

Forschungsbericht

**Technische,
ökonomische
und ökologische
Analyse von
Aufwindkraftwerken**

**Marco Aurélio
dos Santos Bernardes**

Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Marco Aurélio dos Santos Bernardes

geboren in Ipatinga/Brasilien

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Drs. h.c. J. Schlaich
Tag der Einreichung:	13. Dezember 2002
Tag der mündlichen Prüfung:	19. Februar 2004

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. A. Voß

Abteilung Neue Energietechnologien und Technikanalyse (NET)

Dr. sc. agr. L. Eltrop

2004

ISSN 0938-1228

D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

„...Christus, in welchem verborgen liegen alle Schätze der Weisheit und der Erkenntnis.“
Kolosser 2,3

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart im Rahmen eines vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) geförderten Promotionsstipendiums.

Beim DAAD möchte ich mich für die finanzielle Unterstützung bedanken, ohne die mein Aufenthalt in Deutschland für meine wissenschaftliche und persönliche Entwicklung nicht möglich gewesen wäre. Ein besonderer Dank gilt Frau Helga Wahre und Frau Maria Salgado für die freundliche Unterstützung und engagierte Betreuung.

Für das grosse Interesse, die wohlwollende Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen während des Entstehens der Arbeit gilt Dr.-Ing. Gerhard Weinrebe mein herzlichster Dank.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Voß und Herrn Dr.sc. agr. Ludger Eltrop danke ich für die freundliche Unterstützung und Betreuung. Für die Übernahme des Mitberichtes für diese Arbeit möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Drs. h. c. Jörg Schlaich bedanken.

Den Kollegen am IER, Oliver Waitze, Heike Brand, Kai Hufendiek, Marlies Härdtlein, Torsten Marheineke, Konrad Raab, Silke Rogge danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben. Zum Schluss aber, am allerwichtigsten, möchte ich mich bei meiner Frau Caroline bedanken, die mich mit Geduld und Verständnis immer unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XVII
Kurzfassung	XXV
Abstract	XXVII
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
2 Grundlagen von Aufwindkraftwerken.....	7
2.1 Physikalische Grundprinzipien	7
2.2 Die Aufwindanlage als Kraftwerk	7
2.3 Realisierte Pilotanlage	9
3 Systemelemente.....	11
3.1 Grundlagen.....	11
3.2 Kollektor	11
3.2.1 Technische Grundlagen	11
3.2.2 Kollektorkonstruktion.....	15
3.2.3 Investitionskosten für den Kollektor	16
3.3 Kamin.....	17
3.3.1 Technische Grundlagen	17
3.3.2 Kaminkonstruktion	17
3.3.3 Investitionskosten für den Kamin.....	18
3.4 Turbine und Generator.....	19
3.4.1 Technische Grundlagen	19
3.4.2 Investitionskosten für den Turbosatz.....	20
4 Auslegung der Referenzanlagen	23
4.1 Auslegungsmodell	23
4.1.1 Physikalische Grundlage zum Auslegungsmodell	23
4.1.2 Kostenmodell zum Auslegungsmodell	25
4.1.3 Anlagenoptimierung	26
4.2 Referenzsysteme	27
4.3 Sensitivitätsanalyse	28
5 Technische Analyse	31
5.1 Modellierung des Luftzustandes im Kollektor	31
5.1.1 Massenbilanz der Luft im Kollektor.....	32
5.1.2 Impulsbilanz der Luft im Kollektor.....	32
5.1.3 Energiebilanz der Luft im Kollektor	35

5.1.4	Bestimmung der Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten	46
5.1.5	Wärmeübertragung durch Strahlung	53
5.1.6	Optische Eigenschaften der Abdeckungen	55
5.2	Modellierung des Luftzustandes im Kamin	56
5.2.1	Massenbilanz der Luft im Kamin	56
5.2.2	Impulsbilanz der Luft im Kamin	56
5.2.3	Energiebilanz der Luft im Kamin	58
5.2.4	Bestimmung der Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten	59
5.3	Turbinen	63
5.4	Reibungsverlust im Turmeinlauf	64
5.5	Stoffwerte der feuchten Luft	64
5.6	Simulationsrechnung	64
5.6.1	Programmstruktur	65
5.7	Validation des Modells	70
5.7.1	Ergebnisse der Untersuchungen	75
5.8	Sensitivitätsanalyse	84
5.8.1	Variation der Zeitschrittweite	86
5.8.2	Variation der Anzahl von Längenschritten	88
5.8.3	Variation der Kaminhöhe	91
5.8.4	Variation der Kollektorflächen	93
5.8.5	Variation der Oberfläche der Doppeltabdeckungen	96
5.8.6	Variation der Oberfläche und der Höhe des Wasserspeichers	99
5.8.7	Variation des Transmissionsgrads der Abdeckung	104
5.8.8	Einfluss der Bodeneigenschaften	107
5.8.9	Kontaktwiderstand zwischen Absorber und Boden	109
5.8.10	Einfluss der Luftfeuchte	111
5.8.11	Variation des Druckentnahmefaktors	113
5.9	Energieproduktion einer fiktiven Anlage	115
5.10	Energieproduktion der Referenzanlagen	119
5.11	Zusammenfassung	119
6	Ökonomische Analyse	121
6.1	Grundlagen	121
6.1.1	Kostenrechnung	121
6.2	Investitionskosten	125
6.2.1	Kollektorkosten	125
6.2.2	Kaminkosten	125
6.2.3	Maschinenteil	125
6.2.4	Gelände, Infrastruktur und Sonstiges	125
6.2.5	Gesamtsystem	127
6.3	Betriebskosten	129
6.4	Stromgestehungskosten	130
6.4.1	Parametervariation	131
6.5	Vergleich mit anderen Optionen zur Strombereitstellung	132
6.6	Zusammenfassung	134
7	Ökologische Analyse	137
7.1	Grundlagen einer Ökobilanz	137
7.1.1	Ziel- und Systemdefinition	138

7.1.2	Sachbilanz.....	139
7.1.3	Wirkungsabschätzung.....	140
7.1.4	Auswertung.....	144
7.2	Sachbilanz.....	145
7.2.1	Kollektor.....	146
7.2.2	Kamin.....	148
7.2.3	Turbine und sonstige Komponenten.....	148
7.2.4	Entsorgung des Aufwindkraftwerks.....	149
7.3	Wirkungsabschätzung.....	150
7.3.1	Verbrauch erschöpflicher energetischer Ressourcen.....	150
7.3.2	Bindung mineralischer Ressourcen.....	151
7.3.3	Anthropogener Treibhauseffekt.....	152
7.3.4	Versauerungspotenzial.....	153
7.4	Auswertung.....	154
7.5	Weitere Umwelteffekte.....	156
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	157
	Literaturverzeichnis.....	161
	Anhang.....	169
A	Solarstrahlung.....	169
A.1	Direkte Strahlung.....	169
A.2	Diffuse Strahlung.....	170
B	Strahlungsbilanzen im langwelligen Bereich.....	173
C	Luftfeuchte.....	177
D	Mathematische Herleitung der finanzmathematischen Durchschnittskosten.....	178

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Luftbildaufnahme der Experimentieranlage bei Manzanares (/Schlaich 1995/)	2
Abb. 1-2: Prinzip des Aufwindkraftwerks: Glasdachkollektor, Kaminröhre, Windturbinen	2
Abb. 2-1: Energiewandlungskette bei der solarthermischen Stromerzeugung mit einem Aufwindkraftwerk	7
Abb. 2-2: Energiefluss in einem Aufwindkraftwerk	8
Abb. 3-1: Die wesentlichen Bauteile des Aufwindkraftwerkes: Der Kollektor (ein flaches Folien- oder Glasdach), der Kamin (eine vertikale Röhre mit einer Stützung auf radialen Wänden) und die Turbinen am Fuß der Röhre	11
Abb. 3-2: Tägliche Betriebsstunden des Prototyps in Manzanares während des Jahres 1987 (/Schlaich 1995/)	12
Abb. 3-3: Einstrahlungs- und konvektive Wärmeverluste und Wärmespeicherung am Kollektor	13
Abb. 3-4: Aufbau und Wirkungsweise eines Wasserspeichers	14
Abb. 3-5: Tageszeitlicher Verlauf der Wärmeströme im Kollektor ohne Wasserspeicher (/Kretz 1997/)	14
Abb. 3-6: Tageszeitlicher Verlauf der Wärmeströme im Kollektor mit Wasserspeicher; Wärmeübergangskoeffizient $250 \text{ W/m}^2\text{K}$; Wasserschichtdicke 15 cm (/Kretz 1997/)	14
Abb. 3-7: Vordachkonstruktion mit Glaseindeckung. Konstruktionsdetails: Stahl- (oder Betonfertigteile-) Stützen (a) in Betonfundamenten (b) im quadratischen Abstand von $L=9$ Metern tragen in einer Richtung unterspannte Träger (c) (Querschnitt A-A). Dazwischenhängen in Querrichtung im Abstand von 1 Meter Flachstähle (d) mit Abspannungen (e) am äußeren Dachrand. Auf die Flachstähle (d) sind 4 mm-Glaseiben (f) aufgeklemmt, eine Lage (wie im Querschnitt A-A gezeigt) oder zwei Lagen (/Schlaich 1995/)	16
Abb. 3-8: Typ 1: Kaminvariante in Betonbauweise - Kamin in Massivbauweise; Typ 2: Trapezblechröhre in Sandwichbauweise auf Betonfußkonstruktion - Kamin in Leichtbauweise, Stahlblechröhre gelagert auf einer Betonstützkonstruktion; Typ 3: Kaminvariante in Membranbauweise - Kamin in Leichtbauweise, Membrankamin; Typ 4: Sonderkonstruktion „Blechröhre“ mit Seilverspannungen - Kamin in Leichtbauweise, Aufgehängte Stahlblechröhre (nach /Schlaich et al. 1990/)	18
Abb. 3-9: Spezifische Kaminkosten	19

Abb. 3-10: Kaminfuß mit zahlreichen Horizontalachsen-Windturbinen am Umfang der Kaminstützung.....	20
Abb. 4-1: Kennlinie von Druckabfall und Volumenstrom	24
Abb. 4-2: Variation der Anlagenparameter als Funktion der Auslegungsleistung.....	28
Abb. 5-1: Modelldarstellung des Aufwindkraftwerks.	32
Abb. 5-2: Widerstandbeiwerte c_w der längsangeströmten rauhen ebenen Platte bei der Strömung eines homogenen Fluids nach (5-12). (1) Laminar nach (5-7), (2) turbulent glatt nach (5-10), laminar-turbulent nach (5-11), (4) Grenze des Bereichs der vollausgebildeten Rauheitsströmung.	34
Abb. 5-3: Energiebilanz für ein Längenelement.....	36
Abb. 5-4: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit einfacher Abdeckung ohne Wasserspeicher.....	37
Abb. 5-5: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit doppelter Abdeckung ohne Wasserspeicher.....	39
Abb. 5-6: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit einfacher Abdeckung und Wasserspeicher.....	41
Abb. 5-7: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit doppelter Abdeckung und Wasserspeicher.	43
Abb. 5-8: Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils bei hydrodynamischem Einlauf.	47
Abb. 5-9: Strömungsformen an der längsüberströmten ebenen Platte	48
Abb. 5-10: Einströmung in eine abgerundete Rohrleitung kurz vor einer Wand.	64
Abb. 5-11: Struktur des Simulationsprogramms	68
Abb. 5-12: Der zeitliche Verlauf der Globalstrahlung und der Außenwindgeschwindigkeit am 7. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergermann und Partner 2002/)	72
Abb. 5-13: Der zeitliche Verlauf der Globalstrahlung und der Außenwindgeschwindigkeit am 8. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergermann und Partner 2002/)	73
Abb. 5-14: Der zeitliche Verlauf der relativen Feuchte der Außenluft und der Temperatur in verschiedenen Höhen am 7. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergermann und Partner 2002/)	73

Abb. 5-15: Der zeitliche Verlauf der relativen Feuchte der Außenluft und der Temperatur in verschiedenen Höhen am 8. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)	74
Abb. 5-16: Der zeitliche Verlauf der Temperatur bei verschiedenen Radien des Kollektors am 7. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)	74
Abb. 5-17: Der zeitliche Verlauf der Temperatur bei verschiedenen Radien des Kollektors am 8. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)	75
Abb. 5-18: Lufttemperatur ($R_c=102$ m - 7.6.87)	76
Abb. 5-19: Lufttemperatur ($R_c=102$ m - 8.6.87)	76
Abb. 5-20: Lufttemperatur ($R_c= 84$ m - 7.6.87)	76
Abb. 5-21: Lufttemperatur ($R_c= 84$ m - 8.6.87)	76
Abb. 5-22: Lufttemperatur ($R_c= 66$ m - 7.6.87)	76
Abb. 5-23: Lufttemperatur ($R_c= 66$ m - 8.6.87)	76
Abb. 5-24: Lufttemperatur ($R_c= 48$ m - 7.6.87)	77
Abb. 5-25: Lufttemperatur ($R_c= 48$ m - 8.6.87)	77
Abb. 5-26: Lufttemperatur ($R_c= 30$ m - 7.6.87)	77
Abb. 5-27: Lufttemperatur ($R_c= 30$ m - 8.6.87)	77
Abb. 5-28: Der berechnete Verlauf der Luftfeuchte am 7.6.1987	78
Abb. 5-29: Der berechnete Verlauf der Luftfeuchte am 8.6.1987	78
Abb. 5-30: Der berechnete Verlauf der Luft-, Abdeckungs- und Absorbentemperatur und Luftfeuchte als Funktion des Kollektorradius am 7.6.1987	78
Abb. 5-31: Der berechnete Verlauf der Luft-, Abdeckungs- und Absorbentemperatur und Luftfeuchte als Funktion des Kollektorradius am 8.6.1987	78
Abb. 5-32: Der berechnete Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten im Absorber, in der Abdeckung und im Boden als Funktion des Kollektorradius am 7.6.1987	79

Abb. 5-33: Der berechnete Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten im Absorber, in der Abdeckung und im Boden als Funktion des Kollektorradius am 8.6.1987	79
Abb. 5-34: Der berechnete und gemessene Verlauf der Aufwindgeschwindigkeit als Funktion der Zeit am 7.6.1987	80
Abb. 5-35: Der berechnete und gemessene Verlauf der Aufwindgeschwindigkeit als Funktion der Zeit am 8.6.1987	80
Abb. 5-36: Der berechnete und gemessene Verlauf der Leistung als Funktion der Zeit am 7.6.1987	80
Abb. 5-37: Der berechnete und gemessene Verlauf der Leistung als Funktion der Zeit am 8.6.1987	80
Abb. 5-38: Der berechnete Verlauf der Leistung als Funktion des Kollektorradius am 7.6.1987 (12 Uhr)	81
Abb. 5-39: Der berechnete Verlauf der Leistung als Funktion des Kollektorradius am 8.6.1987 (12 Uhr)	81
Abb. 5-40: Leistungsfluss im Kollektor.....	82
Abb. 5-41: Der berechnete Verlauf der Leistung am 7.6.1987.....	83
Abb. 5-42: Der berechnete Verlauf der Leistung am 8.6.1987.....	83
Abb. 5-43: Der berechnete Verlauf der Wirkungsgrade am 7.6.1987	83
Abb. 5-44: Der berechnete Verlauf der Wirkungsgrade am 8.6.1987	83
Abb. 5-45: Der zeitliche Verlauf der Globalstrahlung.....	86
Abb. 5-46: Berechneter Massenstrom eines Aufwindkraftwerks bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten.	87
Abb. 5-47: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten.	88
Abb. 5-48: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritte.	89
Abb. 5-49: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritte.	89
Abb. 5-50: Berechnete Lufttemperatur im Kollektor bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritte (12:00 Uhr).	90

