatz“ bei Beratungen im Neubau und Bestandsaufnahmen bei Modernisierungen ermöglichen.

Aufgrund der in den vorigen Abschnitten beschriebenen Datenlage und der daraus gewonnenen Erkenntnisse lässt sich die Anlagen-Gebäude-Matrix nicht mit Kennwerten ausstatten, und somit ist auch das Kennwertedatenblatt nicht in dem ursprünglich geplanten Umfang erstellbar.

Mit den Ergebnissen der Auswertungen in Abschnitt 6.4 lassen sich jedoch abschließend Bandbreiten der Energieverbräuche in Abhängigkeit der Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1 zusammenfassen (Tabelle 31). Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs wird diese Auswertung nicht separat für Wohn- und Bürogebäude erstellt. Die Größe der beiden Klassen wäre dann zu klein. Die Zusammenfassung in Tabelle 31 ist jedoch an dieser Stelle vertretbar, da die VDI-Richtlinie innerhalb der Nutzungsklassen nach derzeitigem Stand nicht zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden unterscheidet.

Nutzungskategorie nach VDI 4707 Blatt 1	Jahresverbrauch nach VDI (in kWh/a pro Aufzug)			Jahresverbrauch nach Wochenmessungen (in kWh/a pro Aufzug)		
	von (Q25)	Median	bis (Q75)	von (Q25)	Median	bis (Q75)
gering (2): Wohngebäude mit bis zu 20 Wohnungen, kleine Büro- und Verwaltungsgebäude	1.103	1.265	2.382	885	1.322	1.841
mittel (3): Wohngebäude mit bis zu 50 Wohnungen, mittlere Büro- und Verwaltungsgebäude	1.886	2.370	2.954	1.402	1.902	3.608
stark (4): Wohngeb. mit mehr als 50 Wohnungen, große Büro- und Verwaltungsgebäude	4.745	7.363	9.448	3.354	5.995	9.502

Tabelle 31: Energiekennwerte (kWh je Aufzug pro Jahr) als Bandbreiten in Abhängigkeit der Nutzungskategorie

In Abschnitt 3.1.1 (Tabelle 1) wird zum Vergleich für Aufzüge mit zeitgemäßer Antriebstechnologie (getriebelos mit Frequenzumformer) in kleinen Wohngebäuden (vergleichbar zu Nutzungskategorie 2) ein Jahresverbrauch von 950 kWh, in mittleren bis großen Wohn- und Bürogebäuden ein Jahresverbrauch von 4.350 kWh (vergleichbar zu den Nutzungskategorien 3 und 4) sowie in sehr großen Bürogebäuden (vergleichbar zu Nutzungskategorie 5) ein Jahresenergieverbrauch in Höhe von 17.700 kWh genannt (alle Werte einschl. Standby-Verbrauch). Nutzungskategorie 5 wird in Tabelle 31 aus den bereits genannten Gründen nicht dargestellt. Der Vergleich der restlichen Größenordnungen in Tabelle 31 mit den Ergebnissen des früheren Forschungsprojektes in Tabelle 1 lassen insgesamt auf plausible Größenordnungen schließen.

Zum Vergleich mit flächenbezogenen Energiekennwerten: Ein energieoptimiertes Bürogebäude mit ca. 2.150 m² beheizter Nettogrundfläche (nach DIN 277) benötigt 21 kWh elektrische Energie pro m² Nettogrundfläche pro Jahr für Kühlung, Lüftung und fest eingebaute Beleuchtung.³¹ Im Gebäude ist ein Personenaufzug vorhanden, dessen genaue technische Daten nicht bekannt sind. Nimmt man nach Tabelle 31 die Nutzungskategorie 3 an, so wären nach VDI 4707 Blatt 1 ca. 2.370 kWh pro Jahr und nach den Wochenmessungen ca. 1.902 kWh pro Jahr für den Betrieb des Aufzugs anzunehmen. Dies entspricht Energiekennwerten in Höhe von 1,1 bzw. 0,9 kWh pro m² NGF pro Jahr. Der elektrische Energiebedarf für den Betrieb des Aufzugs läge somit zwischen 5,2 und 4,3 % des jährlichen elektrischen Gesamtenergiebedarfs. Wie an anderer Stelle schon erwähnt, soll diese Rechnung reinen Vergleichszwecken dienen. Die umgekehrte Hochrechnung eines nach dieser Methode ermittelten flächenbezogenen Energiekennwertes zur Anwendung auf ein anderes Gebäude für Planungszwecke ist nicht sinnvoll.

6.6 Alternative zum Kennwertedatenblatt: die vereinfachte Berechnung

Da aus den beschriebenen Umständen heraus, das Kennwertedatenblatt nicht im geplanten Umfang erstellt werden konnte, soll in diesem Abschnitt ergänzend auf eine vereinfachte Berechnungsmöglichkeit des Energiebedarfs hingewiesen werden. Diese ergibt sich durch geeignetes Umformen der Rechenvorschriften in der Richtlinie VDI 4707 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 3.2.1). Diese nennt Gleichungen für die tägliche Fahrzeit t_{Fahren} , die tägliche zurückgelegte Fahrstrecke s_{nenn} und den täglichen Energiebedarf für das Fahren E_{Fahren} (Gleichungen 13 bis 15).

³¹ vgl. <http://www.enob.info/de/neubau/projekt/details/buerogebäude-bob-balanced-office-building/> (zuletzt geprüft am 21.05.2015)

$$t_{Fahren} = \frac{0,5 \times F_H \times A_F}{v} \quad (13)$$

Die tägliche Fahrzeit (Gleichung 13) ergibt sich damit aus der durchschnittlichen Förderhöhe, der Anzahl der Fahrten pro Tag A_F und der Nenngeschwindigkeit v .

$$s_{nenn} = t_{Fahren} \times v = 0,5 \times F_H \times A_F \quad (14)$$

Aus der täglichen Fahrstrecke s_{nenn} , dem spezifischen Fahrtbedarf $E_{Fahren, spez}$ und der Nennlast Q ergibt sich nach Gleichung 15 der Energiebedarf für das Fahren pro Tag E_{Fahren} .

$$E_{Fahren} = E_{Fahren, spez} \times s_{nenn} \times Q \quad (15)$$

Mit dem spezifischen Fahrtbedarf $E_{Fahren, spez}$, der sich u.a. aus dem Energiebedarf der Referenzfahrt E_{Ref} nach VDI 4707 Blatt 1 ergibt, lässt sich der tägliche Energiebedarf für das Fahren E_{Fahren} (für einen Aufzug) nach Gleichung 16 ermitteln.

$$E_{Fahren} = 0,7 \times E_{Ref} \times \frac{1}{4} A_F \quad (16)$$

Gleichung 16 enthält somit einen anlagenspezifischen Teil, der sich aus der Referenzfahrt der zu betrachteten Anlage ergibt, sowie einen gebäudespezifischen Teil in Form der Anzahl der Fahrten pro Tag. (0,7 ist der anzunehmende Lastfaktor bei Treibscheibenaufzügen mit Halblastausgleich.)

Die Anzahl der Fahrten kann beispielsweise nach DIN EN ISO 25745-2 ermittelt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4).

Der tägliche Energiebedarf für Standby ergibt sich auch Gleichung 17 mit einer täglichen angenommenen Stillstandszeit.

$$E_{Standby} = L_{Standby} \times t_{Standby} \quad (17)$$

Die tägliche angenommene Stillstandszeit kann beispielsweise der Tabelle in der VDI Richtlinie 4707 Blatt 1 (vgl. Abschnitt 3.2.1) entnommen werden.

Somit ergibt sich mit der Anzahl der Betriebstage d_{Jahr} pro Jahr der jährliche Energiebedarf in kWh³²:

$$E_{Jahr} = (E_{Fahren} \times E_{Standby}) \times d_{Jahr} / 1.000 \quad (18)$$

Zur Anwendung dieses Rechenverfahrens sind folgende Randbedingungen und Einschränkungen zu berücksichtigen:

- durchschnittlich halbe Auslastung der Kabine,
- durchschnittlicher Fahrweg einer Fahrt entspricht der halben Förderhöhe,
- Anzahl der Aufwärts- und Abwärtsfahrten gleichen sich aus,
- keine Berücksichtigung unterschiedlicher Stillstandsmodi.

Werden die genannten Annahmen und Einschränkungen berücksichtigt, so ist es möglich, den Jahresenergiebedarf in einer frühen Planungsphase abzuschätzen. Neben den oben genannten Quellen für die Anzahl der Fahrten pro Tag und der täglichen Stillstandszeit ist der Energiebedarf der Referenzfahrt für eine vergleichbare Anlage zu ermitteln. Dieser kann vom Hersteller bzw. Lieferanten des Aufzugs übermittelt oder auf Basis einer Messung bei einer vergleichbaren Anlage angegeben werden. Entscheidend hierfür ist jedoch, dass ins-

³² Anpassung mit Teilung durch 1.000, da in den Gleichungen 15 bis 17 mit Wh gerechnet wird.

besondere die Technologie (Antriebsart, Regelung, Steuerung) und die Förderhöhe mit jenen der zu planenden Anlage übereinstimmen. Die Anzahl der Fahrten pro Tag und die durchschnittliche Stillstandszeit pro Tag können alternativ zu den oben genannten Tabellen auch aus anderen nachvollziehbaren Quellen stammen (z.B. durch Messungen, Beobachtungen und Zählungen in vergleichbaren Gebäuden).

Die Anwendung der Formel sei an einem kurzen Beispiel erläutert:

Für einen geplanten Personenaufzug in einem gemischt genutzten Gebäude mit Wohnungen und Arztpraxen (Nennlast 630 kg, Nenngeschwindigkeit 1,0 m/s, 5 Haltestellen bei einer Förderhöhe von 12 m) werden vom Architekten 300 Fahrten pro Tag angenommen. Aus diesen Angaben lässt sich eine tägliche Fahrtzeit von 0,5 Stunden (und damit eine tägliche Stillstandszeit von 23,5 Stunden) abschätzen.³³ Das Szenario fällt somit in die Nutzungskategorie 2 (nach VDI 4707 Blatt 1).

Nach den Angaben des Herstellers wurde bei einer baugleichen Anlage ein Energiebedarf in Höhe von 20 Wh für die Referenzfahrt nach VDI 4707 Blatt 1 gemessen (Vorgehensweise siehe Abschnitt 3.2.1). Somit ergibt sich nach Gleichung 16 der tägliche Energiebedarf für das Fahren:

$$E_{Fahren} = 0,7 \times 20 \times \frac{1}{4} \times 300 = 1.050 \text{ Wh/Tag}$$

Der Hersteller des Aufzugs gibt für die geplante Anlage eine Leistungsaufnahme im Stillstand von 90 W an. Daraus ergibt sich nach Gleichung 17 mit der täglichen Stillstandszeit von oben der tägliche Energiebedarf für den Stillstand:

$$E_{Standby} = 23,5 \times 90 = 2.115 \text{ Wh/Tag}$$

Bei angenommenen 365 Betriebstagen pro Jahr ergibt sich nach Gleichung 18 der geschätzte jährliche Energiebedarf für den geplanten Aufzug in kWh (Ergebnis gerundet):

$$E_{Jahr} = (1.050 + 2.115) \times \frac{365}{1000} = 1.155 \text{ kWh/Jahr}$$

Zum Vergleich mit Tabelle 31: Das Ergebnis des Rechenbeispiels mit plausiblen Eingangsgrößen liegt innerhalb der Bandbreiten für Nutzungskategorie 2.

³³ nach Gleichung 13

7. Fazit und Ausblick

Das Projekt verfolgte drei wesentliche Ziele:

- die Recherche und Aufbereitung von methodischen Grundlagen und Verfahren zur Ermittlung des Energiebedarfs bzw. -verbrauchs von Personenaufzügen,
- die Entwicklung einer Anlagen- und Gebäudetypologie zur Beschreibung des Bestandes, orientiert an Technologien und Gebäudetypen in Deutschland,
- die Angabe von konkreten Energiekennwerten bzw. Korridoren für Energiekennwerte zu sämtlichen Typvertretern mit anschließender Aufbereitung zu einem Kennwertedatenblatt.

Die ersten beiden Ziele wurden vollständig erreicht und liefern eine solide Ausgangsbasis für zukünftige Forschungsvorhaben. Insbesondere die Anlagentypologie stellt eine kompakte Zusammenfassung der technologischen Entwicklung in der Aufzugsbranche von den 1960er-Jahren bis heute dar (bezogen auf den deutschen Markt).

Die Möglichkeit zur Angabe von konkreten Energiekennwerten setzte jedoch unabdingbar voraus, die geplanten Messdaten in vollständigem Umfang zu erhalten. Auf Basis der tatsächlich gelieferten Daten sind nur vereinfachte Ergebnisdarstellungen und deskriptive Beschreibungen möglich. Dennoch ist es trotz der schwierigen Datenlage gelungen, für verschiedene Nutzungskategorien nach VDI 4707 Blatt 1 Bandbreiten (Korridore) für Jahresenergieverbräuche anzugeben (siehe Tabelle 31 in Abschnitt 6.6). Diese liefern praktisch nutzbare Anhaltspunkte für Planer in frühen Planungsphasen. Ergänzend wurde in Abschnitt 6.7 eine einfach handhabbare Formel hergeleitet, um überschlägige Abschätzungen durchführen zu können. Auf die dabei zu beachtenden Annahmen und Einschränkungen wurde hingewiesen.

Es wird empfohlen, die Messkampagne in einem zukünftigen Forschungsvorhaben zu wiederholen. Dabei wäre es u.U. sinnvoll, sich zunächst erneut auf Bürogebäude und Mehrfamilienhäuser zu beschränken, d.h. die ursprünglich angedachten Sondernutzungstypen, wie z.B. Krankenhäuser, Flughäfen und Hotels weiterhin nicht zu berücksichtigen. Durch diese frühzeitige Einschränkung bei der Planung der Stichprobe sollten die notwendigen personellen und finanziellen Ressourcen rechtzeitig realistisch gebündelt werden, so dass bei Bürogebäuden und Mehrfamilienhäusern innerhalb der auftretenden Technologie- und Gebäudeklassen deutlich größere Stichprobenumfänge entstehen. Neben der rein deskriptiven Betrachtung wäre dann die Anwendbarkeit geeigneter Verfahren zur Regressionsanalyse prüfbar, um auf fehlende Messwerte schließen zu können.

Mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts kann die Entwicklung vorangetrieben werden, Personenaufzüge in Mehrfamilienhäusern und Bürogebäuden bereits in frühen Planungsphasen energetisch einschätzbar zu machen und somit eine gesamtenergetische Planung von Gebäuden zu unterstützen. Der Planer muss damit zunächst keine eigenen Berechnungen bzw. nur stark vereinfachte Berechnungen durchführen.

Eine nutzungs- und technologiebezogene Differenzierung der Energieverbräuche von Aufzugsanlagen während der Nutzungsphase wird den Informationsgehalt der eingangs beschriebenen lebenszyklusorientierten Beschreibungsmethoden, wie LCA und LCC sowie EPDs, weiter verbessern.

Im Rahmen eines zukünftigen Forschungsvorhabens könnte man in erneuter Kooperation mit einem Praxispartner (Aufzugsindustrie, Wartungsdienstleister, Bestandhalter) mit der Durchführung einer neuen Messkampagne diesen Zielen einen großen Schritt näher rücken. Eine methodische Basis mit ersten Ergebnissen liefert der vorliegende Abschlussbericht.

Anhang 1: Wohngebäudetypologie / Förderbedarf

Gebäudetyp		Baualtersklasse						
		1949-1957	1958-1968	1969-1978	1979-1983	1984-1994	1995-2001	nach 2002
MFH	Förderhöhe	11,35	14,09	13,69	11,65	11,53	14,49	10,9
	Anzahl der Fahrten pro Tag	43	187	47	43	48	71	91
	Fahrtzeit pro Tag [h]	0,08	0,46	0,11	0,09	0,10	0,18	0,17
	Nenngeschwindigkeit [m/s]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Anzahl der Aufzüge	1	1	1	1	1	1	1
	Geschoßfaktor	0,59366264	0,73032612	0,73032612	0,59366264	0,59366264	0,73032612	0,59366264
	mittlere lichte Raumhöhe	2,65	2,61	2,51	2,75	2,71	2,71	2,5
	Anzahl Vollgeschosse	3	4	4	3	3	4	3
	Anzahl Wohneinheiten	9	32	8	9	10	12	19
Anzahl der Bewohner	18	64	16	18	20	24	38	
GMH	Förderhöhe	17,65	24,65	25,05				
	Anzahl der Fahrten pro Tag	128	341	341				
	Fahrtzeit pro Tag [h]	0,39	1,18	1,18				
	Nenngeschwindigkeit [m/s]	0,8	1,0	1,0				
	Anzahl der Aufzüge	1	1	1				
	Geschoßfaktor	0,79914759	0,8867596	0,8867596				
	mittlere lichte Raumhöhe	2,75	2,5	2,55				
	Anzahl Vollgeschosse	5	8	8				
	Anzahl Wohneinheiten	20	48	48				
Anzahl der Bewohner	40	96	96					
HH	Förderhöhe		46,65	47,45				
	Anzahl der Fahrten pro Tag		1434	1926				
	Fahrtzeit pro Tag [h]		5,98	8,03				
	Nenngeschwindigkeit [m/s]		1,6	1,6				
	Anzahl der Aufzüge		2	2				
	Geschoßfaktor		0,94780877	0,94780877				
	mittlere lichte Raumhöhe		2,5	2,55				
	Anzahl Vollgeschosse		16	16				
	Anzahl Wohneinheiten		189	254				
Anzahl der Bewohner		378	508					
HH NBL	Förderhöhe			31,15	49,05			
	Anzahl der Fahrten pro Tag			292	486			
	Fahrtzeit pro Tag [h]			1,22	2,07			
	Nenngeschwindigkeit [m/s]			1,0	1,6			
	Anzahl der Aufzüge			1	2			
	Geschoßfaktor			0,91235563	0,94780877			
	mittlere lichte Raumhöhe			2,6	2,65			
	Anzahl Vollgeschosse			10	16			
	Anzahl Wohneinheiten			40	64			
Anzahl der Bewohner			80	128				

Anhang 3: Leitfaden für Messkampagne

Teil 1: Arbeitsanweisung / Checkliste für Servicepersonal

Anlage - Nr.:

Adresse:

Datum Geräteanschluss:

Durchgeführt durch:

Tel./E-Mail:

Bitte Checkliste ausfüllen

Anlagenzutritt:

Bei Auffälligkeiten in dem Gebäude während der Messwoche, wie z.B. Versammlungen oder Tagungen, diese bitte vermerken. Informationen dazu können auch bei der Anmeldung eingeholt werden.