Abb. 5-51: Abweichungen der erzeugten Energie und der Austrittstemperatur des Kollektors bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritte (Bezugsanzahl: 550).....	90
Abb. 5-52: Der Massenstrom bei unterschiedlichen Kaminhöhen.....	91
Abb. 5-53: Die Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Kaminhöhen.....	92
Abb. 5-54: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms von Kaminhöhe.....	92
Abb. 5-55: Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichen Kaminhöhen.....	93
Abb. 5-56: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Kollektordurchmessern.....	94
Abb. 5-57: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Kollektordurchmessern.....	94
Abb. 5-58: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms vom Kollektordurchmesser.....	95
Abb. 5-59: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichen Kollektordurchmessern.....	95
Abb. 5-60: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckungen (bei Werten kleiner als 100% wird die Doppeltabdeckung vom Kaminbereich begonnen).....	96
Abb. 5-61: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckungen (bei Werten kleiner als 100% wird die Doppeltabdeckung vom Kaminbereich begonnen).....	97
Abb. 5-62: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms vom Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckung.....	97
Abb. 5-63: Berechnete Lufttemperatur im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckungen (12:00 Uhr).....	98
Abb. 5-64: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckungen.....	98
Abb. 5-65: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers.....	99

Abb. 5-66: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers (von Zentrum zum äußerstem Ende).....	100
Abb. 5-67: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms vom Flächenanteil (%) des Wasserspeichers.....	100
Abb. 5-68: Berechnete Lufttemperatur im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers (12:00 Uhr).....	101
Abb. 5-69: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers	101
Abb. 5-70: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlicher Höhe des Wasserspeichers.....	102
Abb. 5-71: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlicher Höhe des Wasserspeichers.	103
Abb. 5-72: Potenzielle Energiegewinnung bei Tag und Nacht bezüglich unterschiedlicher Höhe des Wasserspeichers.	103
Abb. 5-73: Verlauf der Leistung im Kollektor bei einer Wasserspeicherhöhe von 0.10 m.	104
Abb. 5-74: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.	105
Abb. 5-75: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.	105
Abb. 5-76: Maximaler Massenstrom und erzeugte Energie bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.	106
Abb. 5-77: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.	106
Abb. 5-78: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Wärmeindringkoeffizienten des Bodens [$W \cdot s^{1/2} / K \cdot m^2$].	107
Abb. 5-79: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Wärmeindringkoeffizienten des Bodens [$W \cdot s^{1/2} / K \cdot m^2$].	108
Abb. 5-80: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung vom Wärmeindringkoeffizienten des Bodens [$W \cdot s^{1/2} / K \cdot m^2$].	108
Abb. 5-81: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Abständen zwischen Absorber und Boden.	109
Abb. 5-82: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Abständen zwischen Absorber und Boden.	110

Abb. 5-83: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms von Abständen zwischen Absorber und Boden.....	110
Abb. 5-84: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Luftfeuchten.	111
Abb. 5-85: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Luftfeuchten.	112
Abb. 5-86: Berechneter Verlauf der relativen Luftfeuchte als Funktion der Kollektordurchmesser und der Kaminhöhe.	112
Abb. 5-87: Abhängigkeit des maximalen Massenstroms und der Leistung vom Druckentnahmefaktor.....	113
Abb. 5-88: Die Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Druckentnahmefaktoren.	114
Abb. 5-89: Energiegewinnung am simulierten Referenztag bei Variation unterschiedlicher Parameter.	115
Abb. 5-90: Klima und Standort von Petrolina.....	116
Abb. 5-91: Verlauf der Globalstrahlung, Luftfeuchte, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit in Petrolina in den ersten zehn Tagen des Jahres 2000.	118
Abb. 6-1: Spezifische Investitionskosten der Referenzsystemen verschiedenen Leitungsklasse.	128
Abb. 6-2: Kostenbeiträge aller Systemkomponente zu den Gesamtsystemkosten.....	129
Abb. 6-3: Stromgestehungskosten in Abhängigkeit vom Zinssatz, der Abschreibungszeit und der Maschinenteilleistung.	131
Abb. 6-4: Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien.	134
Abb. 7-1: Bestandteile einer Ökobilanz (/ISO14040 1997/)	137
Abb. 7-2: Aufbau einer Prozesskettenanalyse (/Hartmann et al. 1996/)	139
Abb. 7-3: Verteilung des Verbrauchs der erschöpflichen energetischen Ressourcen zur Bereitstellung eines Aufwindkraftwerks.	151
Abb. 7-4: Aufwand mineralischer Ressourcen für die Bereitstellung eines Aufwindkraftwerks	152
Abb. 7-5: Verteilung der CO ₂ -Äquivalente zur Bereitstellung eines Aufwindkraftwerks ..	153

Abb. 7-6: Treibhaus- und Versauerungspotenzial je bereitgestellter Kilowattstunde für ausgewählte Optionen zur Stromerzeugung.	156
Abb. B-1: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk für langwellige Strahlung durchlässige Abdeckung (ohne Wasserspeicher).	173
Abb. B-2: Thermische Netzwerke für unterschiedliche, langwellige Strahlung durchlässige Abdeckungen (ohne Wasserspeicher).	176
Abb. B-3: Thermische Netzwerke für unterschiedliche, langwellige Strahlung durchlässige Abdeckungen (mit Wasserspeicher).	176

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Kaminkosten.....	19
Tabelle 3-2: Turbinen, Generatoren und Elektroanlage	20
Tabelle 4-1: Spezifische Mengen von Materialien für den Bau des Kollektors - Koeffizienten für die Gleichung (3-1).....	26
Tabelle 4-2: Referenzsysteme.....	27
Tabelle 4-3: Parametervariationen.....	29
Tabelle 5-1: Berechnete Parameter für den Kamin	69
Tabelle 5-2: Berechnete Parameter für den Kollektor	70
Tabelle 5-3: Eingabewerte für das Programm	71
Tabelle 5-4: Vergleich der berechneten und gemessenen Energieproduktion [kWh].....	79
Tabelle 5-5: Eingabewerte für die Sensitivitätsanalyse.....	85
Tabelle 5-6: Vergleich der berechneten erzeugten Energie eines Aufwindkraftwerks bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten.	87
Tabelle 5-7: Transmissionsgrad für unterschiedliche Materialien (/Incropera und DeWitt 1992/).....	104
Tabelle 5-8: Wärmeeindringkoeffizienten in $Ws^{1/2}/Km^2$	107
Tabelle 5-9: Eingabewerte für die Berechnung der Energieproduktion einer geplanten Aufwindanlage.....	117
Tabelle 5-10: Betriebsdaten eines 100 MW Aufwindkraftwerks in Petrolina (Jahr 2000).	118
Tabelle 5-11: Betriebsdaten der Referenzanlagen.	119
Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Abmessungen für die Infrastrukturmaßnahmen und des Personalbedarfs für die Referenzsysteme.	126
Tabelle 6-2: Abschätzung der Kosten für das Gelände und die Infrastruktur [10^3 €].	127
Tabelle 6-3: Abschätzung der Investitionskosten [10^6 €].	128
Tabelle 6-4: Abschätzung der Betriebskosten.	129

Tabelle 6-5: Stromgestehungskosten für einen realen Zinssatz von 4%.....	130
Tabelle 6-6: Stromgestehungskosten für einen realen Zinssatz von 8%.....	130
Tabelle 6-7: Stromgestehungskosten für einen realen Zinssatz von 12%.....	131
Tabelle 6-8: Kenngrößen ausgewählter Optionen zur Stromerzeugung.....	132
Tabelle 6-9: Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien.....	133
Tabelle 7-1: Obligatorische und optionale Elemente einer Wirkungsabschätzung	140
Tabelle 7-2: Wirkungskategorien zur Abschätzung der Umweltwirkung	142
Tabelle 7-3: Relative Treibhauspotenziale (GWP-Werte) der betrachteten klimawirksamen Gase, bezogen auf ihre Masse und einen Zeithorizont von 100 Jahren (vgl./Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/, /Houghton et al. 1996/)	143
Tabelle 7-4: SO ₂ -Äquivalente zur Bestimmung des Versauerungspotenzials, bezogen auf die Masse der jeweiligen Emissionen (vgl. /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/, /Houghton et al. 1996/)	144
Tabelle 7-5: Vorgelagerte Prozesse, aus denen die Aufwindkraftwerke gefertigt sind.	145
Tabelle 7-6: Aufwendungen für den Bau des Kollektors.....	146
Tabelle 7-7: Transportentfernungen für Baumaterial.....	147
Tabelle 7-8: Dem Bau des Aufwindkraftwerks zuzurechnende Transportprozesse	147
Tabelle 7-9: Kenngrößen der berücksichtigten Baumaschinen (/BUWAL 1994/)	147
Tabelle 7-10: Dem Bau des Kamins zuzurechnende Erdaushube.....	147
Tabelle 7-11: Aufwendungen für den Bau des Kamins (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)	148
Tabelle 7-12: Aufwendungen für den Bau und Montage der Turbine	149
Tabelle 7-13: Verbrauch erschöpflicher energetischer Ressourcen für Bau, Betrieb und Entsorgung eines Aufwindkraftwerks.....	150
Tabelle 7-14: Bindung mineralischer Ressourcen für die Bereitstellung der betrachteten Aufwindkraftwerke.	151
Tabelle 7-15: Treibhauspotenzial für den Bau, Betrieb und Entsorgung eines Aufwindkraftwerks	152

Tabelle 7-16:Versauerungspotenzial für den Bau, Betrieb und Entsorgung eines Aufwindkraftwerks.....	153
Tabelle 7-17:Verbrauch erschöpflicher und mineralischer Ressourcen für ausgewählte Optionen zur Stromerzeugung (Voß, A., et al. 2002/)	155
Tabelle A-1: Lokale Standardzeit LST.....	170
Tabelle A-2: Ausgewählte Werte für die Oberflächenalbedo.....	173

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
Griechische Buchstaben		
α	Temperaturleitfähigkeit	m ² /s
α	effektive Absorptivität des Kollektors	-
α_1	Absorptionskoeffizient der zweiten Abdeckung	-
α_2	Absorptionskoeffizient der ersten Abdeckung	-
α_3	Absorptionskoeffizient der transparenten Folie	-
α_4	Absorptionskoeffizient des Absorbers	-
α_b	Temperaturleitfähigkeit des Bodens	m ² /s
α_S	Sonnenhöhenwinkel	°
β	thermischer Verlustkoeffizient des Kollektors	W/m ² K
δ	Grenzschichtdicke	m
δ	Deklinationwinkel ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$)	°
Δp	Druckgefälle über den Kamin	Pa
Δp^*	Druckverlustkoeffizient	Pa
Δp_{ges}	Gesamtdruckgefälle über den Kamin	Pa
Δp_{reib}	Druckverluste durch Reibung	Pa
Δp_{turb}	Turbinendruckabfall	Pa
ΔT	erzeugte Temperaturdifferenz im Kollektor	K
ε	Rauhigkeit	-
ε_1	Emissionskoeffizient der zweiten Abdeckung	-
ε_2	Emissionskoeffizient der ersten Abdeckung	-
ε_3	Emissionskoeffizient der transparenten Folie	-
ε_4	Emissionskoeffizient des Absorbers	-
ϕ	geographische Breite - Nord positive ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$)	°
Φ	Optimierungsfunktion	-
Γ	Hilfsfunktion $\dot{m}c_p/\pi rL$	W/m ² K
η_c	Kollektorwirkungsgrad	-
η_k	Kaminwirkungsgrad	-
η_M	Maschinenwirkungsgrad	-
η_{Sys}	Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks	-
η_t	theoretisch maximal möglicher Wirkungsgrad	-
ϑ	Temperaturdifferenz	K
κ	Adiabatexponent	-
λ	Nebenbedingungen für die Optimierungsfunktion	-
μ	dynamische Viskosität	kg/m·s

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
θ_1	Einfallswinkel	°
θ_2	Brechungswinkel	°
ρ	Dichte	kg/m^3
τ	Schubspannung	Pa
τ_1	Transmissionskoeffizienten der zweiten Abdeckung	-
τ_2	Transmissionskoeffizienten der ersten Abdeckung	-
τ_3	Transmissionskoeffizienten der transparenten Folie	-
τ_a	Transmissionskoeffizienten - nur Absorptionsverluste sind betrachtet	-
τ_r	Transmissionskoeffizienten - nur Reflexionsverluste sind betrachtet	-
τ_w	Wandschubspannung	Pa
ω	Stundenwinkel	°
ξ	Reibungsverlustbeiwert	-
ξ_∞	Druckverlustkoeffizient für voll entwickelte Strömung	-
Lateinische Buchstaben		
a	spezifische Kollektorkosten	$\text{€}/\text{m}^2$
A	Querschnittsfläche, Fläche	m^2
$[A]$	Koeffizientenmatrix	-
A_1, A_2, A_3	Hilfskoeffizienten	-
AB	Jährlicher Abschreibungsbetrag	$\text{€}/\text{a}$
A_c	Fläche des Kollektors	m^2
AM	relative Luftmasse bezogen auf 1,013 hPa	-
AM^*	relative Luftmasse bezogen auf den lokalen atmosphärischen Druck	-
A_t	Fläche des Kamins	m^2
b	Breite	m
b	Kaminkosten	$\text{€}/\text{m}^2$
b	Wärmeeindringkoeffizient	$\text{W}_s^{1/2}/\text{K}\cdot\text{m}^2$
$[B]$	Vektor der rechten Seiten	-
Bi	Biotzahl	-
c	Maschinenkosten	$\text{€}/\text{kWe}$
$BeKn$	Betriebskosten des n -ten Betriebsjahres	€
BeK_{n+1}	Betriebskosten des $(n+1)$ -ten Betriebsjahres	€
$BWBeK$	Barwert der Betriebskosten während des Planungshorizonts	€
$BWGK$	Barwert der gesamten Kosten ohne Abrißkosten während des Planungshorizonts	€
$BWKK$	Barwert der kapitalgebundenen Kosten während des Planungshorizonts	€