Liegt eine unübliche Gebäudenutzung vor? Ja Nein

Art, Dauer der Veranstaltung:

Angaben Aufzugsanlage:

Fahrtenanzahl (bei Geräteanschluss):

Betriebsstunden (bei Geräteanschluss):

Motortyp:

Motor Nennstrom IN [A]:

Motor Nennleistung PN [kW]:

Gegengewichtsausgleich [%]:

Mittlere lichte Raumhöhe der Stockwerke:

Arbeitssicherheit beachten!

5 – Sicherheitsregeln der Elektrotechnik beachten! (Siehe Bedienungsanweisung)

Anschluss der Messtechnik: Fluke435II

Verwendete Stromzangen: i1000s (0,1A-100A) i430tf (0,5A-600A)

Bei den i1000s Zangen auf die Schalterstellung achten!

Sollte der Anlaufstrom über 100A sein, sind die i430tf Messzangen zu verwenden.

Verwendete Messzangen im Fluke entsprechend abspeichern

Messgerät anschließen

Für die Stromversorgung der Messtechnik wenn möglich externe Steckdose mit Verlängerungskabel verwenden

Über Fluke435II-Anzeige die Messwerte auf Plausibilität prüfen

Sichere Befestigung der Spannungsabnehmer überprüfen

Aufzugsbewegung bei Anlagen mit CAN-Bus

CAN Watch je nach Anlage an Gruppen- oder Schachtbus (Einzelanlage) anschließen

CAN-Watch am Beginn/Ende einer Gruppe anschließen und Jumper an der Gruppenbus-Karte entfernen. (CAN Watch hat einen Abschlusswiderstand).

Funktionskontrolle des CAN-Watch durch blinkendes grünes Prüflicht! Power Licht leuchtet durchgehend.

Aufzugsbewegung bei Anlagen ohne CAN-Bus

Bei Anlagen ohne CAN-Bus wird die MP – Karte an dem Fahrschütz angeschlossen und über den Schachtbus Anschluss des CAN-Watch mit diesem verbunden.

1.Messung nach VDI 4707

Aufzeichnungsmenü Aufrufen durch Taste **Logger**

- Messintervall auf kleinsten Wert stellen (0,25s) **Interval :** ◀ 0.25s ▶
 - Die zu ermittelnden Messparameter bitte kurz mit der Bedienungsanleitung abprüfen.
- Dazu: Taste Logger > Setup readings > Cursor links Selected

Messung starten durch Taste **Start**

Ablauf der VDI4707 Messung (leerer Fahrkorb):

- 1) Beginn der Referenzfahrt bei geöffneter Aufzugstür
- 2) Schließen der Aufzugstür
- 3) Fahrt nach oben oder unten über die volle Entfernung
- 4) Öffnen und Schließen der Aufzugstür
- 5) Fahrt nach oben oder unten über die volle Entfernung
- 6) Tür öffnen
- 7) Ende der Referenzfahrt

- Messwerte auf Plausibilität über die Anzeige prüfen. Speicherung der Messwerte nach Beendigung der VDI Messung.

Energiesparende Anlagen: Gesonderte Standbymessung (bspw. EvoBlue oder E.COR Anlagen)

- Gesonderte Aufnahme des Bereitschafts- und Stillstandsbedarfs mit den i5s Stromzangen durchgeführt (nach Beendigung einer Aufzugsfahrt Stromversorgende Phase messen, bis der Aufzug in den Standbymodus schaltet; bitte Speicherstand im Messgerät mit dem Kürzel i5s versehen)

2.Langzeitmessung:

Taste Logger drücken

- Intervall auf 0,5s stellen **Interval :** ◀ 0.5 s ▶
- Messdauer 30 Tage (Duration) **Duration:** 30 d
- Die zu ermittelnden Messparameter sind als Standard festgelegt (Bitte gemäß Bedienungsanleitung prüfen!). Die Messung startet über die Taste F5 „Start“.
- Messwerte auf Plausibilität über die Anzeige prüfen
- Sicherung des Fluke435II mit Kensington Schloss gegen Diebstahl
- Nach Anschluss der Messgeräte kurze Sichtkontrolle und Messstelle absichern
- Bei dem Messgerät Warnhinweis über Messung hinterlassen
- Kurze Funktionskontrolle der Aufzugsanlage, insbesondere die Gruppenaktivität
- Am Gebäude abmelden

Checkliste für die Beendigung der Messung

Datum Geräteabschluss:

- Bitte Checkliste ausfüllen**

Beendigung der Messung:

- Bei betreten kurze Sichtkontrolle ob Messtechnik so vorgefunden wurde, wie bei der Installation zurückgelassen wurde.
- Bei dem Fluke435II die Messaufzeichnung stoppen durch die Taste F5 „Hold“ und anschließendem drücken der Taste F4 „Speich.“

Angaben Aufzugsanlage:

Fahrtenanzahl (bei Geräteabschluss):

Betriebsstunden (bei Geräteabschluss):

Abschluss CAN Watch

CAN Watch von Gruppen- oder Schachtbus sowie von der Stromversorgung trennen

- Möglicherweise entfernter Jumper wieder anbringen
- Nach Abschluss der Messgeräte Sicht- und Funktionskontrolle der Anlage
- Vor Verlassen des Gebäudes abmelden

Messdaten und Datenübermittlung

SD Karte vom Fluke Gerät entnehmen und zweite/leere SD-Karte einsetzen um die Messtechnik an der nächster Anlage anschließen zu können.

Ordner „FLUKE“ von der SD-Karte herunterladen

Ordner „canwatch“ von dem CAN-Watch herunterladen

Die Ordner mit den Messwerten und die ausgefüllte Messanweisung auf dem TK Laufwerk H\Temp24h ablegen (Ordnername: Energiekennzahlen\Niederlassung und Anlagenummer). Bitte Projektbetreuer informieren, wenn die Messdaten und die ausgefüllte Checkliste auf dem Laufwerk abgelegt wurden.

Wenn die Daten übermittelt wurden, SD-Karte über das Fluke435II für die nächste Messung formatieren.

Teil 2: Bedienungsanweisung Fluke 435 II



Fluke 435II - Analysator für Netz- und Stromversorgung



i1000s



i430tf



i5s

Arbeitssicherheit

Die Adaptierung kann eine Elektrofachkraft unter strikter Beachtung der 5 Sicherheitsregeln der Elektrotechnik vornehmen.

Das bedeutet, anbringen und entfernen der Messadapter (Spannungs-Prüfspitzen und Strom-Messzangen) ausschließlich im spannungsfreien Zustand. Bei der Messung unter Spannung sind diese nicht zu berühren!

Die 5 Sicherheitsregeln der Elektrotechnik nach DIN VDE 0105 lauten:

1. Freischalten
2. Gegen Wiedereinschalten sichern
3. Spannungsfreiheit feststellen
4. Erden und kurzschließen
5. Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschränken

Bitte beachten Sie im Sinne der Arbeitssicherheit folgende Dokumente:

- Montageanweisung MA0 (Arbeits- und Gesundheitsschutz bei Montage, Modernisierung, Wartung, Reparatur und Störungsbehebung bei Aufzügen und Fahrtreppen)
- BGV A3 (Unfallverhütungsvorschrift Elektrische Anlagen und Betriebsmittel)
- BG-Information Montage, Demontage und Instandhaltung von Aufzugsanlagen

Die Dokumente wurden Ihnen mit dieser Bedienungsanweisung ausgehändigt.