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
c_1	spezifische Menge von Stahl	$\text{Kg}_{\text{Stahl}}/\text{m}^2$
c_2	spezifische Menge von Glas	$\text{m}_{\text{Glas}}^2/\text{m}^2$
c_3	spezifische Menge von Beton	$\text{m}_{\text{Beton}}^3/\text{m}^2$
c_4	spezifische Menge von Trapezblech	$\text{m}_{\text{Trapezblech}}^2/\text{m}^2$
c_f	Reibungskoeffizient	-
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
c_w	Widerstandskoeffizient	-
D_c	Durchmesser des Kollektors	m
D_h	hydraulischer Durchmesser	m
D_t	Durchmesser des Kamins	m
e	Dicke der Abdeckung	m
e_i	spezifische innere Energie	J/kg
EOT	Zeitgleichung (E quation O f T ime)	h
f	Druckverlustkoeffizient nach Fanning	-
F	Widerstandskraft	N
f_c	Druckverlustkoeffizient des Kollektors	-
Fo	Fourierzahl	-
G	Globalstrahlung	W/m^2
G_b	auf eine horizontale Fläche auftretende direkte Strahlung	W/m^2
$G_{ }$	auf eine horizontale Fläche auftretende diffuse Strahlung	W/m^2
G_{\perp}	senkrecht auf eine horizontale Fläche auftretende direkte Strahlung	W/m^2
h	spezifische Enthalpie	J/kg
\bar{h}	durchschnittliche Höhe des Kollektors	m
H	Höhe	m
h_1	Wärmeübergangskoeffizient für die zweite Abdeckung - freie Konvektion	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_2	Wärmeübergangskoeffizient für die erste Abdeckung - freie Konvektion	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_3	Wärmeübergangskoeffizient für die erste Abdeckung - freie oder erzwungene Konvektion zu der strömenden Luft	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_4	Wärmeübergangskoeffizient für die transparente Folie - freie oder erzwungene Konvektion zu der strömenden Luft	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_5	Wärmeübergangskoeffizient für die transparente Folie - freie Konvektion zwischen der transparenten Folie und Wasser	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_6	Wärmeübergangskoeffizient für den Absorber - freie Konvektion zwischen dem Absorber und Wasser	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_7	Wärmeübergangskoeffizient für den Absorber - freie Konvektion zwischen dem Absorber und der Bodenoberfläche	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
h_8	Wärmeübergangskoeffizient für den Absorber - freie Konvektion zwischen der Bodenoberfläche und dem Absorber	W/m ² K
H_c	Höhe des Kollektors	m
H_{c1}	Ausgangshöhe des Kollektors	m
h_{r21}	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung zwischen der ersten und zweiten Abdeckung	W/m ² K
h_{r32}	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung zwischen der ersten Abdeckung und der transparenten Folie	W/m ² K
h_{r43}	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung zwischen der transparenten Folie und dem Absorber	W/m ² K
h_{rs}	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung zwischen der Abdeckung und der Himmel	W/m ² K
h_w	Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Abdeckung und der Umgebung - freie oder erzwungene Konvektion	W/m ² K
i	realer kalkulatorischer Zinssatz	%
I_{Ges}	Gesamte Investitionskosten	€
I_{Inv}	Investitionskosten	€
k	Rauheitshöhe	m
k	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
K	Gesamtkosten	€
$K(\infty)$	Korrekturterm für den Druck	-
k_b	Wärmeleitfähigkeit des Bodens	W/mK
K_{Strom}	Stromgestehungskosten	€/kWh
L	lokale geographische Länge (West)	°
L	Länge	m
L_{hyd}^*	dimensionslose Länge des hydraulischen Einlaufs	-
L_{th}^*	dimensionslose Länge des thermischen Einlaufs	-
L_{hyd}	Länge des hydraulischen Einlaufs	m
L_o	geographische Länge	°
LST	lokale Standardzeit (local standard time)	h
L_{th}	Länge des thermischen Einlaufs	m
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
m	Masse	kg
n	Betriebsjahr, kalkulatorische Abschreibungszeit	-
N	Tageszahl eines Schaltjahres	-
NGK	Nivellierte jährliche Gesamtkosten	€
Nu	Nußeltzahl	-
Nu_∞	Nußeltzahl für die voll ausgebildete Strömung	-
Nu_{erzw}	Nußeltzahl bei erzwungener Konvektion	-

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
Nu_{frei}	Nußeltzahl bei freier Konvektion	-
Nu_m	mittlere Nußeltzahl	-
$Nu_{m,lam}$	mittlere Nußeltzahl bei laminarer Strömung	-
$Nu_{m,tur}$	mittlere Nußeltzahl bei turbulenter Strömung	-
Nu_x	lokale Nußeltzahl	-
P	Periode	-
P	Leistung	W
P^*	maximale Leistung	W
p_0	atmosphärischer Druck	Pa
P_0	Auslegungsleistung	W
p_1	Druck am Eingang des Kollektors	Pa
p_2	Druck am Ausgang des Kollektors	Pa
p_3	Druck am Eingang der Turbine	Pa
p_4	Druck am Eingang des Kamins	Pa
p_5	Druck am Ausgang des Kamins	Pa
P_B	Preis von Beton	€/m ³ _{Beton}
p_{dyn}	dynamischer Druck	Pa
P_G	Preis von Glas	€/m ² _{Glas}
$PerK_n$	Personalkosten	€
p_H	atmosphärischer Druck in der Höhe H	Pa
Pr	Prandtlzahl	-
P_S	Preis von Stahl	€/kg _{Stahl}
p_{stat}	statischer Druck	Pa
P_W	Preis von Trapezblech	€/m ² _{Trapezblech}
\vec{q}	Wärmestromdichtevektor	W/m ²
q	Wärmestromdichte	W/m ²
\bar{Q}	Volumenstrom	m ³ /s
q_{0l}	durchschnittliche Wärmemenge	J
q_b	ans oder vom Erdreich abgegebene Wärmeleistung	W
q_l	an die strömende Luft abgegebene Wärmeleistung	W
q_r	absorbierte Strahlungsleistung	W
q_w	ans oder vom Wasserspeicher abgegebene Wärmeleistung	W
r	Reflexion der unpolarisierten Strahlung	-
r	zylindrische Koordinate	m
r'	dimensionsloser Radius	-

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
Ra	Rayleighzahl	-
Re	Reynoldszahl	-
Re_L	Reynoldszahl bezüglich der Strömungsgeschwindigkeit	-
Re_x	lokale Reynoldszahl	-
R_{ex}	Äußerer Radius der Verbindung	m
R_{in}	Innerer Radius der Verbindung	m
$r_{ }$	Reflexion der unpolarisierten Strahlung - parallele Komponente	-
R_{tl}	Eingangshöhe des Kamins	m
r_{\perp}	Reflexion der unpolarisierten Strahlung - senkrechte Komponente	-
S_1	Absorbierte Solarstrahlung bei der zweiten Abdeckung	W/m ²
S_2	Absorbierte Solarstrahlung bei der ersten Abdeckung	W/m ²
S_3	Absorbierte Solarstrahlung bei der transparenten Folie	W/m ²
S_4	Absorbierte Solarstrahlung bei dem Absorber	W/m ²
SM	Jährlich produzierte Strommenge	kWh
$spInWarK_n$	Spezifische Instandhaltungs- und Wartungskosten im Referenzjahr	€/kW _{el}
t	Zeit	s
\bar{t}	halber Plattenabstand	-
t	Hilfsfunktion	-
$[T]$	Mitteltemperaturvektor	-
T_0	Umgebungstemperatur	K
T_1	Temperatur der 2. Abdeckung	K
T_2	Temperatur der 1. Abdeckung	K
T_3	Temperatur der transparenten Folie	K
T_4	Temperatur des Absorbers	K
T_5	Temperatur der Bodenoberfläche	K
T_b	Temperatur des Bodens	K
T_{dp}	Taupunkttemperatur	K
T_f	Fluidtemperatur	K
$T_{f,i}$	Eingangstemperatur	K
$T_{f,o}$	Ausgangstemperatur	K
T_{f1}	Temperatur der Luft zwischen der 2. Abdeckung und 1. Abdeckung	K
T_{f2}	Temperatur der strömenden Luft	K
T_{f3}	Temperatur des Wassers	K
T_{f4}	Temperatur der Luft zwischen dem Absorber und dem Boden	K
T_H	Temperatur in der Höhe H	K

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit
t_s	tatsächliche lokale Sonnenzeit	h
T_s	Himmelstemperatur	K
T_t	Temperatur der Luft im Kamin	K
\bar{u}	radiale Geschwindigkeit	m/s
u	Geschwindigkeit (r -Komponente)	m/s
U_b	gesamter Wärmedurchgangskoeffizient - Boden	W/m ² K
U_t	gesamter Wärmedurchgangskoeffizient - Abdeckung	W/m ² K
U_{ws}	gesamter Wärmedurchgangskoeffizient - Wasserspeicher	W/m ² K
v	Geschwindigkeit	m/s
v	spezifisches Volumen	m ³ /kg
\bar{V}	durchschnittliche Geschwindigkeit	m/s
v^*	maximale Geschwindigkeit	m/s
$VersK$	Versicherungskosten im Referenzjahr als Prozentsatz der Investitionskosten	€
w	Geschwindigkeit (z -Komponente)	m/s
w_{ges}	maximale Geschwindigkeit (ohne Reibungsverluste)	m/s
x	Druckentnahmefaktor	-
x^*	Dimensionslose Länge für den thermischen Einlauf	-
x^+	Dimensionslose Länge für den hydraulischen Einlauf	-
z	zylindrische Koordinate	m
ZBZ	Zinsen während der Bauzeit	€
ZZ_n	Zinszahlung im n -ten Betriebsjahr	€
Konstanten		
σ	Boltzmannkonstante	$5,6697 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴
g	Fallbeschleunigung	9,80665 m/s ²
G_{sc}	Solarkonstante	1367 W/m ²
R_l	ideale Gaskonstante für Luft	287,05 J/kg·K
Mathematische Zeichen		
$\frac{D}{Dt}$	totales Differenzial	
∇	Nabla-Operator	

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe einer technischen, ökologischen und ökonomischen Analyse, eine umfassende Bewertung von Aufwindkraftwerken durchzuführen, um die Grundlage für die Weiterentwicklung dieses Kraftwerktyps zur Verfügung zu stellen.

Zunächst wird eine Übersicht über die physikalischen und technischen Grundprinzipien des Aufwindkraftwerkes gegeben. Die Charakteristika des Aufwindkraftwerkes als ein solarthermisches Kraftwerk werden beschrieben. Zur Veranschaulichung wird die realisierte Pilotanlage vorgestellt. Nach einer Beschreibung der Funktionsweise des Aufwindkraftwerkes werden die wesentlichen technischen Grundlagen der Komponenten Kollektor, Kamin und Turbine/Generator erläutert. Die Herstellungskosten (Investitionskosten) jeder Komponente werden mit Hilfe von Literatur- und Herstellerangaben sowie eigener Abschätzungen ermittelt.

Danach werden die physikalischen Grundlagen und Annahmen dargelegt, die zur Formulierung des Auslegungsmodells verwendet wurden. Dies ist erforderlich für die Definition der Referenzanlage. Die Berechnung der maximalen Anlagenleistung wird durchgeführt, an die sich die Minimierung der Investitionskosten bei gegebener Leistung im Auslegungspunkt anschließt. Als Ergebnis der vorherigen Auslegung werden zunächst die im weiteren Verlauf der Arbeit zu analysierenden Referenzanlagen definiert. Dazu werden die Rahmenannahmen für das Kraftwerk wie Nennleistung, meteorologische Verhältnisse, Wirkungsgrade von Kollektor, Turm und Windturbinen diskutiert und die Daten der Referenzaufwindkraftwerke festgelegt.

Im Anschluss daran erfolgt die technische Analyse. Ein Simulationsmodell wird entwickelt, um das für solare Anlagen typische transiente Verhalten des Aufwindkraftwerkes mit Hilfe eines Anlagensimulationsprogramms zu simulieren. Dieses soll die Grundlage bilden, um zuverlässige Aussagen über das Potenzial dieser Technik und das energetische Verhalten von Anlagen unter den verschiedensten meteorologischen Randbedingungen machen zu können. Dann wird die Modellierung der Systemkomponenten des Aufwindkraftwerks erläutert. Mit dem dargestellten Modell wird ein Vergleich mit experimentellen Ergebnissen von Manzanares durchgeführt, um das Modell zu validieren. Die Ergebnisse (Leistung, Aufwindgeschwindigkeit, Lufttemperatur, usw.) werden diskutiert. Danach erfolgt eine Variation ausgewählter Parameter (z. B. Geometrie der Anlage, Material der Abdeckung, usw.) und eine Diskussion ihres Einflusses auf die bereitgestellte elektrische Energie.

Daraufhin wird die ökonomische Analyse durchgeführt. Hier werden die Stromgestehungskosten für das Aufwindkraftwerk berechnet. Das methodische Vorgehen zur Berechnung der Stromgestehungskosten wird dargestellt. Die Herstellungskosten der Anlage werden mit Hilfe von Literatur- und Herstellerangaben sowie eigener Abschätzungen ermittelt. Die Kosten für den Betrieb des Kraftwerks werden abgeschätzt. Im Anschluss erfolgt eine Variation ausgewählter Parameter (Zinsfuß, Abschreibungsdauer, Kosten für die Komponenten) und eine Diskussion ihres Einflusses auf die Stromgestehungskosten. Zur Berechnung der Stromgestehungskosten wird die Annuitätenmethode angewandt.

Nachfolgend wird die ökologische Analyse durch das Verfahren der Ökobilanz betrachtet, die sich in die Schritte Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung gliedert. In Rahmen der Sachbilanz wird in einem ersten Schritt die Prozesskettenanalyse verwendet, die eine detaillierte Erfassung der Prozessstufen des betrachteten Energiesystems ermöglicht. Aufgrund der Verflechtung innerhalb einer

Volkswirtschaft und auch der verschiedenen Volkswirtschaften untereinander ist es jedoch nicht möglich, alle dem Bau, dem Betrieb und der Entsorgung eines Energiewandlungssystems vor- und nachgelagerten Prozessketten zu beschreiben. In dieser Arbeit wird daher die Prozesskettenanalyse durch eine sektorale Analyse (Input-Output-Analyse) ergänzt (Hybridansatz). Auf diese Weise ist die Erstellung von Gesamtbilanzen möglich, die alle Vorleistungen erfassen. Die von den Stoff- und Energieströmen ausgehenden Wirkungen auf Mensch und Umwelt werden abgeschätzt. Die Berechnung von Schäden mit dem Wirkungspfadansatz wird durchgeführt.

Die Ermittlung der Stromgestehungskosten ergibt Werte zwischen rund 4 und 8 Cent/kWh. Dieses Ergebnis liegt in der Größenordnung Stromerzeugungskosten von Windkraftanlagen. Aufwindkraftwerke haben aufgrund ihrer Kostenminderung beim Bau in Ländern mit niedrigerem Lohnniveau noch Potenzial für eine weitere Reduzierung der Stromgestehungskosten. Die Ökobilanz ergibt Treibhausgasemissionen von rund 170 (5 MW) bzw. 70 g CO₂-Äquivalenten/kWh (100 MW). Die SO₂-Emissionen betragen rund 570 (5 MW) bzw. 240 mg SO₂-Äquivalente/kWh (100 MW). Der Verbrauch erschöpflicher energetischer und mineralischer Ressourcen sowie die spez. CO₂- und spez. SO₂-Emissionen nehmen bei größeren Aufwindkraftwerken ab.

Abstract

It is the objective of this thesis to develop a methodology for the technical, ecological and economic analysis of solar chimneys, in order to supply a tool for the further development of this type of power plant.

First an overview of the physical and technical basic principles of the solar chimneys is given. The characteristics of the solar chimneys as solar thermal power stations are described. For illustration the realized prototype is introduced. After a description of the functionality of the solar chimney, the technical bases of the components (collector, chimney and turbine/generator) are described. Manufacturing costs of each component are determined by literature and manufacturer data as well as own estimations.

Thereafter the physical fundamentals and assumptions are stated, which were used for the formulation of the model. This is necessary for the definition of the reference systems. The computation of the maximum power generation is accomplished, which the minimization of the investment costs outlays follows with given power in the design point. As results of the previous interpretation the reference systems are defined. In addition the assumptions for the power station, like power output, meteorological conditions, efficiencies of collector, chimney and wind turbines are discussed and the data of the reference solar chimneys are specified.

Subsequently, the technical analysis takes place. A model is developed, in order to simulate the typical transient behaviour of the solar chimney with the help of a simulation program. This is to form the basis in order to be able to make reliable statements about the potential of this technology and the energetic behaviour of plants under the most diverse meteorological frame conditions. Thus the modelling of the system components of the solar chimneys is described. With the represented model a comparison with experimental results is accomplished by the prototype in Manzanares in order to validate the model. The results (power, upwind speed, air temperature, etc.) are discussed. Afterwards a variation of selected parameters (e.g. geometry of the plant, material of the cover, etc.) and a discussion of their influence on the provided electricity is carried out.

Thereupon the economic analysis is accomplished. Here the production costs for the solar chimneys are computed. The methodical procedure for the computation of the production costs is presented. Manufacturing costs of the plant are determined by literature and manufacturer data as well as own estimations. Finally a variation of selected parameters (interest rate, amortization period, costs of the components) and a discussion of their influence on the current production costs take place. For the computation of the current production costs the annuity method is used.

In the following the ecological analysis using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology is accomplished. In a first step the process chain analysis is used, which makes a detailed collection possible of the process stages of the regarded energy system. Due to the interactions within a national economy and also the different national economies among themselves it is, however, not possible, to describe all relevant pre and stored process chains for building the enterprise and the disposal of an energy transformation system. In this work therefore the process chain analysis is supplemented by a sectorial analysis (input-output analysis). With this approach it is possible to establish a life cycle inventory covering all up- and downstream processes. The impacts on human and environment, outgoing from the

material and energy flows, are determined. Furthermore, calculation of damages is performed using the impact pathway approach for impacts on human health, material damages and plant damages.