Einstellen der Messzangen

>Fluke-Taste: „Setup“ (Bild 1 erscheint)

>F4: „Manual Setup“

> Cursor nach unten bis „Clamps“ markiert sind (Bild 2)

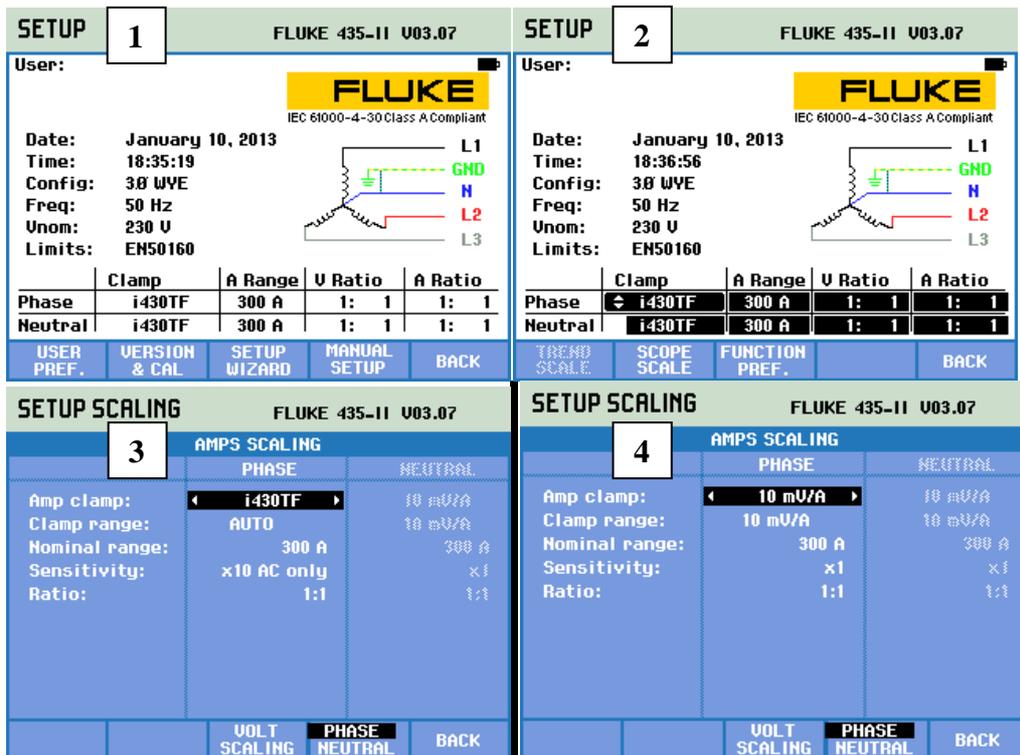
> Taste „Enter“ (Bild 3 erscheint)

> „Amp clamp“ ausgewählt

> mit Cursor navigieren bis der Name der einzustellenden Zange ausgewählt ist (Bild 4).

Alle drei verwendeten Messzangen sind mit der Zangenbezeichnung in der Kategorie „Amp-clamp“ hinterlegt.

Messzange	Einsatzbereich	Besonderheiten
i430tf	0,5 – 300A	Achten Sie bei dieser Zange, dass bei „Sensitivity“: x10 AC only erscheint
i1000s	0,1 – 100A	Der Messbereich muss an der Messzange (Schalter auf 10mV/A) und innerhalb der „Clamp range“ eingestellt werden (ebenso 10 mV/A)
i5s	0,01 – 5A	Diese Zange am Messgerät immer an L1 anschließen; Zweite Messzange an N; für die Standbymessung an Energiesparenden Anlagen



Ebenso muss die Zange als Neutralleiter eingestellt werden.

Taste F4 „Neutral“

> „Amp clamp“ ausgewählt

> mit Cursor navigieren bis der Name der Messzange erscheint

Zum Abschließen der Zangen Auswahl am Gerät Taste F5 „Back“ drücken.

Messgerät anschließen

Schematischer Anschluss:

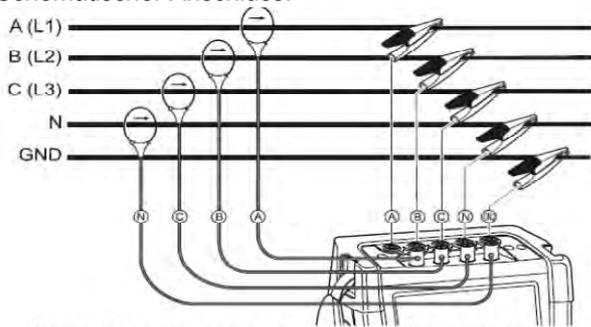


Abbildung 6-2. Anschluss des Analysators an dreiphasige Stromverteilungssysteme

Vier BNC-Eingänge für Stromzangen: L1, L2, L3, N anschließen. Pfeilrichtung beachten!



5 Bananensteckerbuchsen für Spannung: L1, L2, L3, N, GND anschließen. Zugehörigkeit beachten!

Magnetklemmen:



Alternativ Krokodilklemmen:



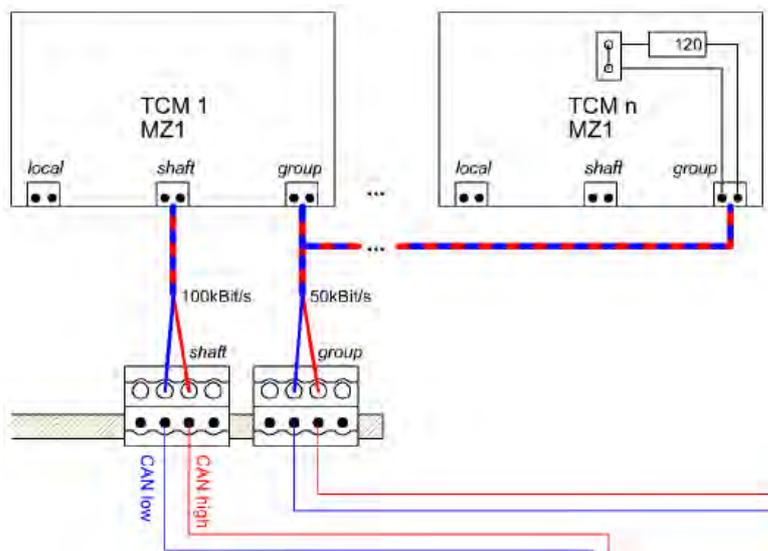
- Für die Spannung Magnetklemmen sicher anbringen und mit Isolierband zusätzlich fixieren oder zur sicheren Spannungsabnahme Krokodilklemmen verwenden.
- Über Fluke435II Anzeige Messwerte auf Plausibilität prüfen
- Sicherung des Fluke435II mit Kensington Schloss



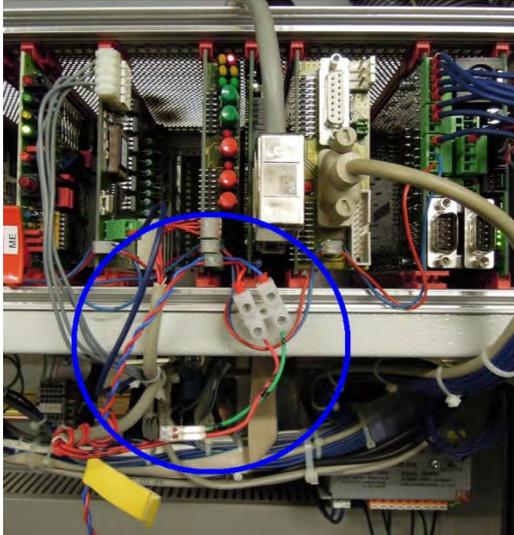
Gesonderte Standbymessung bei Energiesparenden Anlagen (Bspw. EvoBlue, E.COR)

- Gesonderte Aufnahme des Bereitschafts- und Stillstandsbedarfs mit den i5s Stromzangen (nach Beendigung einer Aufzugsfahrt stromversorgende Phase messen, bis der Aufzug in den Standbymodus schaltet; Phase L1 und Neutralleiter am Messgerät einstellen)

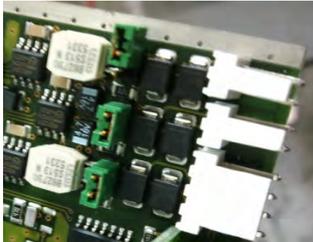
Anlagenbewegungsaufzeichnung bei Anlagen mit CAN-Bus über den CAN-Watch (TCM-Steuerung)



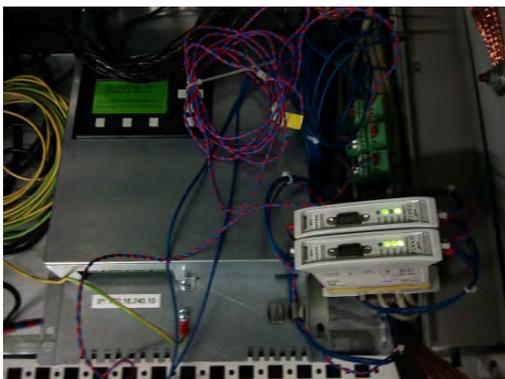
- CAN Watch je nach Anlage an Gruppen- oder Schachtbus (Einzelanlage) anschließen und jeweiligen Anschlussstecker verwenden.



- Bei CAN - Anschluss am Beginn/Ende einer Gruppe Jumper entfernen (CAN Watch hat einen Abschlusswiderstand).



Funktionskontrolle des Geräts durch mittleres grünes Prüflicht (Aufzeichnung). Power Licht leuchtet durchgehend.