The determination of the current production costs results in values between about 4 and 8 €- Cent/kWh. This result lies in the order of magnitude of the generation of current costs of wind power plants. Due to the cost reductions as a result of building in countries with lower wage level, solar chimneys have a potential for a further reduction of the current production costs.

The ecological analysis results in approximately 170 (5 MW) and 70 g CO₂-equivalents/kWh (100 MW) respectively in approximately 570 (5 MW) and 240 mg SO₂-equivalents/kWh (of 100 MW). The consumption of exhausting energetic and mineral resources as well as specific CO₂ and specific SO₂-emissions decrease with larger plants.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Verfügbarkeit von Energie in geeigneter Form und Menge ist eine Grundvoraussetzung der Industriegesellschaft. Ohne ausreichende und ökologisch verträgliche Energieversorgung wird eine weltweit humane Entwicklung nicht möglich sein. Die ständig wachsende Weltbevölkerung wird zu einer beträchtlichen Steigerung des Energiebedarfs führen. Mit einem Anteil von weltweit 90% sichern die fossilen Energieträger Kohle, Mineralöl und Erdgas heute die Basis der menschlichen Energieversorgung. Auch wenn der wachsende Energiehunger der Menschheit damit noch für Jahrzehnte gestillt werden könnte, so erzwingt die dadurch verursachte Klimabelastung lange vor Erschöpfung der fossilen Ressourcen den Übergang zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft. Unter Berücksichtigung aller ökologischen Faktoren stellen die erneuerbaren Energien, gespeist aus dem unerschöpflichen Energiespender Sonne, eine der großen Optionen für die zukünftige Energieversorgung dar. Viele Techniken sind bereits weit entwickelt und stehen an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit, so dass zukünftig mit einer verstärkten Nutzung regenerativer Energieträger gerechnet werden darf. Die Einführung von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien muss wie jede tiefgreifende Neuerung in der Energiewirtschaft langfristig vorbereitet werden. Forschung und Entwicklung müssen strategisch auf Jahrzehnte angelegt sein.

Die solarthermische Stromerzeugung hat seit Anfang der 80er Jahre große Fortschritte erzielt. An der Entwicklung von Aufwindkraftwerk, Parabolrinnen-Kraftwerken, Photovoltaik-Kraftwerken und Solarturm-Kraftwerken wurde in dieser Zeit hauptsächlich in den Industrieländern gearbeitet.

In der Mojave-Wüste in Kalifornien wurden zwischen 1984 und 1991 neun Kraftwerke des Parabolrinentyps mit einer Gesamtleistung von 354 Megawatt elektrischer Leistung installiert. Diese Anlagen werden in Kalifornien als Spitzenlastkraftwerke betrieben. Diese sogenannten SEGS (Solar Electric Generating Systems) liefern nahezu 80 Prozent des weltweit erzeugten Solarstroms. Kraftwerke dieses Typs sind die am weitesten entwickelten solarthermischen Anlagen zur Stromproduktion. 75 Prozent des gelieferten Stroms stammen, über das Jahr gemittelt, aus dem mit Sonnenenergie betriebenen Teil der Anlagen; den Rest liefern konventionell befeuerte Kraftwerksteile. Dass diese Anlagen technisch ausgereift sind, spiegelt sich auch in der Verfügbarkeit des Solarfeldes von 98 Prozent wider, d.h. dass nur während zwei Prozent der Betriebszeit die Anlage für Wartung und Reparatur abgeschaltet werden muss. Diese Anlagen zeigen, dass die solarthermische Parabolrinnentechnologie betriebssicher verfügbar ist.

Indem ein 50-kW-Prototyp eines solarthermischen Aufwindkraftwerks in Manzanares-Spanien (Abb. 1-1) sieben Jahre lang Elektrizität produzierte, wurde gezeigt, dass dieser neuartige Solarkraftwerks-Typ funktionstüchtig und zuverlässig ist. Das Konzept des Aufwindkraftwerks wurde von dem Büro Schlaich Bergemann und Partner entwickelt. Die drei bekannten physikalischen Prinzipien Treibhauseffekt, Kaminzug und Nutzung thermischer und kinetischer Energie in der Turbine werden in einem solarthermischen Aufwindkraftwerk kombiniert. Die einfallende Solarstrahlung erwärmt die Luft unter einem großen Kollektorvordach. Die damit erzeugte Temperatur- bzw. Dichtedifferenz zur Außenluft baut über den Kamin und dessen Höhe ein Druckgefälle auf, das in kinetische Energie, den Aufwind, gewandelt wird. Die kinetische Energie wird mit Hilfe einer Turbine in mechanische Energie und über einen Generator in elektrische Energie transformiert und an das örtliche Netz abgegeben (Abb. 1-2).

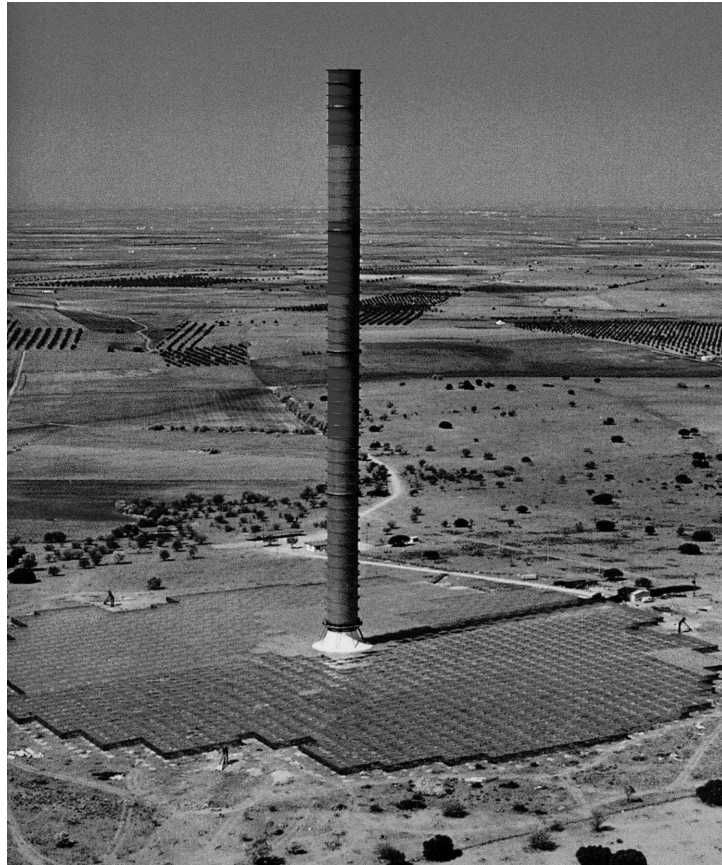


Abb. 1-1: Luftbildaufnahme der Experimentieranlage bei Manzanares (/Schlach 1995/).

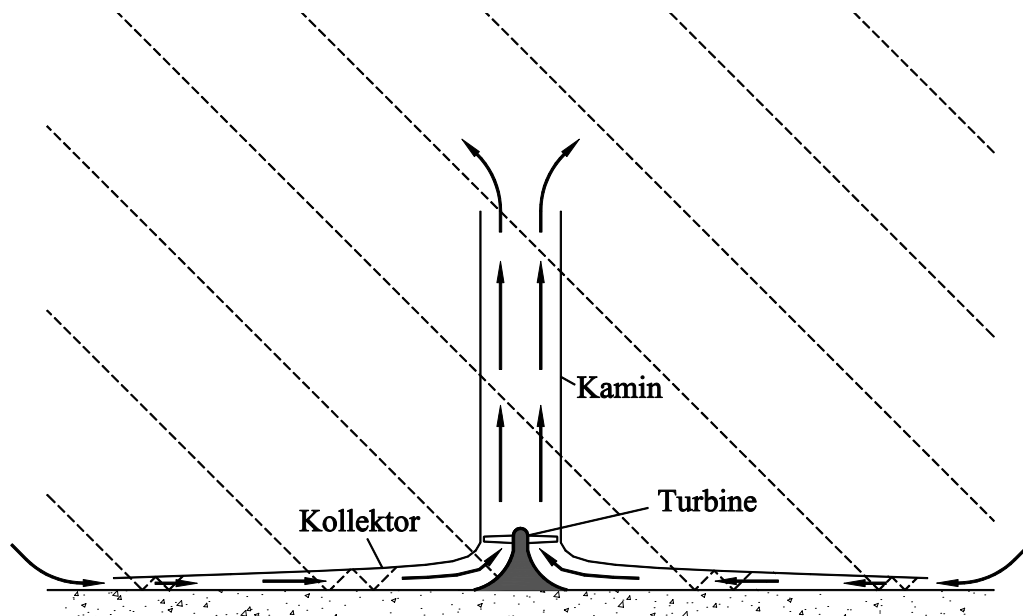


Abb. 1-2: Prinzip des Aufwindkraftwerks: Glasdachkollektor, Kaminröhre, Windturbinen.

Dieses solare System zeichnet sich durch die folgenden technisch-physikalischen Vorteile aus /Schiel und Schlaich 1988/:

- einfache und preiswerte Bauweise mit in Dritte Welt-Ländern verfügbarem Know-how und Materialien (Glas, Beton, Stahl),
- Nutzung der Globalstrahlung und damit auch der Diffusstrahlung bei bewölktem Himmel,
- gleichmäßiger Betrieb bis in die Nachtstunden hinein durch natürliche Bodenspeicherung (bei Großanlagen 24 h-Betrieb, s. Abschnitt 3.2.1),
- kein Wasserverbrauch zum Kühlen von Maschinenteilen, lediglich Wasserbedarf bei Einsatz von Wasserspeichern zur Vergleichmäßigung der Kollektorleistung,
- hoher Kostenanteil von Arbeiten, die wegen ihres einfachen Charakters im Entwicklungsland mit lokalen Arbeitskräften durchgeführt werden können und damit dem örtlichen Arbeitsmarkt zugute kommen und gleichzeitig die Möglichkeit der Kostenreduktion bieten,
- außer Turbine und Generator keine beweglichen und damit wartungsintensiven Teile.

Die Bereitstellung von Nutzenergie ist mit unerwünschten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt verbunden. Konventionelle Energieerzeugungsanlagen verursachen unerwünschte Auswirkungen auf Menschen und Umwelt, die zu externen Kosten führen. Deswegen sind die Stromgestehungskosten allein als Entscheidungskriterium für die Nutzung von Energiequellen nur bedingt geeignet. Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine umfassende Bewertung von Aufwindkraftwerken durchzuführen, welche sich aus drei Hauptbestandteilen zusammensetzt.

1. Eine technische Analyse, um das für solare Anlagen typische transiente Verhalten des Aufwindkraftwerkes zu simulieren.
2. Eine ökologische Analyse des Aufwindkraftwerks mittels einer Ökobilanz, die sich in die Schritte "Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens", "Sachbilanz", "Wirkungsabschätzung" und "Auswertung" gliedert.
3. Eine ökonomische Analyse, in der die Stromgestehungskosten für die untersuchten Aufwindkraftwerke berechnet werden.

Damit stehen die relevanten Kenngrößen zur Verfügung, um ein Aufwindkraftwerk aus technischer, ökologischer und ökonomischer Sicht bewerten, optimieren und die solarthermische Stromerzeugung mit diesem Kraftwerk mit anderen Stromerzeugungstechnologien vergleichen zu können.

Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der technischen Analyse. Diese soll die Grundlage bilden, um zuverlässige Aussagen über das Potenzial dieser Technik und das energetische Verhalten von Anlagen unter den verschiedensten meteorologischen Randbedingungen machen zu können. Mit den Ergebnissen der Simulationsrechnung wird ein Vergleich mit experimentellen Ergebnissen von Manzanares durchgeführt, um das Simulationsmodell zu validieren.

Vorgehensweise und Methode

Der Aufbau der Arbeit lässt sich aus der dargestellten Reihenfolge der Teilanalysen ableiten.

Zuerst erfolgt in Kapitel 2 eine Übersicht über die physikalischen und technischen Grundprinzipien, die zum Verständnis eines Aufwindkraftwerks erforderlich sind. Die einzelnen Komponenten eines Aufwindkraftwerkes werden kurz dargestellt. Die Charakteristika des Aufwindkraftwerkes als ein solarthermisches Kraftwerk werden beschrieben. Danach werden die wesentlichen thermischen und gasdynamischen Grundlagen der Komponenten (Kollektor, Kamin und Turbine/Generator) erläutert. Anschließend wird die realisierte Pilotanlage vorgestellt.

Nach einer Beschreibung der Funktionsweise des Aufwindkraftwerkes werden in Kapitel 3 die wesentlichen technischen Grundlagen der Komponenten (Kollektor, Kamin und Turbine/Generator) erläutert. Die Herstellungskosten (Investitionskosten) jeder Komponente werden mit Hilfe von Literatur- und Herstellerangaben sowie eigenen Abschätzungen ermittelt.

In Kapitel 4 werden die physikalischen Grundlagen und Annahmen dargelegt, die zur Formulierung des Auslegungsmodells verwendet wurden. Dieses Auslegungsmodell dient dazu, die Interaktion der verschiedenen thermodynamischen Grundlagen eines Aufwindkraftwerkes qualitativ und quantitativ zu charakterisieren und die Referenzanlagen festzulegen. Die Berechnung der maximalen Anlagenleistung wird durchgeführt, an die sich die Minimierung der Anlagengeometrie unter Leistungs- und Investitionskostengesichtspunkten anschließt. Als Ergebnisse der vorherigen Auslegung werden zunächst die im weiteren Verlauf der Arbeit zu analysierenden Referenzanlagen definiert. Dazu werden die Rahmenannahmen für das Kraftwerk wie Nennleistung, meteorologische Verhältnisse, Wirkungsgrade von Kollektor, Turm und Windturbinen diskutiert und die Daten der Referenzaufwindkraftwerke festgelegt. Anschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, wobei ausgewählte Parameter variiert und ihr Einfluss auf die Leistung und die Investitionskosten bewertet werden.

In Kapitel 5 erfolgt die technische Analyse. Zunächst wird das mathematische Modell zur Berechnung des Luftzustandes in einem Aufwindkraftwerk detailliert beschrieben. Dazu werden die Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichungen verwendet sowie die Wärmeübergangskoeffizienten und die Reibungsfaktoren aus der Literatur übernommen. Es wird ausführlich darauf eingegangen, welche Voraussetzungen dem Modell zugrunde liegen und welche vereinfachenden Annahmen getroffen werden. Es werden ebenfalls die Punkte bzw. mathematischen Terme besprochen, die im Modell nicht berücksichtigt werden. Bei der Entwicklung eines Simulationsprogramms zur Berechnung von instationären Luftströmungen in einem Aufwindkraftwerk wird auf iterative Lösungsmethoden zurückgegriffen, weil die komplexen Gleichungen eine geschlossene Lösung nicht zulassen. Ein Programmlauf soll die Werte der Temperatur, der relativen Feuchte und des Volumenstroms der Luft im System sowie die Leistung und die potenzielle Energiegewinnung für einen ganzen Tag liefern. Das Simulationsprogramm soll auch die Möglichkeit zur numerischen Darstellung der Ergebnisse bieten. Die Validierung des Modells erfolgt durch den Vergleich mit experimentellen Ergebnissen von Manzanares. Bei der Sensitivitätsanalyse sollen die Abhängigkeit der Leistung und der potenziellen Energiegewinnung von den entsprechenden Einflussgrößen untersucht werden. Dazu werden Variationen der geometrischen und betrieblichen Parameter durchgeführt. Anschließend können Richtlinien zur Planung von Aufwindkraftwerken erstellt werden und das energetische Verhalten geplanter Anlagen mit Hilfe des Rechenprogramms untersucht werden. Simulationen der Referenzanlagen aus Kapitel 4 werden durchgeführt.