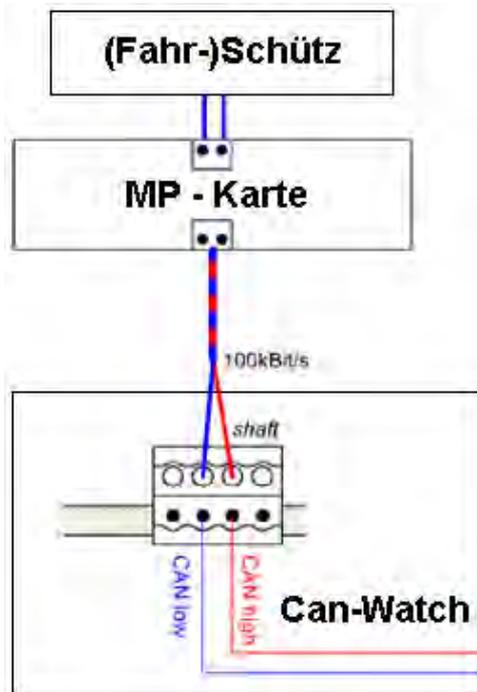


Für die Stromversorgung der Messtechnik wenn möglich eine externe Steckdose über das Verlängerungskabel verwenden.



Anlagenbewegungsaufzeichnung bei Anlagen ohne CAN-Bus über die MP – Karte

Bei Aufzugsanlagen ohne CAN – Bus wird die Bewegungsaufzeichnung mit der MP-Karte durchgeführt. Die MP – Karte wird an dem Fahrschutz angeschlossen und die Signale werden über den Schachtbus Anschluss des CAN-Watch mit diesem verbunden.



Zu ermittelnde Parameter – VDI 4707 und Langzeitmessung

Taste „Logger“

> Taste F1 Setup Readings

> Cursor recht „Selected“

> mit Cursor nach unten können alle erfassten Werte eingesehen werden.

Die aufzuzeichnenden Parameter sind in der Spalte „Selected“ zu sehen und können über die Spalten „Category“ und „Reading“ ausgewählt werden.

Die Messparameter sind nach einmaligem einstellen als Standard gespeichert, sollten aber vor den Messungen auf Vollständigkeit überprüft werden.

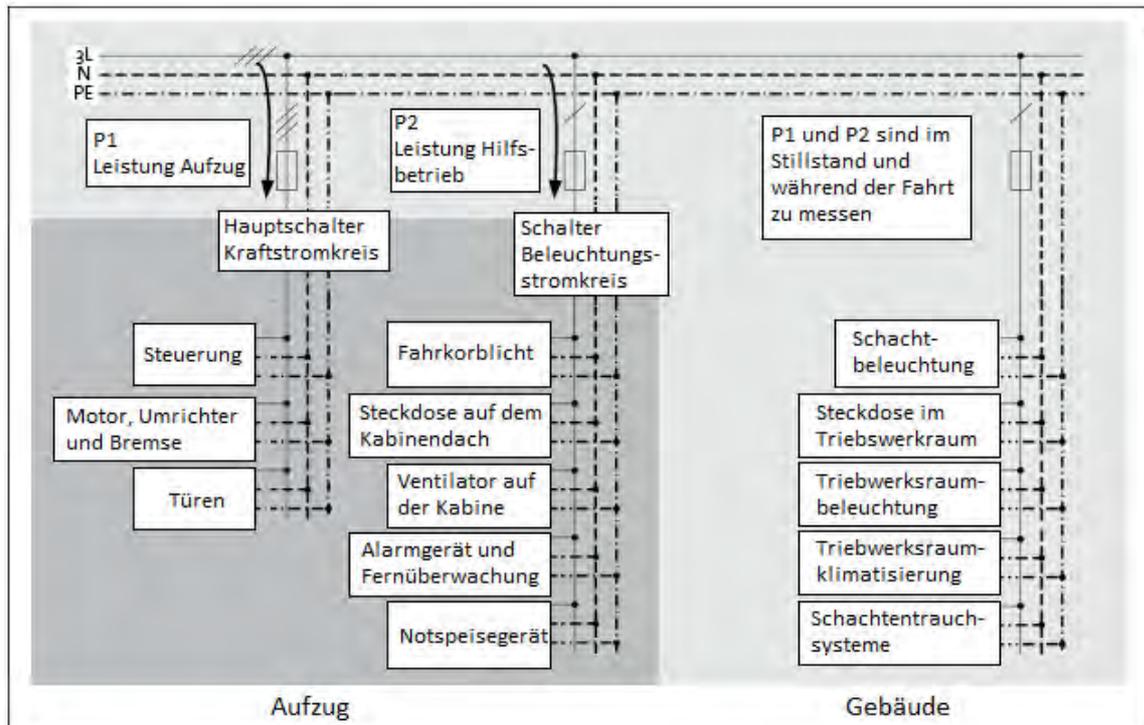
The image displays four screenshots of a device's configuration interface. The top-left screenshot, titled 'LANGZEITAUFEICHNUNG', shows recording parameters: Memory (8GB, 99% free), Save as (MEASUREMENT 70), Interval (0.25s), Duration (30 d), and recording mode (Immediate/Timed). The other three screenshots show the 'CHANGE SELECTIONS' menu, which allows users to select parameters for recording. The menu is organized into three columns: Category, Reading, and Selected. The 'Selected' column lists the currently chosen parameters, such as 'UrmsA', 'UrmsΔ', 'A-rms', 'Hz', 'unbal(%)', 'Wfund', 'Volt THD', 'Watt THD', and 'Amp THD' in the first screenshot; 'Amp THD', 'W', 'Wh', 'UA', 'VAh', 'A-pk', 'Whrev', 'Whforw', 'varh', 'PF', and 'PFΣ' in the second; and 'Wh', 'VAh', 'UA', 'VAh', 'A-pk', 'Whrev', 'Whforw', 'varh', 'PF', and 'PFΣ' in the third.

Aufzunehmende Parameter sind:

V-rms (Stern, Dreieck)	W	VAh	A-pk	cos ϕ
A-rms	Wh	VAR	Whrev	THD A
Hz	VA	VARh	Whforw	THD W

VDI 4707 Referenzfahrt Messung

Die VDI 4707 Messung muss den Gesamtenergiebedarf inklusive Nebenverbraucher umfassen, nicht aber die gebäudeseitigen Verbraucher. (Anschluss der Stromzangen an den Hauptschalter Kraftstromkreis – siehe nachfolgendes Bild).



Taste: Logger > mit Cursor Taste Intervall **0,25s** auswählen
> Taste F5 Start drücken, um zu starten. (Bild 5)



Ablauf der VDI 4707 Referenzfahrt Messung (leerer Fahrkorb)

- 1) Beginn der Referenzfahrt bei geöffneter Aufzugstür
- 2) Schließen der Aufzugstür
- 3) Fahrt nach oben oder unten über die volle Entfernung
- 4) Öffnen und Schließen der Aufzugstür
- 5) Fahrt nach oben oder unten über die volle Entfernung
- 6) Tür öffnen
- 7) Ende der Referenzfahrt

Bei energiesparenden Anlagen (z.B. E.COR, EvoBlue) ist die Standbyleistung mit den i5s (0,01-5A) Messzan-

gen zu messen (L1 und Neutralleiter). Die i5s Zange am Fluke435II immer auf L1 einstecken, auch wenn die Anlage im Standby über L2 oder L3 versorgt wird.

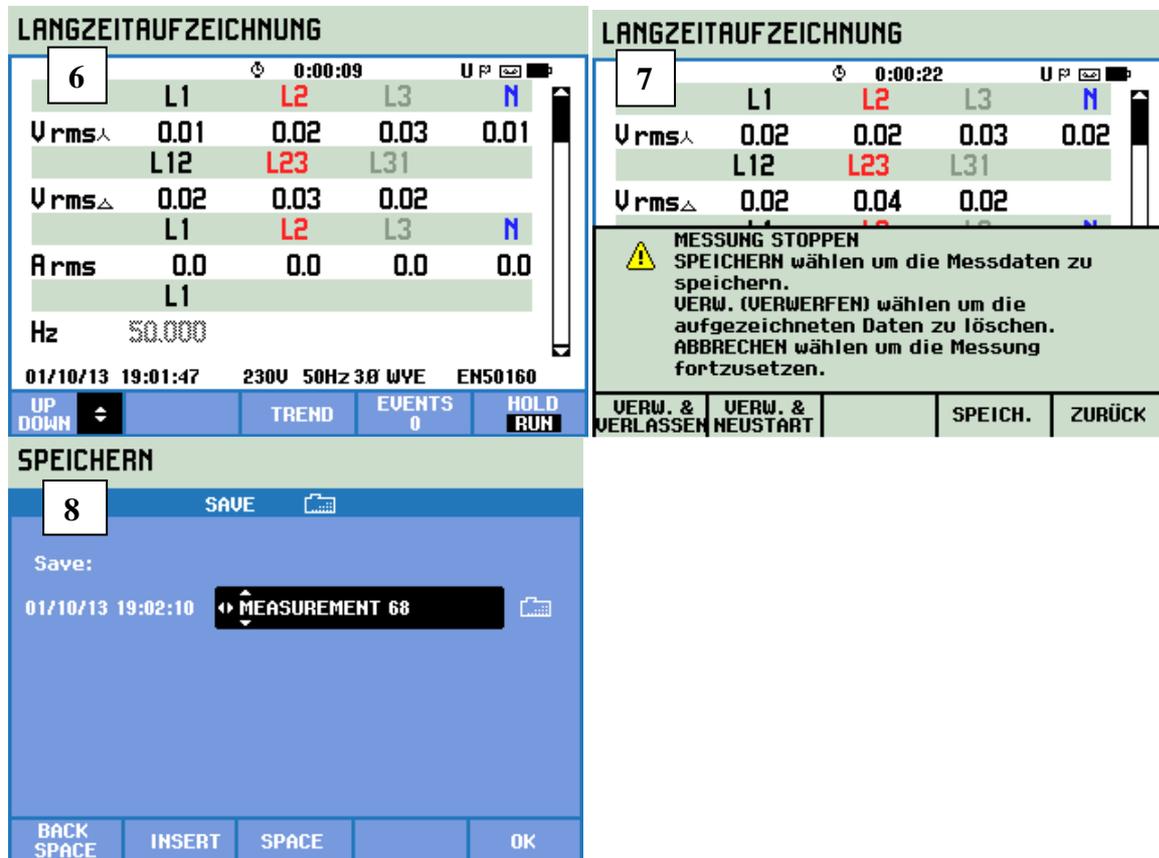
Speicherung der VDI Messung:

Taste F5 „Hold“ (Bild 6)

> Taste F4 „Speich.“ (Bild 7)

> Taste F5 „OK“

Als Dateinamen die Anlagenummer mit VDI Verweis angeben.



Bei einer separaten Standbybedarfsermittlung mit den i5s Messzangen (0,01-5A), diese bitte mit dem Hinweis „i5s“ abspeichern.

Langzeitmessung

Taste: „Logger“ > mit Cursor Taste Intervall **0,5s** auswählen

> Taste F5 „Start“ drücken, um zu starten. (Bild 9)

Speicherung der Langzeitmessung nach einer Woche:

Taste F5 „Hold“ (Bild 10)

> Taste F4 „Speich.“ (Bild 11)

> Taste F5 „OK“

Als Dateinamen die Anlagenummer mit Verweis auf die Langzeitmessung angeben

LANGZEITAUFGZEICHNUNG

9 START

Memory: (8GB) 99% free ⌚ 69 d, 13 hr
 Save as: MEASUREMENT 72
 Interval: ◀ 0.5 s ▶

Duration: 30 d

Immediate
 Timed

Year 2013
 Month
 Day 11
 Hours 13
 Minutes 11

SETUP	CHANGE		START
READINGS	NAME		

LANGZEITAUFGZEICHNUNG

10 0:00:09 U P 🔋

	L1	L2	L3	N
V_{rms} ^λ	0.01	0.02	0.03	0.01
	L12	L23	L31	
V_{rms} ^Δ	0.02	0.03	0.02	
	L1	L2	L3	N
I_{rms}	0.0	0.0	0.0	0.0
	L1			
Hz	50.000			

01/10/13 19:01:47 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160

UP	TREND	EVENTS	HOLD
DOWN		0	RUN

LANGZEITAUFGZEICHNUNG

11 0:00:22 U P 🔋

	L1	L2	L3	N
V_{rms} ^λ	0.02	0.02	0.03	0.02
	L12	L23	L31	
V_{rms} ^Δ	0.02	0.04	0.02	

⚠ MESSUNG STOPPEN
 SPEICHERN wählen um die Messdaten zu speichern.
 VERW. (VERWERFEN) wählen um die aufgezeichneten Daten zu löschen.
 ABBRECHEN wählen um die Messung fortzusetzen.

VERW. & VERLASSEN	VERW. & NEUSTART	SPEICH.	ZURÜCK
-------------------	------------------	---------	--------

SPEICHERN

12 SAVE 📁

Save:

01/10/13 19:02:10 ◀ MEASUREMENT 68 📁

BACK	INSERT	SPACE	OK
SPACE			

Speicherstände einsehen

Die Messwerte können eingesehen werden über die Fluke Bedientaste „Memory“

- > Taste F1 „Recall Delete“
- > Messung auswählen und einsehen über
- > Taste F2 „View“
- > Taste F5 „Recall“

RECALL DELETE	SAVE TASK	SAVE LIMITS	BACK	
SPEICHER				
DATE	TIME	DESCRIPTION	TYPE	
EN50160				
12/12/12	17:21:52:000	Screen 99	📷	
01/11/13	12:43:06:000	MEASUREMENT 71	📷	
12/12/12	17:21:16:000	Screen 98	📷	
01/10/13	19:02:26:000	MEASUREMENT 68	📷	
12/12/12	17:20:54:000	Screen 97	📷	
01/09/13	15:54:00:000	LEASUREMENT 65	📷	
12/12/12	17:20:46:000	Screen 96	📷	
01/09/13	15:45:24:000	LEASUREMENT 64	📷	
12/12/12	17:20:40:000	Screen 95	📷	
01/09/13	15:39:54:000	MEASUREMENT 63	📷	
...	
BACK	VIEW	DELETE	RENAME	RECALL

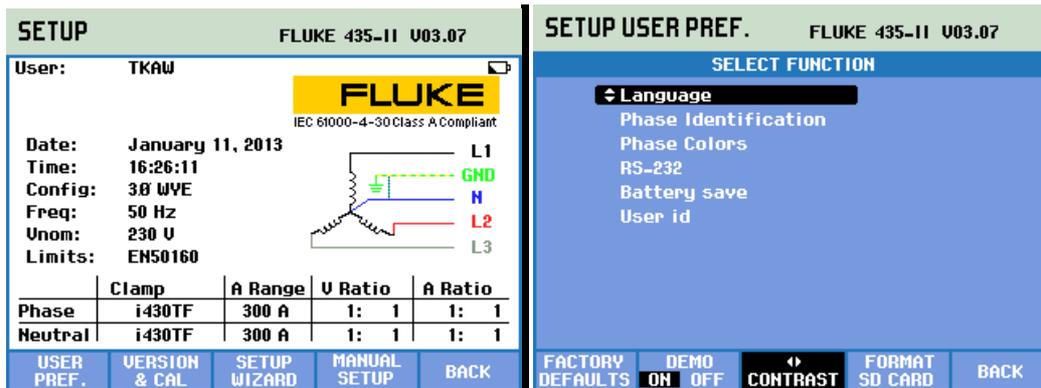
Speicherung der Messwerte von der SD Karte

- SD-Karte aus Fluke entnehmen (dazu Deckel auf der Rückseite öffnen)
- Alle Dateien (FLUKE-Ordner) von der SD Karte kopieren und lokal sowie auf dem H Laufwerk im Temp24 Ordner abspeichern. Als Dateinamen bitte die Anlagenummer angeben. Bitte bei Stefan Baumer (+49 7158 12-2306) oder Sebastian Drewer (+49 7158 12-2560; +49 172 7397130) Bescheid geben, damit die Daten vom Laufwerk kopiert werden können.



Formatierung SD-Karte im Fluke435II nach der Datensicherung

- Taste „Setup“
- > Taste F1 „User Pref“
- > Taste F4 Format SD Card
- > Taste F5 Ja bestätigen

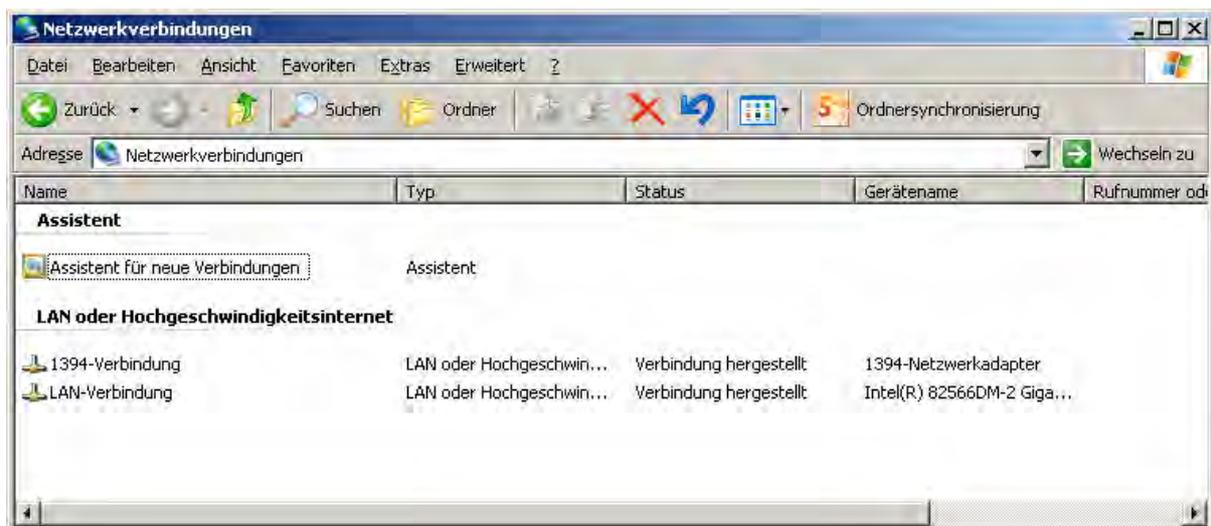


CAN Watch – Log Datei herunterladen

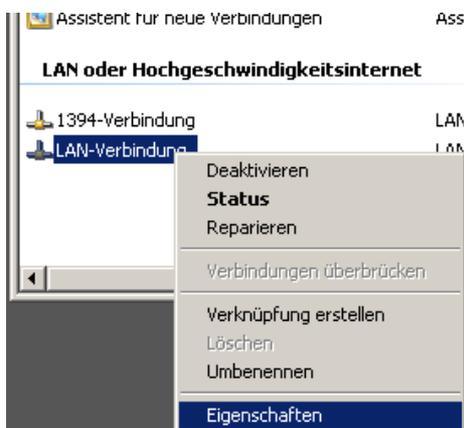
- CAN Watch über Netzwerkkabel (RJ45) mit Rechner verbinden

Vorgangsbeschreibung für das Betriebssystem Windows XP.