In Kapitel 6 erfolgt dann die ökonomische Analyse. Hier werden die Stromgestehungskosten für das Aufwindkraftwerk berechnet. Das methodische Vorgehen zur Berechnung der

Stromgestehungskosten wird dargestellt. Die Rechnung erfolgt in Anlehnung an die Vollkostenrechnung nach VDI 2076 /VDI Richtlinien 1991/. Die in Kapitel 3 berechneten Investitionskosten werden hier verwendet, um die Stromgestehungskosten zu ermitteln. Die Herstellungskosten der Anlage werden mit Hilfe von Literatur- und Herstellerangaben sowie eigenen Abschätzungen ermittelt. Ebenfalls erfolgt eine Abschätzung der Kosten für den Betrieb des Kollektors. Die Kosten werden in drei Faktoren unterteilt: kapitalgebundene Kosten (die sich direkt aus den Investitionskosten für die Anlagenerrichtung ergeben: Gelände und Infrastruktur, Kollektor, Ingenieurleistungen und Sonstiges), betriebsgebundene Kosten (Personalkosten, Wartungs- und Reparaturkosten, Versicherungskosten und Overheadkosten) und sonstige Kosten. Die Gesamtkosten werden durch das Summieren der einzelnen Kostenblöcke nach /VDI Richtlinien 1991/ bestimmt. Zur Berechnung der Stromgestehungskosten wird die Annuitätenmethode angewandt. Ferner wird eine Variation ausgewählter Parameter (Zinsfuß, Abschreibungsdauer, Kosten für die solaren Komponenten) durchgeführt und deren Einfluss auf die Stromgestehungskosten diskutiert.

Die ökologische Analyse erfolgt in Kapitel 7. Das Verfahren der ganzheitlichen Bilanzierung gliedert sich in die Schritte Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. Diese Arbeit stützt sich auf die Normen ISO 14040 - 14043. Im Rahmen der Sachbilanz wird in einem ersten Schritt die Prozesskettenanalyse verwendet, die eine detaillierte Erfassung der Prozessstufen des betrachteten Energiesystems ermöglicht. Aufgrund der Verflechtung innerhalb einer Volkswirtschaft und auch der verschiedenen Volkswirtschaften untereinander ist es jedoch nicht möglich, alle dem Bau, dem Betrieb und der Entsorgung eines Energiewandlungssystems vor- und nachgelagerten Prozessketten zu beschreiben. Die Prozesskettenanalyse wird daher durch eine sektorale Analyse (Input-Output- Analyse) ergänzt (Hybridansatz). Damit ist die Erstellung von Gesamtbilanzen möglich, die alle Vorleistungen erfassen. Hier werden die von den Stoff- und Energieströmen ausgehenden Wirkungen auf Mensch und Umwelt abgeschätzt. In dieser Arbeit wird die Berechnung von Schäden mit dem Wirkungspfadansatz durchgeführt. Bei diesem Ansatz wird versucht, die kausale Wirkungsreihe eines Schadstoffes von der Emission über Transport- und Umwandlungsprozesse bis hin zur Wirkung auf verschiedene Rezeptoren (z.B. Menschen, Pflanzen, Materialien) durch Modelle zu beschreiben. Ein Vergleich der verschiedenen Stromerzeugungstechnologien Photovoltaik, Solarturm, Windenergie, Wasserkraftwerk, Erdgas-GuD-Kraftwerk, Steinkohlekraftwerk und Kernkraftwerk wird durchgeführt. Den Abschluss bildet eine kurze Zusammenfassung in Kapitel 8.

Mit den Resultaten lässt sich eine Aussage treffen, welche Aufwindkraftwerkskonfiguration unter technischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten die jeweils günstigste Lösung darstellt. Für Entscheidungsträger ist damit - in Abhängigkeit der jeweiligen Gewichtung der genannten Kriterien - eine fundierte und transparente Entscheidung möglich.

2 Grundlagen von Aufwindkraftwerken

2.1 Physikalische Grundprinzipien

Das Aufwindkraftwerk ist ein solarthermisches System zur Erzeugung von elektrischer Energie aus der Strahlungsenergie der Sonne. Aufwindkraftwerke haben im Vergleich zu den konventionellen solarthermischen Systemen ein völlig anderes Arbeitsprinzip. Bei einem solarthermischen Aufwindkraftwerk werden die drei physikalischen Prinzipien Treibhauseffekt, Kaminzug und Umwandlung kinetischer Energie in einer Energiewandlungskette (Abb. 2-1) miteinander kombiniert. Unter einem kreisförmigen, am Umfang offenen Glasdach, das zusammen mit dem darunter liegenden natürlichen Boden einen Warmluftkollektor und Speicher bildet, wird Luft durch die Sonnenstrahlung erwärmt. In der Mitte des Daches steht senkrecht eine Kaminröhre mit großen Zuluftöffnungen am Fuß. Das Dach ist luftdicht an den Kaminfuß angeschlossen. Da warme Luft eine geringere Dichte als kalte Luft hat, steigt sie im Kamin auf. Durch den Kaminsog wird gleichzeitig warme Luft aus dem Kollektor nachgesaugt und von außen strömt kalte Luft zu. So bewirkt die Sonnenstrahlung einen kontinuierlichen Aufwind im Kamin. Die darin enthaltene Energie wird mit Hilfe druckgestufter Windturbinen in mechanische und über Generatoren in elektrische Energie umgewandelt.

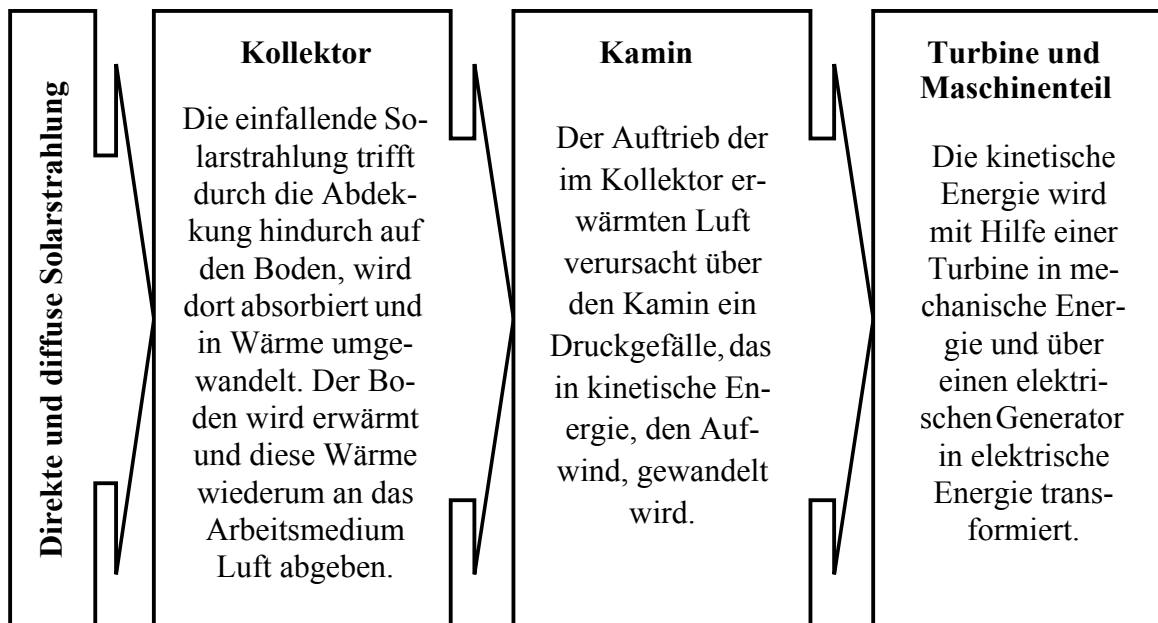


Abb. 2-1: Energiewandlungskette bei der solarthermischen Stromerzeugung mit einem Aufwindkraftwerk.

2.2 Die Aufwindanlage als Kraftwerk

Abb. 2-2 zeigt den Energiefluss eines Aufwindkraftwerks. Ein großes Teil des sichtbaren kurzwelligigen Lichts wird durchgelassen und vom Boden absorbiert. Der so erhitze Boden strahlt einen Teil dieser Energie mit größerer Wellenlänge wieder ab; diese Wärmestrahlung wird jedoch von der Abdeckung größtenteils absorbiert. An Boden- und Abdeckungsflächen treten dabei Temperaturen auf, die für einen guten Wärmeübergang an das durchströmende käl-

tere Arbeitsmedium Luft sorgen. Ein erheblicher Anteil der tagsüber eingestrahlt Energie wird in größere Bodentiefen abgeleitet, dort gespeichert und nachts wieder an die Luft abgegeben, so dass ein durchgehender 24-Stunden-Betrieb des Kraftwerks möglich ist. Weitere Glieder der Energiebilanz sind die Wärmeverluste an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion im Kollektor.

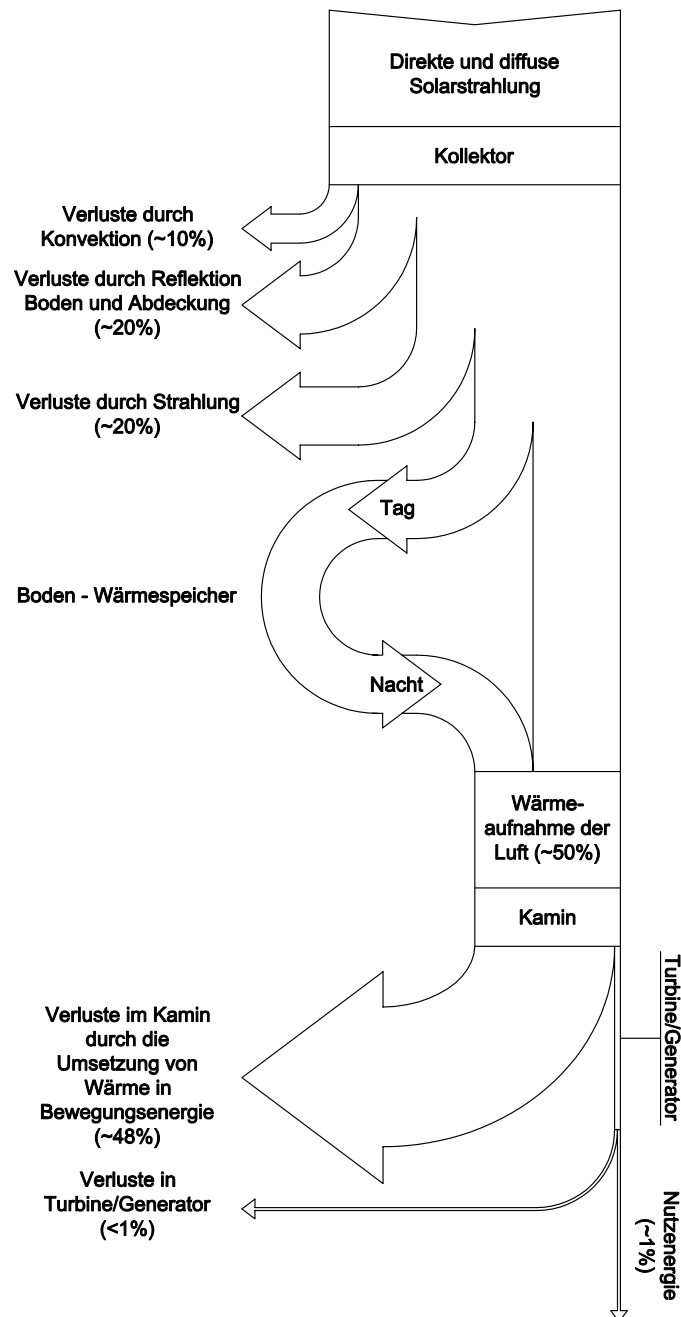


Abb. 2-2: Energiefluss in einem Aufwindkraftwerk.

Die Umsetzung von Wärme in Bewegungsenergie wird von der Außentemperatur (je niedriger, desto besser) und der Kaminhöhe bestimmt. In Aufwindkraftwerken kann die Lufttemperatur nur geringfügig erhöht werden. Deshalb ist der Kaminwirkungsgrad verglichen mit dem des Kollektors und der Turbinen klein und der bestimmende Teil in der Wirkungskette eines Aufwindkraftwerks.

Die kinetische Energie von bewegten Luftmolekülen kann vom Rotor einer Turbine in

Rotationsenergie umgesetzt werden, diese wiederum wird durch den angeschlossenen Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die Energiemenge, welche die Luftströmung im Kamin auf den Rotor überträgt, hängt von der Luftdichte, der Rotorfläche und der Windgeschwindigkeit ab. Die kinetische Energie eines bewegten Körpers ist proportional zu seiner Masse. Deshalb hängt die kinetische Energie der Luftströmung im Kamin von der Luftdichte ab, also von der Masse pro Volumeneinheit. Die Rotorfläche nimmt mit dem Quadrat des Rotordurchmessers zu.

Aufwindkraftwerke zeichnen sich durch große bautechnische Robustheit und einfachste Betriebsführung aus. Nur wenige Komponenten (Kollektorvordach, Windkonverter) bestimmen die Anlagenverfügbarkeit. Für diese Anlagen wird deshalb eine höhere Verfügbarkeit erwartet als für die anderen solarthermischen Anlagen (Parabolrinnen-Kraftwerk, Turmanlage, usw.)

2.3 Realisierte Pilotanlage

Eine 50 kWe Experimentalanlage in Manzanares-Spanien wurde nach der Bau- und Testphase von 1981 bis 1986 und nach Ertüchtigungsmaßnahmen von 1986 bis Anfang 1989 kontinuierlich im Netzverbund betrieben. Nach /Schlaich 1995/ war das Ziel dieses Forschungsvorhabens, die erarbeiteten theoretischen Ansätze messtechnisch zu verifizieren und den Einfluss einzelner Komponenten auf Leistung und Wirkungsgrad des Kraftwerkes unter realistischen bautechnischen und meteorologischen Bedingungen zu untersuchen. Ein Kamin mit 195 m Höhe und 10 m Durchmesser wurde gebaut, umgeben von einem Kollektor mit 240 m Durchmesser. Für die Anlage in Manzanares wurde die kleinste für die großtechnische Nutzung realistische Kollektordachhöhe von zwei Metern gewählt. Unter leistungsorientierten Gesichtspunkten wäre hier freilich eine Dachhöhe von etwa 50 cm optimal gewesen. Deswegen konnten in Manzanares nur 50 kW Leistung erzielt werden. Nach Beendigung der Bauphase im Jahre 1982 schloss sich eine Experimentierphase an, in der das technische Funktionsprinzip eines Aufwindkraftwerks nachzuweisen war und erste Anlagenoptimierungsarbeiten durchgeführt wurden. Nach erfolgreichem Abschluss wurden die gewonnenen Erkenntnisse in technische Verbesserungen einzelner Komponenten umgesetzt mit der Vorgabe, die Anlage in einer zweijährigen Dauerbetriebsphase zu betreiben. Umfangreiche Betriebserfahrungen konnten gesammelt werden (/Schlaich et al. 1990/). Die Anlage erzeugte im Jahr 1987 insgesamt 44,19 MWh.

Da der Prototyp in Manzanares für eine Versuchsdauer von etwa 3 Jahren ausgelegt war und danach wieder spurlos beseitigt werden sollte, wurde sein Kamin als abgespannte Trapezblechröhre konzipiert, die nach Beendigung des Experiments wiederverwertbar sein sollte. Die Blechstärke betrug 1,25 mm, die Sickenntiefe 150 mm; die Bleche waren in vertikaler Richtung im Abstand von 8,6 m gestoßen und alle 4 m durch außenliegende Fachwerkträger ausgesteift. Die Röhre lagerte 10 m über Grund auf einem Ring, der von acht dünnen Rohrstützen unterstützt war, so dass die warme Luft am Kaminfuß fast ungestört einströmen konnte. Als strömungsgünstig geformter Übergang zwischen dem Vordach und dem Kamin diente ein vorgespannter Membranmantel aus kunststoffbeschichtetem Gewebe (/Schlaich 1995/).