Um auf den CAN-Watch zugreifen zu können, muss eine IP-Adresse im TCP/IP Protokoll festgelegt werden. Dazu öffnen Sie über die Systemsteuerung in die Netzwerkverbindungen.



Klicken Sie mit der rechten Maustaste auf „LAN-Verbindungen“ und bei dem sich öffnenden Auswahlfeld auf „Eigenschaften“

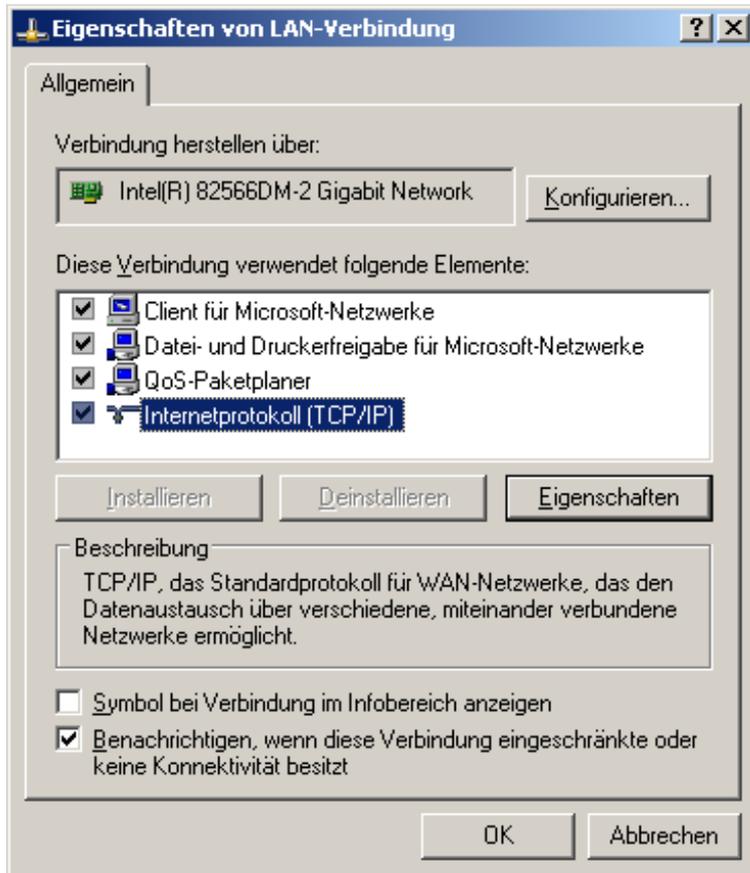


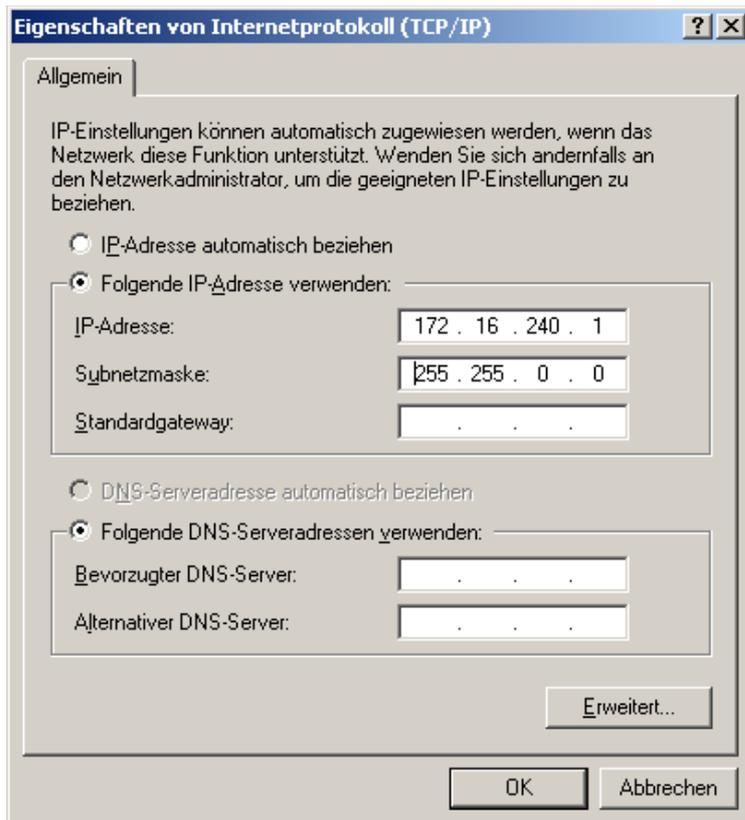
Bei dem sich anschließend öffnenden Feld markieren Sie das „Internetprotokoll (TCP/IP)“ und klicken auf „Eigenschaften“.

Anschließend auf „Folgende IP-Adresse verwenden“.

Ändern Sie die IP Adresse in 172.16.240.1 und die Subnet mask in 255 255 0 0. (Siehe nachfolgende zwei Bilder)

Beenden Sie die Einstellung durch die Bestätigung mit OK.



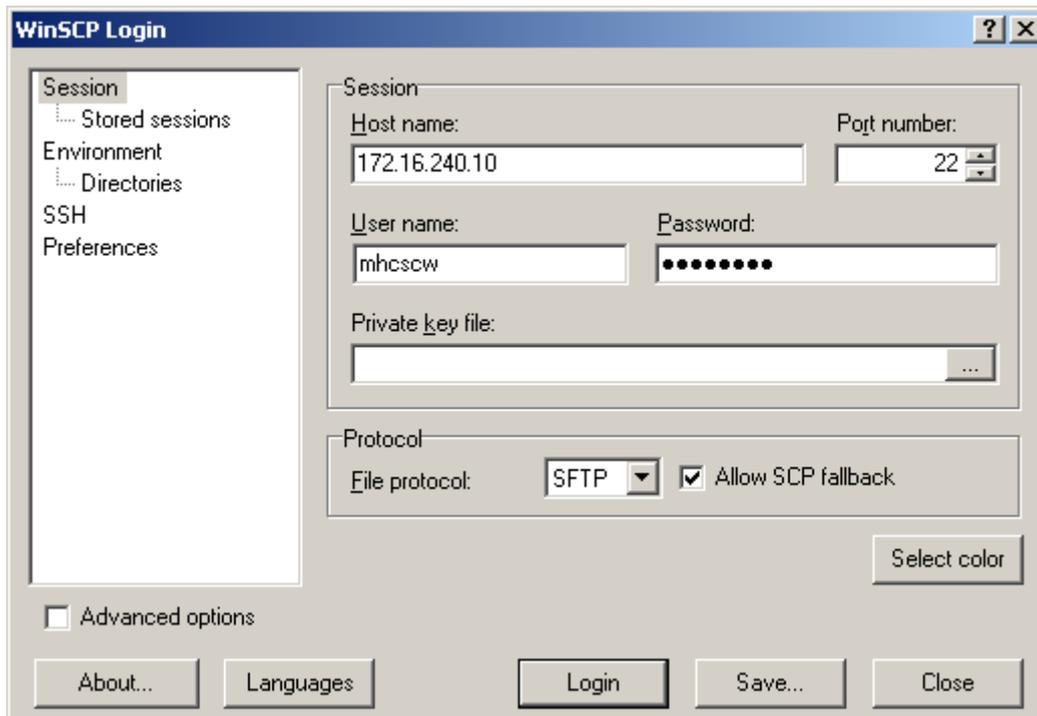


Führen Sie anschließend die „winscp417.exe“ aus. Füllen Sie die Felder mit nachfolgenden Angaben aus (ohne Anführungszeichen).