Beim Foliendach waren 6 x 6 m große Folien am Rand in Metallprofile eingeklemmt und jedes Feld in der Mitte mit Kunststofftellern und Seilen zum Boden hin verspannt. Beim Glasdach wurden 4 mm dicke Glasscheiben auf schmale Zugbänder im Abstand vom 1 m ge-

klemmt, die von quer dazu verlegten, unterspannten Trägern getragen wurden. Bei beiden Ausführungen war die Dachhaut im 6 x 6 m-Raster von dünnen Stahlstützen so unterstützt, dass der Luftstrom unter dem Dach zum Kamin hin praktisch unversperrt blieb.

Der Kamin war in der Höhe vierfach und in drei Richtungen mit preisgünstigen dünnen Stahlstangen zu den Fundamenten hin abgespannt. Die für solche Bauweisen sonst üblichen Abspannseile oder gar eine frei stehende Betonröhre waren in dem vorgegebenen Kostenrahmen nicht unterzubringen.

Die Montage der Blechröhre des Prototyps wurde mit einem eigens dafür entwickelten Takthebeverfahren ausschließlich vom Boden aus durchgeführt. Die Röhre wurde abschnittsweise mit hydraulischen Pressen angehoben, und gleichzeitig wurden die Abspannungen nach gezogen. Damit sollte gezeigt werden, dass auch hohe Kamine mit wenigen Fachkräften gebaut werden können.

Als Turbine für den Prototyp in Manzanares wurde eine Vertikalachsen-Turbine benutzt, die mit vier Blättern unabhängig vom Kamin in 9 m Höhe auf einem strömungsgünstig verkleideten Stahlfachwerkgerüst lagerte. Nach /Schlaich 1995/ war die Auswahl eines geeigneten Profils für den Rotor und die Bemessung der Rotorblätter einfacher als bei Windenergiekonvertern, weil im Aufwindkraftwerk keine schnellen zeitlichen Änderungen des Anströmzustandes möglich sind und es keine Gefahr der Strömungsablösung gibt. Außerdem konnten die Rotorblätter als konventionelle Glasfaser-Hartschaum-Sandwichschalen gefertigt werden, weil der Rotor im Kamin vor Außeneinflüssen geschützt ist und somit die glatte Blattoberfläche, die maßgebend ist für die aerodynamische Qualität, auf Dauer erhalten bleibt. Die Blätter waren über ein Kennlinienfeld entsprechend der Anströmgeschwindigkeit und der Temperatur der Luft verstellbar, um optimale Druckentnahmefaktoren zu erreichen. Als Übersetzungsgetriebe zwischen Windturbine und Generator wurde ein zweistufiges Stirnradgetriebe mit Nenndrehzahlen von 150 bis 1500 min^{-1} eingesetzt. Sobald die Geschwindigkeit der Luft im Kamin 2,5 m/s überschritt, lief die Turbine selbstständig an und koppelte sich automatisch an das örtliche Netz.

Die Ergebnisse in der Experimentieranlage in Manzanares belegen, dass die entwickelte Technologie einen Entwicklungsstand erreicht hat, der einen kraftwerksähnlichen vollautomatischen Betrieb mit einer hohen technischen Verfügbarkeit erlaubt und die Anlage sehr zuverlässig betrieben werden kann. Die Vorteile dieses Systems – die Nutzung der Globalstrahlung und die thermodynamische Trägheit des Gesamtsystems – ermöglichen einen kontinuierlichen Betrieb über den Tag und puffern auch abrupte Angebotsschwankungen gut ab. Auch an bewölkten Tagen kann die Anlage bei verminderter Leistung durchgehend betrieben werden. Eine nicht unerhebliche Bedeutung für die jährliche Energieausbeute kommt der wärmespeichernden Wirkung des Erdreiches im Vordachbereich zu, die eine Fortsetzung des Turbinengeneratorbetriebes in Teillast nach Sonnenuntergang erlaubt.

3 Systemelemente

Ziel dieses Kapitels ist eine Beschreibung der wesentlichen technischen Grundlagen und eine Ermittlung der Investitionskosten der Komponenten eines Aufwindkraftwerks, die in Kollektor, Kamin und Turbine/Generator unterteilt werden. Die Investitionskosten werden mit Hilfe von Literatur- und Herstellerangaben sowie eigener Abschätzungen ermittelt. Sie dienen für die Auslegung der Referenzanlagen im Kapitel 4.

3.1 Grundlagen

Ein Aufwindkraftwerk besteht grundsätzlich aus den folgenden Komponenten (Abb. 3-1):

- einem Luftkollektor, mit Glas- oder Folienabdeckung,
- einem Kamin,
- einer oder mehrere ummantelte druckgestufte Turbinen,
- Generator und Getriebe.

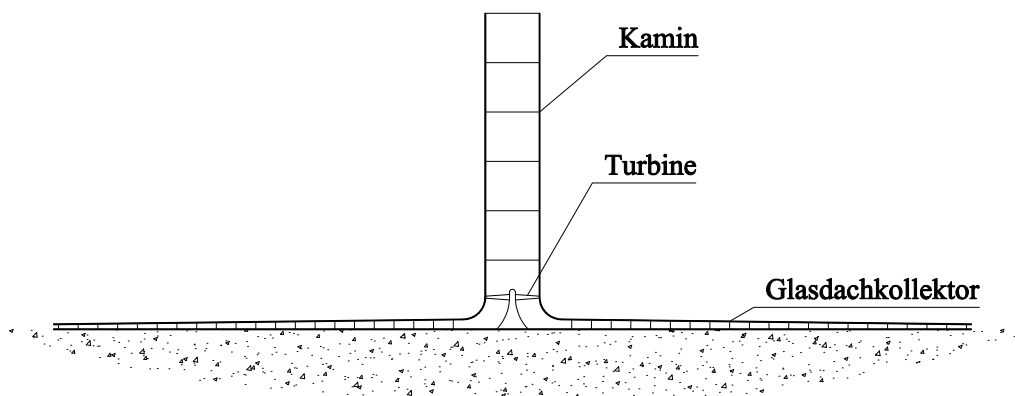


Abb. 3-1: Die wesentlichen Bauteile des Aufwindkraftwerkes: Der Kollektor (ein flaches Folien- oder Glasdach), der Kamin (eine vertikale Röhre mit einer Stützung auf radialen Wänden) und die Turbinen am Fuß der Röhre.

3.2 Kollektor

3.2.1 Technische Grundlagen

Der Treibhauseffekt bei einem Aufwindkraftwerk wird durch einen Luftkollektor mit Glas- oder Folienabdeckung erzeugt, in dem die einfallende Solarstrahlung durch die Abdeckung hindurch auf den Boden trifft, diesen erwärmt und diese Wärme wiederum an das Arbeitsmedium Luft abgeben wird. Die so erwärmte Luft strömt radial durch den Kollektor in Richtung des Kaminfußpunktes und steigt dort auf. Der Boden übernimmt bei einem Aufwindkraftwerk-Kollektor nicht nur die Umsetzung Strahlung in Wärme, sondern dient gleichzeitig als natürli-

cher Energiespeicher, der in den ersten Tagesstunden einen Teil der einfallenden Strahlungsenergie aufnimmt und in der zweiten Tageshälfte, bis in die Nachtstunden hinein, wieder an die den Kollektor durchströmende Luft abgibt. Abb. 3-2 zeigt die täglichen Betriebsstunden des Prototyps Manzanares während des Jahres 1987 und zieht einen Vergleich zwischen den gemessenen Sonnenscheinstunden mit über 150 W/m^2 Einstrahlung und die Tagesstunden von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang. Insgesamt lief die Anlage 3157 Stunden im Jahr, was einer durchschnittlichen täglichen Betriebszeit von 8,8 Stunden entspricht. Dank des Wärmespeichereffekts des Bodens wurden 244 Nachtbetriebsstunden erreicht.

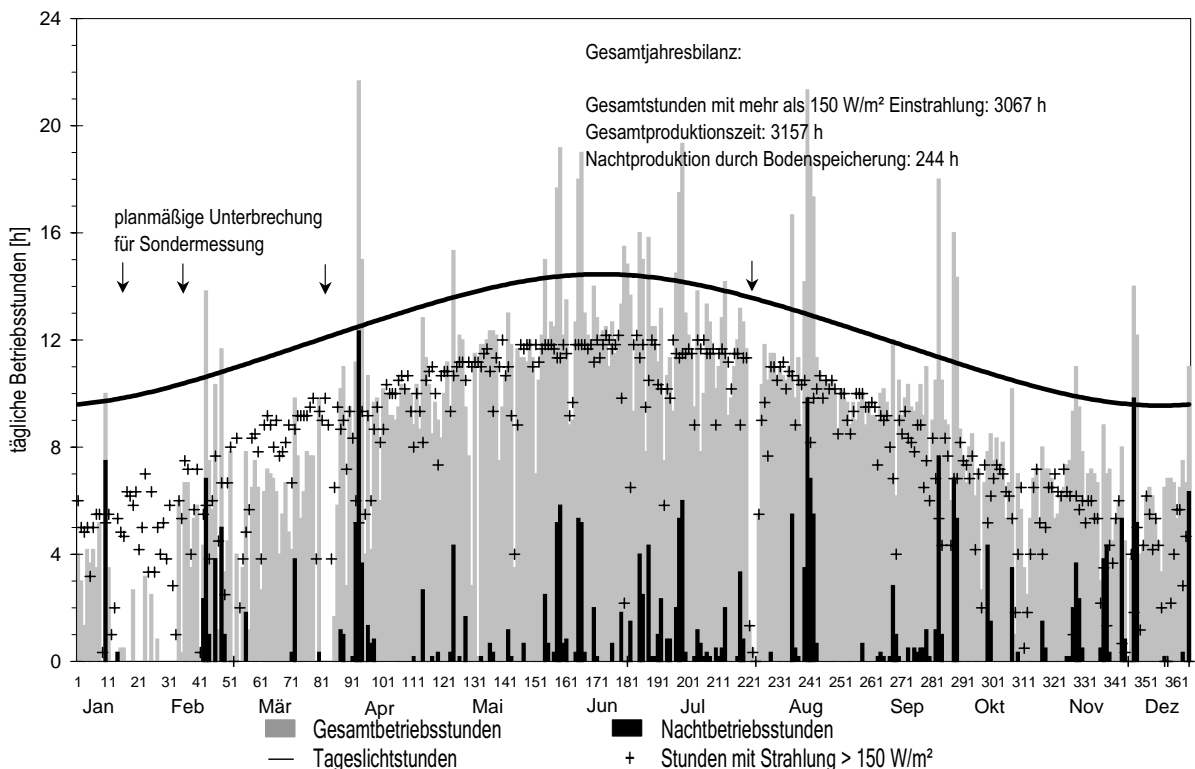


Abb. 3-2: Tägliche Betriebsstunden des Prototyps in Manzanares während des Jahres 1987 (/Schlaich 1995/).

Der Kollektor kann die eingestrahlte Strahlung nicht vollständig in nutzbare Wärme umsetzen. Es treten Verluste durch Reflexion und Konvektion auf. Die auf die lichtdurchlässige Abdeckung des Kollektors im Laufe des Tages auftreffende Strahlung wird zu einem geringen Teil reflektiert, ein weiterer geringerer Teil wird absorbiert und der größte Teil der Strahlung durchdringt die Abdeckung. Die auf der Oberfläche des Absorbers ankommende Strahlung wird ebenfalls zum Teil reflektiert, der Rest wird absorbiert und gespeichert. In der Nacht wird die gespeicherte Wärme an die Luft abgegeben, ein Teil durchdringt die Abdeckung und wird von der Atmosphäre absorbiert (Abb. 3-3).

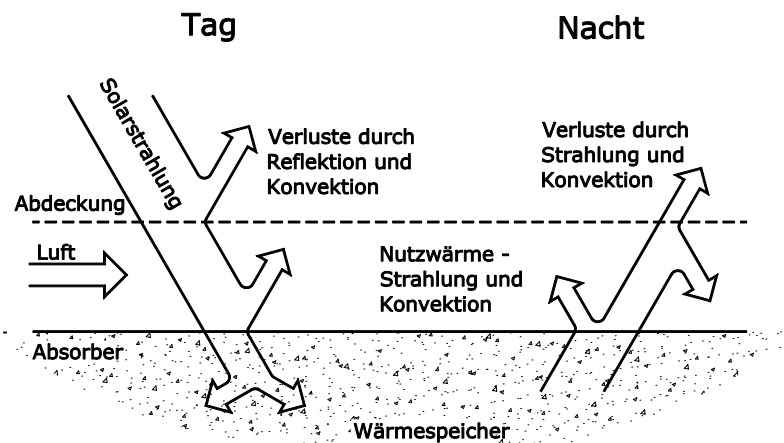


Abb. 3-3: Einstrahlungs- und konvektive Wärmeverluste und Wärmespeicherung am Kollektor

Durch die Kopplung des Kollektors mit dem Kamin entsteht eine Selbstregelung des Massendurchsatzes derart, dass die Temperaturdifferenz im Kollektor in erster Näherung proportional zur einfallenden Globalstrahlung ist. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Wirkungsgradcharakteristik aus, da bei geringen Einstrahlungen auch die Temperaturdifferenz klein bleibt und damit die dominanten temperaturabhängigen Verlustglieder. Davon profitieren auch die Turbinen, die sehr gleichmäßig beaufschlagt werden und nur geringe Druckwechsel zu bewältigen haben.

Wenn die Anlage im Dauerbetrieb (24h/Tag) arbeiten soll, dann muss während der Bescheinungsdauer des Kollektors (Ladezeit) von dem Kollektor nicht nur diejenige Energie aufgenommen werden, die zur Lufterwärmung während der Ladezeit erforderlich ist, sondern darüber hinaus auch noch diejenige Wärmemenge, die nach Beendigung der Ladezeit bis zum Beginn der Ladezeit des nächsten Tages benötigt wird.

Niedertemperaturkollektoren bieten grundsätzlich die Möglichkeit, kostengünstige thermische Speicher einzusetzen. Nach /Kreetz 1997/ kann eine Vergleichmäßigung der Kollektorleistung im tageszeitlichen Verlauf mit einem Wasserspeicher erreicht werden. Diese Speicher können aus einer transparenten Folie für die Oberseite und einer schwarzen Folie für die Unterseite gefertigt werden (s. Abb. 3-4). Tags wird die vom Absorber aufgenommene Energie über Wärmeleitung von unten dem Speicher zugeführt und durch freie Konvektionsströmung gleichmäßig verteilt. Im Laufe der Nacht fließt thermische Energie vom Wasserspeicher in die Luft. /Kreetz 1997/ stellt die technische Realisierungsmöglichkeit sowie eine detaillierte Beschreibung der für einen Wasserspeicher wichtigen Eigenschaften dar. Hierbei wird die vom Absorber aufgenommene Energie über Wärmeleitung von unten dem Speicher zugeführt und durch freie Konvektionsströmung verteilt. Während bei einem Aufwindkraftwerk ohne Wasserspeicher die nicht durch Reflexion, IR-Strahlung und Konvektion verlorene Energie zum größten Teil zur Erwärmung der Luft bereitsteht, wird in der Anlage mit Wasserspeicher bei höherer Wasserschichtdicke und gutem Wärmeübergang in bzw. aus dem Speicher ein Großteil der Energie in den Wasserspeicher geleitet. Abb. 3-5 und Abb. 3-6 stellen den tageszeitlichen Verlauf der Wärmeströme in einem Kollektor ohne bzw. mit Wasserspeicher und die Speicherung in und aus dem Boden, Reflexions-, Konvektions- und IR-Strahlungsverlust und Nutzwärme für einen Sommertag dar. Der Vergleich zeigt, dass eine zusätzliche Wasserspeicherung eine Vergleichmäßigung des tageszeitlichen Verlaufs der Kollektorleistung mit sich bringt.