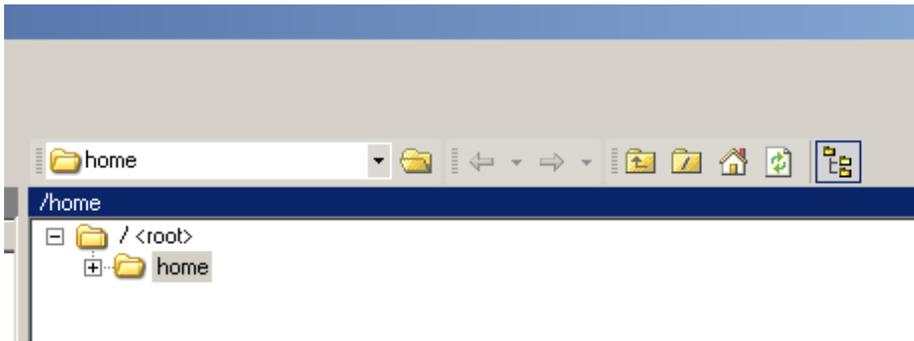
Host name: 172.16.240.10

User name: „mhscw“

Passwort: „Purk654!“



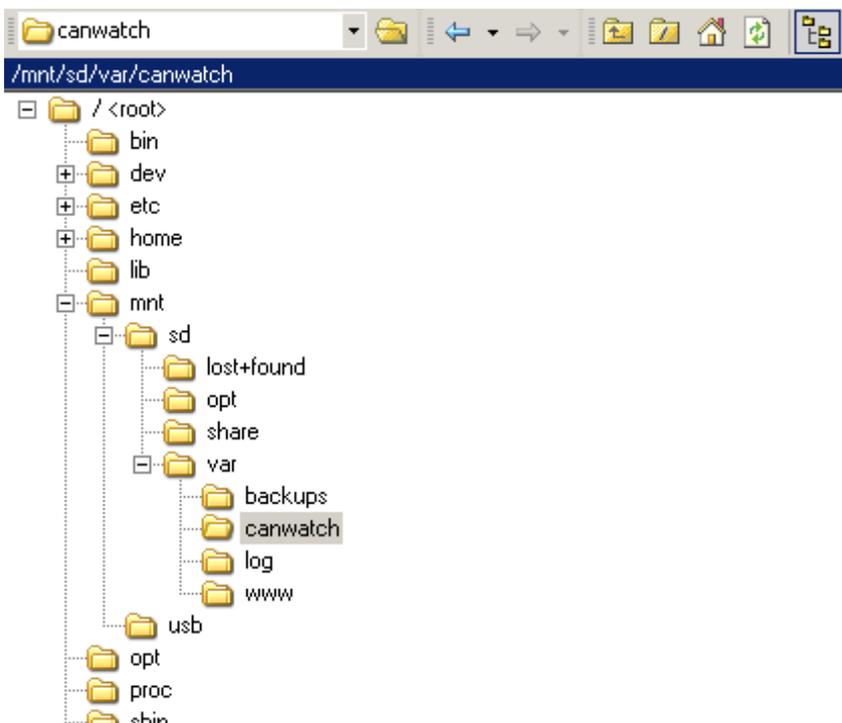
Nach dem Klick auf Login, erscheint ein Fenster, in dem Sie in dem Feld rechts oben auf <root> klicken.



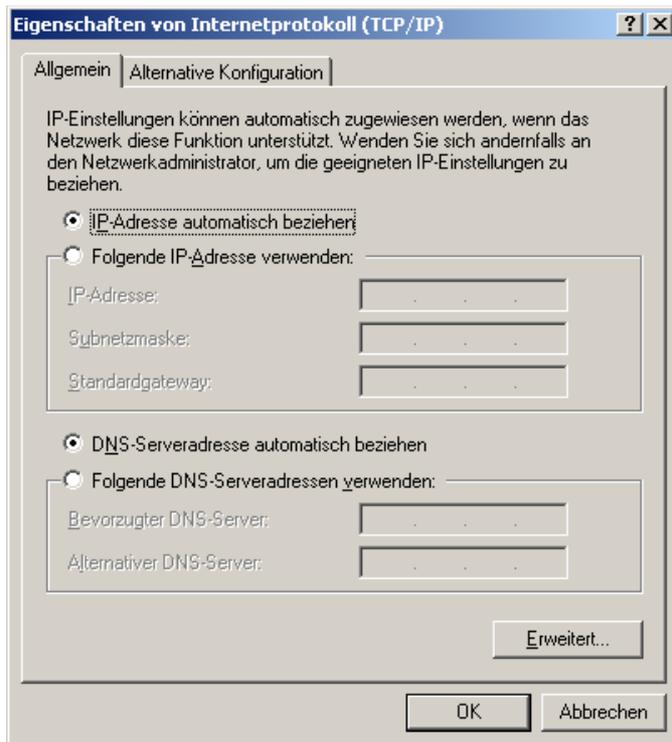
Die log Datei befindet sich in dem Pfad: <root> mnt\sd\var\canwatch

Den gesamten canwatch Ordner auf die Festplatte kopieren und auf dem TK Laufwerk H:\Temp24h ablegen (Ordnername: Energiekennzahlen\Niederlassung und Anlagenummer). Anschließend die Dateien im canwatch Ordner löschen.

Bitte Projektbetreuer informieren, wenn die Messdaten auf dem Laufwerk abgelegt wurden.



Nachdem sie die Daten vom CAN-Watch heruntergeladen haben, setzen Sie in dem Fenster „Eigenschaften von Internetprotokoll TCP/IP“ auf „IP-Adresse automatisch beziehen“, da es sonst zu Problemen mit anderen Netzwerkverbindungen kommen kann.



Quellennachweis zu Anhang 3:

- alle Abbildungen, die Fluke-Technik zeigen: www.fluke.com
- alle weiteren Abbildungen: ThyssenKrupp

Literatur

- [1] Voss, K.; Musall, E.: Nullenergie Gebäude. Internationale Projekte zum klimaneutralen Wohnen und Arbeiten. München 2011.
- [2] Hirzel, S.; Fleiter, T.; Rosende D.: Elevators and Escalators in Germany form an energy persepective. Karlsruhe 2010.
- [3] Optimierung der Energieeffizienz bei Aufzügen, Deutsche Übersetzung: Fraunhofer ISI. Rom 2010.
- [4] Blum, D.; Brück, N.: Der deutsche Wohngebäudebestand. schriftliche Ausarbeitung im Rahmen des Seminars Energieeffizienz von Aufzugsanlagen, Seminararbeit. Karlsruhe 2012.
- [5] Jürg Nipkow: Elektrizitätsverbrauch und Einspar-Potenziale bei Aufzügen. Schlussbericht. Zürich 2005.
- [6] VDI Verein Deutscher Ingenieure: Aufzüge Energieeffizienz (2009) VDI 4707 Teil 1.
- [7] VDI Verein Deutscher Ingenieure: Aufzüge Energieeffizienz Komponenten (2012) VDI 4707 Teil 2.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 2: Energieberechnung und Klassifizierung von Aufzügen (2013) 25745-2. Beuth-Verlag.
- [9] Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein: Elektrische Energie im Hochbau (2006) SIA 380/4.
- [10] Schindler Deutschland GmbH: Schindler Planungsnavigator (2010). Berlin.
- [11] CIBSE (Hrsg.): Transportation systems in buildings. CIBSE Guide D: 2010. Norwich 2010.
- [12] Dirlich, S.; Gruhler, K.; Deilmann, C.: Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland.
- [13] Beier, C.: Abschlussbericht Analyse des Energieverbrauchs und exemplarische Best-practice-Lösungen für relevante Verbrauchssektoren in Krankenhäusern. Oberhausen 2009.
- [14] Green Rating Alliance (2012).
- [15] CEN/TC 350 "Nachhaltigkeit von Gebäuden": Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode (2011) FprEN 15978:2011.
- [16] Hennings, D.: LEE - Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau. Darmstadt 2000.
- [17] Energy Efficient Elevators and Escalators 2010.
- [18] Hirzel, S.; Böge, C.: Monitoring campaign - Germany. Karlsruhe 2009.
- [19] Lindegger, U.; Bettschen, R.: Standby-Optimierung bestehender Aufzugsanlagen. Schlussbericht. Hergiswil 2010.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen (2010) DIN EN ISO 25745-1.
- [21] Taheri, M.: Verbesserung der Sicherheit und der Energieeffizienz bei bestehenden Aufzügen. In: Lift-Report 38 (2012) 5, S. 4–12.
- [22] Horny, G.: ...Vorschriften...Ticker... Vierteljährlicher Bericht über den aktuellen Stand der Vorschriften für Aufzüge 2014.
- [23] European Lift Congress 2006. In: Lift-Report (2006) 3.
- [24] Dispan, J.: Aufzugs- und Fahrtreppenbranche in Deutschland. Entwicklungstrends und Herausforderungen, Branchenreport 2015. Stuttgart 2015.
- [25] Musterbauordnung. MBO.
- [26] Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern. MHHR.
- [27] Richard Peters: Elevate. Great Kingshill 2010.
- [28] Deutsche Gebäudetypologie. Systematik und Datensätze. Darmstadt 2005.
- [29] Schulze, H.-J.; Walther, P.: Gebäudeatlas - Mehrfamilienwohngebäude der Baujahre 1880 bis 1980. Teil 2 Wohngebäude in Block-, Streifen-, Platten- und Skelettbauweise. Berlin 1990.
- [30] Deilmann, C.; Behnisch, M.; Dirlich, S.; Gruhler, K.; Hagemann, U.: Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude - Erfassung und Quantifizierung von Energiespar- und CO₂-Minderungspotentialen 2013.
- [31] Diefenbach, N.; Born, R.: Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie. Darmstadt 2007.
- [32] Schnell, R.; Hill, P. B.; Esser, E. (Hrsg.): Methoden der empirischen Sozialforschung. München 2011.