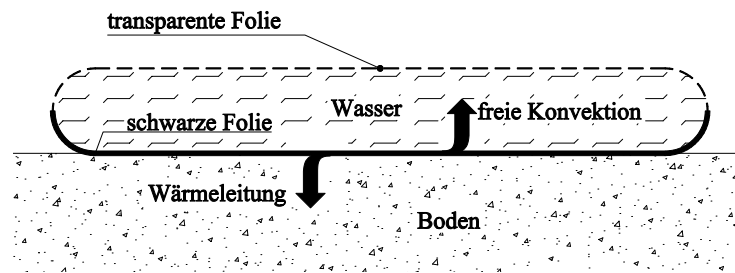


Abb. 3-4: Aufbau und Wirkungsweise eines Wasserspeichers.

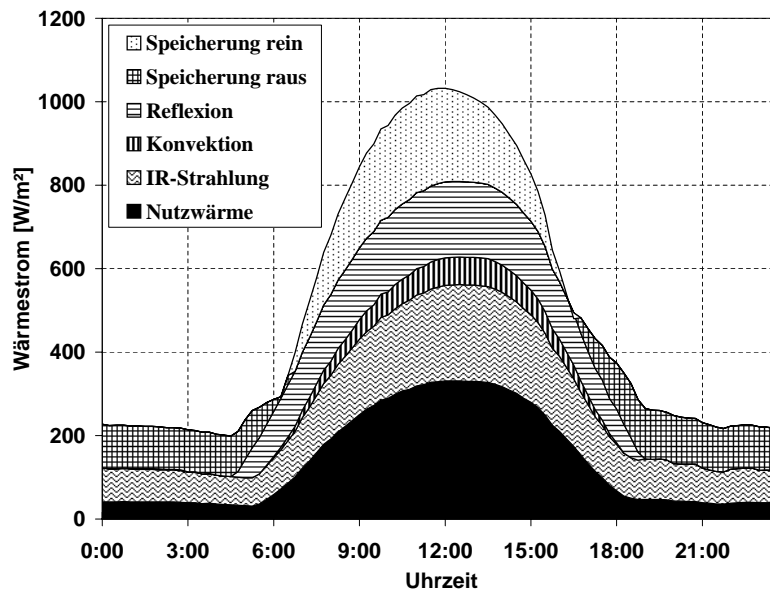


Abb. 3-5: Tageszeitlicher Verlauf der Wärmeströme im Kollektor ohne Wasserspeicher (/Kreetz 1997/).

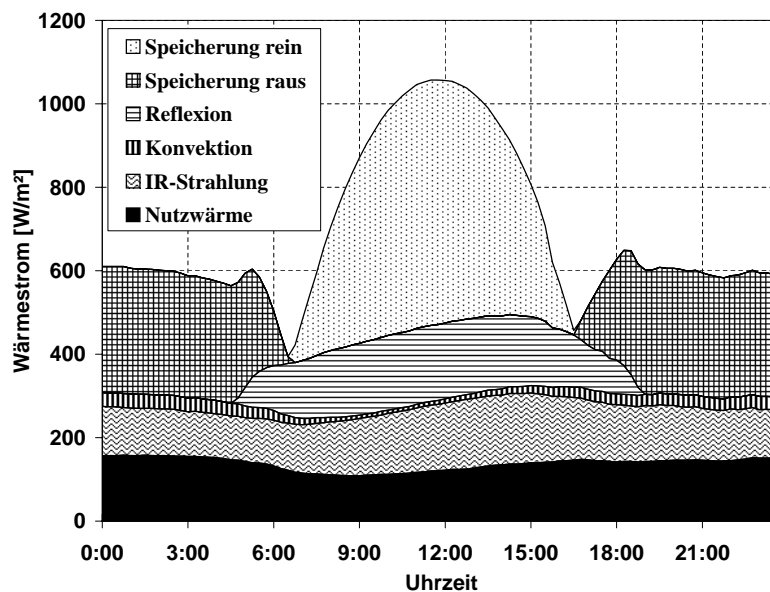


Abb. 3-6: Tageszeitlicher Verlauf der Wärmeströme im Kollektor mit Wasserspeicher; Wärmeübergangskoeffizient $250 \text{ W/m}^2\text{K}$; Wasserschichtdicke 15 cm (/Kreetz 1997/).

Die Betrachtung zur technischen Realisierbarkeit eines Wasserspeichers von /Kreetz 1997/ zeigt eine Materialstudie, in der Kunststoffe und Aluminium auf Materialeigenschaften, Einsatzgebiete und eine mögliche Anwendung als Wasserspeicher hin untersucht wurden, dass Polyethylen für diese Anwendung geeignet ist. Auf die für Polyethylen kritischen Parameter wie Temperatur- und UV-Beständigkeit muss bei der Verwendung jedoch besonderes Augenmerk gerichtet werden. Das untersuchte Aluminium weist Eigenschaften auf, die es für einen solchen Anwendungsfall untauglich erscheinen lassen: höherer Energieverbrauch bei der Herstellung, Undichtigkeiten durch Schweißnähte sowie Korrosion sprechen gegen die Verwendung dieses Materials. Bei der Untersuchung verschiedener Speichervarianten stellt sich eine Präferenz für die Verwendung vieler quadratischer Foliensäcke (ca. 8 x 8 m) oder einem luftmatratzenähnlichen Prinzip sehr großer Länge (50 bis 150 m) heraus.

Die in ariden Zonen unvermeidlichen Staub- oder Sandablagerungen auf dem gläsernen Kollektordach vermindern dessen Wirkung. Nach /Schlaich 1995/ haben die Erfahrungen in Manzanares jedoch gezeigt, dass dieser Kollektor gegen Verstaubung recht unempfindlich ist und selbst die seltenen Regengüsse in Wüsten für eine ausreichende Selbstreinigung genügen. Der Kollektor eines Aufwindkraftwerks kann bei kontinuierlicher Wartung ohne weiteres 60 Jahre und mehr betrieben werden.

Die Randbereiche des Kollektors können ohne zusätzlichen Aufwand und ohne wesentliche Leistungseinbuße zudem als Gewächshaus oder zur Trocknung von Pflanzen genutzt werden. Nach /Mahr 1991/ gibt es auch die Möglichkeit, den in einer Aufwindanlage erzeugten warmen Luftstrom zum Trocknen von landwirtschaftlichen Produkten heranzuziehen. In dieser Arbeit wurde die Erzeugung des Warmluftstroms in solaren Aufwindtrockern experimentell (drei verschiedene Anlage wurden konzipiert, erbaut und erprobt) und theoretisch/numerisch untersucht.

3.2.2 Kollektorkonstruktion

Bei Großanlagen wurden wegen der dort nötigen größeren Dachhöhe das Stützenraster auf 9 x 9 m erhöht und für die Sprossenprofile einfache Flachstahlbänder vorgesehen, auf die dann die 4 mm dicken und ca. 1 m x 1,5 m x 4 mm großen Einzelglasscheiben aufgeklemt werden (Abb. 3-7). Diese Profile können wegen der Zugbandwirkung sehr materialsparend dimensioniert werden. Die Tragkonstruktion des Vordaches wurde so entworfen, dass auch ein Einsatz von Doppelverglasung, für den Fall, dass dies an einem bestimmten Standort sinnvoll wäre, ohne Konstruktionsänderung oder Stahlmengenerhöhung möglich ist. Als Fundament besitzen die Stützen ein 1,3 bis 1,5 m langes zylindrisches Stahlbetonelement mit einem Durchmesser von 0,3 bis 0,5 m, wobei der Durchmesser und die Länge des Fundaments abhängig vom Durchmesser des Kollektors sind.

Beim Kollektorvordach des Prototyps in Manzanares wurden mehrere Konstruktions- und Eindeckungsvarianten unter extremen Klima- und Beanspruchungsbedingungen getestet und ausgewertet (/Schlaich et al. 1990/). Dabei zeigte sich, dass die dort gebaute leichte Stahlkonstruktion mit Glaseindeckung auch unter extremen Bedingungen ein Optimum an Dauerhaftigkeit, Wartungsaufwand und Wirtschaftlichkeit darstellt. Es gibt also keine Argumente gegen einen Einsatz dieses Konstruktionsprinzips auch bei Großanlagen.

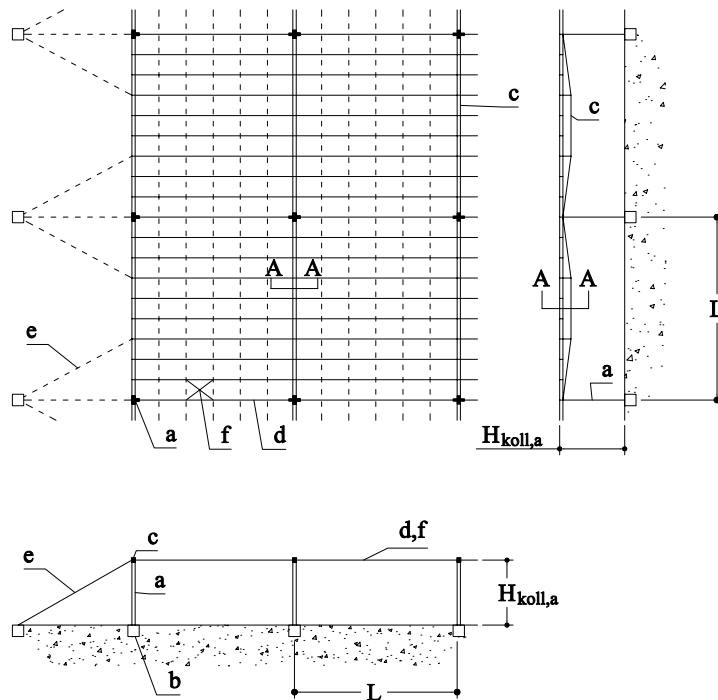


Abb. 3-7: Vordachkonstruktion mit Glaseindeckung. Konstruktionsdetails: Stahl- (oder Betonfertigteil-) Stützen (a) in Betonfundamenten (b) im quadratischen Abstand von $L=9$ Metern tragen in einer Richtung unterspannte Träger (c) (Querschnitt A-A). Dazwischen hängen in Querrichtung im Abstand von 1 Meter Flachstäbe (d) mit Abspannungen (e) am äußeren Dachrand. Auf die Flachstäbe (d) sind 4 mm- Glasscheiben (f) aufgeklemt, eine Lage (wie im Querschnitt A-A gezeigt) oder zwei Lagen (/Schlaich 1995/).

3.2.3 Investitionskosten für den Kollektor

Die Investitionskosten sind nach /VDI Richtlinien 1991/ wie folgt definiert: Investitionskosten sind die einmaligen, zu Beginn einer Investition anfallenden Kosten für die Beschaffung von Sachvermögen oder auch Finanzvermögen.

Die Abschätzung der Kollektorkosten basiert auf den Kosten der Materialien zur Herstellung des Vordachs. Diese Komponenten bestehen grundsätzlich aus Stahl, Beton und Glas. Das Vordach in Manzanares wurde zu einem Preis von 23,- €/m² realisiert, wobei lediglich 6000 m² gebaut wurden. Um die Kollektorkosten zu ermitteln, wurde die folgende Gleichung für die obige Konstruktionsweise hergeleitet

$$a = c_1 P_S + c_2 P_G + c_3 P_B + c_4 P_W \quad (3-1)$$

wobei

a : spezifische Kollektorkosten [€/m²]

c_1 : spezifische Menge von Stahl [$\text{kg}_{\text{Stahl}}/\text{m}^2$]

c_2 : spezifische Menge von Glas [$\text{m}_{\text{Glas}}^2/\text{m}^2$]

c_3 : spezifische Menge von Beton [$\text{m}_{\text{Beton}}^3/\text{m}^2$]

c_4 : spezifische Menge von Trapezblech [$\text{m}_{\text{Trapezblech}}^2/\text{m}^2$]

P_S : Preis von Stahl [$\text{€}/\text{kg}_{\text{Stahl}}$]

P_G : Preis von Glas [$\text{€}/\text{m}^2_{\text{Glas}}$]

P_B : Preis von Beton [$\text{€}/\text{m}^3_{\text{Beton}}$]

P_W : Preis von Trapezblech [$\text{€}/\text{m}^2_{\text{Trapezblech}}$]

3.3 Kamin

3.3.1 Technische Grundlagen

Der Kamin bei einem Aufwindkraftwerk setzt Wärmeenergie in kinetische Energie um und gleichzeitig wegen des großen Volumen/Oberflächenverhältnisses eine sehr reibungs- und verlustarme Druckröhre, vergleichbar dem Druckrohr bei Wasserkraftwerken. Der Auftrieb der im Kollektor erwärmten Luft verursacht über den Kamin ein Gesamtdruckgefälle. Dieses Druckgefälle ist in erster Näherung proportional der im Kollektor erzeugten Temperaturdifferenz und der Höhe des Kamins. Die Umsetzung von Wärme in Bewegungsenergie ist von der im Kollektor erzeugten Temperaturdifferenz unabhängig und wird nur bestimmt von der Außentemperatur und der Kaminhöhe. Der Auftrieb der im Kollektor erwärmten Luft verursacht über den Kamin ein Gesamtdruckgefälle, das sich wie folgt angeben lässt:

$$\Delta p_{ges} = gH \frac{\Delta T}{T_0} \rho \quad (3-2)$$

wobei T_0 die Umgebungstemperatur ist. Der theoretisch maximal mögliche Wirkungsgrad für die Umsetzung von Wärme in Druck ist von dem ΔT des Kollektors unabhängig und wird nur bestimmt von der Kaminhöhe. Er lässt sich wie folgt schreiben:

$$\eta_t = \frac{\dot{m} \Delta p_{ges}}{\dot{m} c_p \Delta T} = \frac{gH}{c_p T_0} \quad (3-3)$$

Dieser Wirkungsgrad ist verglichen mit anderen solarthermischen Anlagen klein und erreicht bei hohen Kaminen (1000 m) nur maximal ca. 3%. Damit ist der Kaminwirkungsgrad der bestimmende Teil in der Wirkungsgradkette eines Aufwindkraftwerks und ist beeinflussbar über die Kaminhöhe und abhängig von der atmosphärischen Temperaturschichtung, wobei diese von den örtlichen meteorologischen Bedingungen vorgegeben ist.

3.3.2 Kaminkonstruktion

Für Kamine von Aufwindkraftwerken sind sehr unterschiedliche Bauweisen möglich. Diese Kamine können freistehend oder abgespannt, aus Stahlbeton oder als Stahlkonstruktion, in Seilnetz- oder Membranbauweise oder als Mischkonstruktion hergestellt werden (Abb. 3-8). All diese Bauteile sind im Prinzip bautechnisch erprobt und müssen nicht erst neu entwickelt

werden. Sie müssen allerdings auf größere Kaminhöhen übertragen werden.

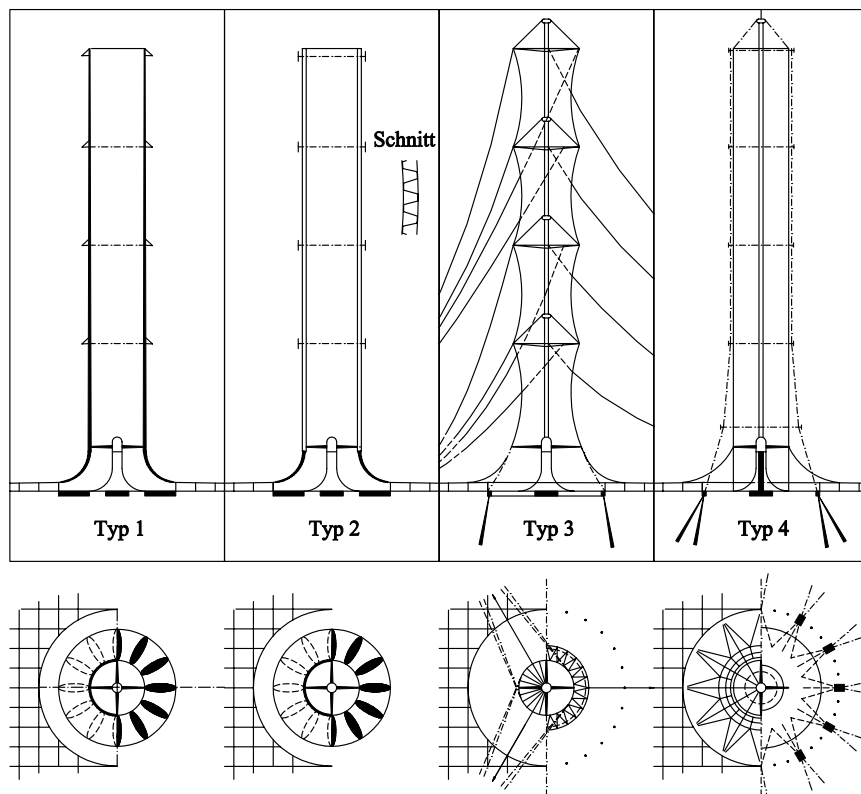


Abb. 3-8: Typ 1: Kaminvariante in Betonbauweise - Kamin in Massivbauweise; Typ 2: Trapezblechröhre in Sandwichbauweise auf Betonfußkonstruktion - Kamin in Leichtbauweise, Stahlblechröhre gelagert auf einer Betonstützkonstruktion; Typ 3: Kaminvariante in Membranbauweise - Kamin in Leichtbauweise, Membrankamin; Typ 4: Sonderkonstruktion „Blechröhre“ mit Seilverspannungen - Kamin in Leichtbauweise, Aufgehängte Stahlblechröhre (nach /Schlaich et al. 1990/)

Weil der Entwurf eines solchen Bauwerks vom Baugrund, den Wind- und Klimabedingungen und vor allem von der zu erwartenden Erdbebenstärke abhängt, sind genauere Kostenermittlungen sowie eine detaillierte Auslegung erst möglich, wenn ein konkreter Standort gewählt wird. Erst dann kann auch über die Wahl einer bestimmten Bauweise entschieden werden, da Infrastruktur, Verfügbarkeit von Baustoffen und darauf abgestimmte Bauwerks- und Montagekonzepte direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit besitzen.

Die Untersuchungen zeigten, dass für die denkbaren Standorte jeweils geeignete und sinnvolle Bauweisen zur Verfügung stehen und nach infrastrukturabhängigen, wirtschaftlichen und wartungstechnischen Gesichtspunkten ausgewählt werden können.

3.3.3 Investitionskosten für den Kamin

Die Kaminkosten sind in erster Linie abhängig von den Turmabmessungen. Das Bauprinzip, die Standortgegebenheiten und die Bauausführung sind dabei von untergeordneter Bedeutung. In Abb. 3-9 und Tabelle 3-1 sind die ermittelten Kaminkosten für eine Betonausführung (Typ 1) in Abhängigkeit der Kaminhöhe und des Kamindurchmessers aufgetragen (/Arbeitsgruppe „Aufwindkraftwerke“ 1997/).

Um die Kaminkosten zu ermitteln, wurde die Gleichung (3-4) durch multiple lineare Re-

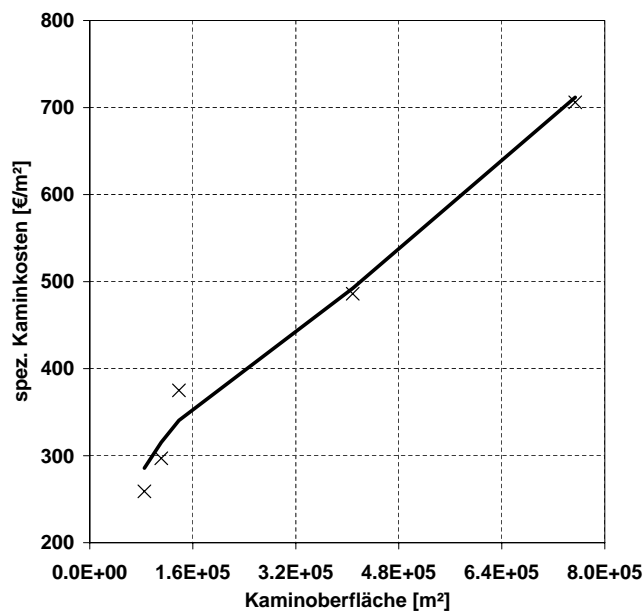
gression nach den Daten von /Arbeitsgruppe „Aufwindkraftwerke“ 1997/ formuliert. Die Abweichungen dieser Gleichung sind in Tabelle 3-1 gezeigt. Bei der Erhöhung der Kaminoberfläche nehmen die Kaminkosten zu.

$$b = 3,539 \times 10^1 + 2,315 \times 10^{-1} H - 1,223 \times 10^{-1} D_t \quad [\text{€/m}^2] \quad (3-4)$$

wobei b den Kaminkosten bezogen auf die Kaminoberfläche angibt.

Tabelle 3-1: Kaminkosten

H [m]	D_t [m]	Oberfläche [m ²]	spez. Kaminkosten [€/m ²]	Gleichung (3-4) [€/m ²]	Abweichung [%]
500	54	84800	132	145	9,1
570	62	111000	152	160	5,2
630	70	139000	192	173	10,0
750	84	198000	204	199	2,6
1000	130	408000	248	251	1,0
1500	160	754000	361	363	0,6



× spez. Kaminkosten [€/m²] (/Arbeitsgruppe „Aufwindkraftwerke“ 1997/)
— Gleichung 3-4

Abb. 3-9: Spezifische Kaminkosten.

3.4 Turbine und Generator

3.4.1 Technische Grundlagen

Ein Aufwindkraftwerk verlangt als Turbine einen ummantelten druckgestuften Läufer, der damit nicht vergleichbar mit einer geschwindigkeitsgestuften Freiland-Windturbine ist, bei der

der maximale Wirkungsgrad durch den Betz-Faktor bestimmt wird. Kritische dynamische Belastungen von Blättern, Naben und Verstelleinrichtungen, wie sie bei Freiland-Turbinen auftreten, sind bei der Verwendung in Aufwindkraftwerken nicht gegeben, da der Kollektor schnelle Druck- und Geschwindigkeitsänderungen gut abpuffert. Dadurch wird der konstruktive und kostenmäßige Aufwand für diese Komponente erheblich reduziert.

Die aerodynamischen Verhältnisse um den Kamineintritt erlauben sowohl die Anordnung einer einzigen Turbine mit vertikaler Achse und einem Blattradius, der dem Kaminradius entspricht, als auch die vertikale Anordnung mehrerer kleinerer Turbinen, die im Übergangsbereich Kollektor - Kamin mit horizontaler Lagerung aufgestellt werden, ähnlich wie bei den nahezu baugleichen Kühlturmventilatoren (Abb. 3-10). Als Generator und Getriebe können solche konventioneller Bauart eingesetzt werden wie in verwandten Anwendungsbereichen üblich: sie unterliegen keinen besonderen Anforderungen.

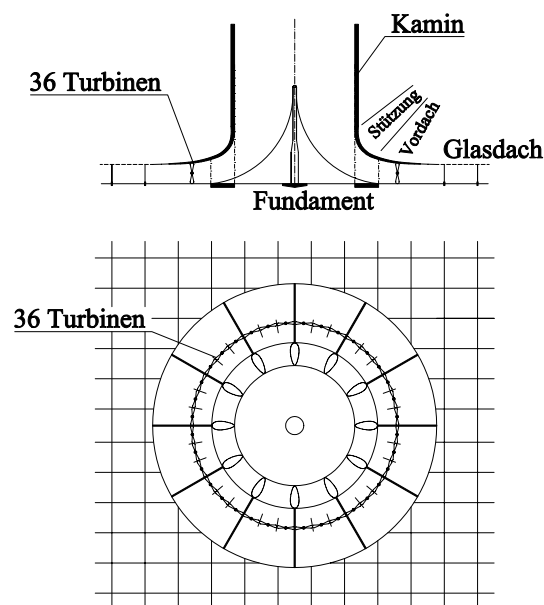


Abb. 3-10: Kaminfuß mit zahlreichen Horizontalachsen-Windturbinen am Umfang der Kaminstützung.

3.4.2 Investitionskosten für den Turbosatz

Zum Turbosatz (Turbine und Generator) zählen Rotorblätter, Triebstrang, Generatoren, Elektroanlage und Netzeinspeisung. Die Investitionskosten für den Turbosatz gibt Tabelle 3-2 wieder. Diese Kosten entsprechen im wesentlichen einem Kostenvergleich von verschiedenen solarthermischen Anlagen nach /Schlaich et al. 1990/.

Tabelle 3-2: Turbinen, Generatoren und Elektroanlage

Leistungsklasse [MW]	5	30	100
Investitionskosten [Mio. €]	5,10	29,3	81,6
spez. Turbosatzkosten [€/kWe]	1010	978	816

Da die in den 80er und 90er Jahren zunehmende Entwicklung der Bautechnologie von Windkraftanlagen zu einer Senkung der Kosten des Maschinenteils geführt haben, wurden in dieser Studie die Investitionskosten für die Turbinen (inklusive Rotorblatt, Nabe, Stelleinrichtung, Mechanik, Generator und Steuerung) zu 767 €/kWe gemäß /Schiel und Schlaich 1988/ angesetzt.

4 Auslegung der Referenzanlagen

In diesem Kapitel werden die im weiteren Verlauf der Arbeit zu analysierenden Referenzsysteme definiert, die unter Anwendung von bekannten Optimierungsverfahren ermittelt werden. Der Referenzanlagenansatz besteht darin, jede Anlage einer homogenen Anlagenkategorie zuzuweisen, wobei jede Anlagenkategorie durch eine durchschnittliche bzw. repräsentative Anlage, eine sog. Referenzanlage, repräsentiert wird.

Das einfache physikalische Prinzip von Aufwindkraftwerken und die Erfahrung mit dem Prototyp in Manzanares erlauben verlässliche Vorhersagen über die zu erwartende Stromerzeugung. Die Kombination von einfachen Komponenten (Kollektor, Kamin und Turbine/Generator) macht die Kosten überschaubar und lässt die Realisierung von Großkraftwerken zu. Ausgangspunkt der technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse ist eine Referenzanlage zur Stromerzeugung, an der sich alle Aspekte der rechnergestützten Auslegung und Projektierung von Anlagen untersuchen lassen. Grundsätzlich führen ein größerer Kollektor und Kamin zu höherer Stromerzeugung aber auch zu höheren Kosten. Deshalb wird im Folgenden eine Untersuchung durchgeführt, um die maximale Anlagenleistung bei Minimierung der Investitionskosten und gegebener Generatorleistung zu ermitteln. Damit sollen Anlagegröße und -kosten optimiert werden. So lassen sich Referenzanlagen ableiten, anhand derer die Arbeitsschwerpunkte der technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse des Aufwindkraftwerks vorgenommen werden können.

Detaillierte technische und ökonomische Analysen der Referenzsysteme werden in den Kapiteln 5 und 6 durchgeführt.

4.1 Auslegungsmodell

4.1.1 Physikalische Grundlage zum Auslegungsmodell

Bei der Modellformulierung von /Kiera 1988/ wurde ausgenutzt, dass bestimmte Wirkungsgrade eines Aufwindkraftwerks inhaltlich oder formal mit denen anderer Solaranlagen, z. B. von Photovoltaik- bzw. Turmanlagen, verwandt sind. Ähnliche Modellansätze wurden bereits benutzt, um die Messdaten der Anlage von Manzanares anzupassen bzw. zu interpretieren. Die folgenden Annahmen wurden getroffen:

- die Aufwärmspannen ΔT im Vergleich zur absoluten Umgebungstemperatur T_0 sind kleiner als 10%
- der Abstand zwischen Abdeckung und Boden ist konstant
- die Wärmeübertragung im Boden wurde vernachlässigt, weil die Bilanzierung der Wärmetransport im Boden im Laufe eines langen Zeitraums gleich null ist
- isobare Erwärmung der Luft im Kollektor von T_0 auf $T_0 + \Delta T$
- adiabatische Expansion der erwärmten Luft im Kamin auf den atmosphärischen Druck p_H an der Kaminspitze in der Höhe H
- isobare Abkühlung auf die Temperatur T_H in der Höhe H

- adiabatische Kompression auf den atmosphärischen Druck p_0 am Kollektoreintritt
- Die Reibungsverluste in der Anlage werden über den Druckverlustbeiwert ξ berücksichtigt, der nur von der Anlagengeometrie abhängt
- die maximale Leistung wird entnommen, wenn $2/3$ der gesamten Druckdifferenz an der Turbine abfallen. Die Leistung $P = \dot{V} \Delta p_s$ ist gleich dem Flächeninhalt des dargestellten Rechtecks (Abb. 4-1). Sie verschwindet bei Δp_s gleich Null (Kurzschluss in der elektrischen Analogie) und bei Δp_s gleich Δp_{ges} (Leerlauf). Zwischen diesen Grenzfällen nimmt P ein Maximum an, und zwar

$$u_{max} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\Delta p_{ges}}{\rho}} \quad (4-1)$$

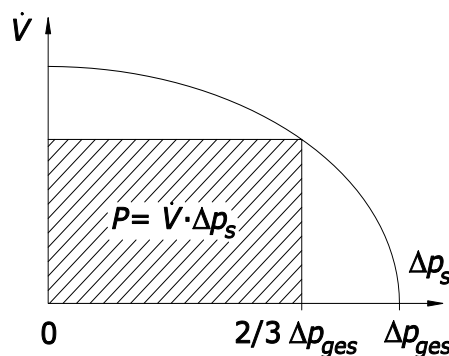


Abb. 4-1: Kennlinie von Druckabfall und Volumenstrom

Nach /Kiera 1988/ folgt damit für die Leistung

$$P = \frac{\rho g H_t \alpha A_c A_t G}{T_0 (\beta A_c + \rho c_p A_t v)} v - \rho (1 + \xi) v^3 A_t. \quad (4-2)$$

wobei

α : effektive solare Absorptivität des Kollektors [-]

β : thermischer Verlustkoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

ρ : Dichte [kg/m^3]

ξ : Reibungsverlustbeiwert [-]

c_p : spezifische Wärmekapazität [J/kgK]

g : Erdbeschleunigung [m^2/s]

G : Globalstrahlung [W/m^2]

T_0 : Umgebungstemperatur [K]

A_c : Fläche des Kollektors [m^2]

A_t : Fläche des Kamins [m^2]

Die Luftgeschwindigkeit für die maximale Leistung erhält man durch

$$\frac{\partial P}{\partial v} = 0 \quad (4-3)$$

oder

$$\frac{-\rho^2 g H \alpha A_c A_t^2 G v c_p}{T_0 (\beta A_c + \rho c_p A_t v)^2} + \frac{\rho g H \alpha A_c A_t G}{T_0 (\beta A_c + \rho c_p A_t v)} - \frac{3}{2} \rho (1 + \xi) v^2 A_t = 0 \quad (4-4)$$

Isoliert man v in der Gleichung (4-4), so erhält man die maximale Geschwindigkeit v^*

$$v^* = \frac{1}{6 \rho c_p D_t^2 T_0 (1 + \xi)} (A_3 - \sqrt{3} \sqrt{A_2}) \quad (4-5)$$

wobei

$$A_1 = T_0 (1 + \xi) g H \alpha G \beta \quad (4-6)$$

$$A_2 = D_c^2 T_0 (1 + \xi) (A_3 \beta + 4 \sqrt{3} \sqrt{2} \sqrt{A_1} \rho c_p D_t^2) \quad (4-7)$$

$$A_3 = 3 \beta D_c^2 T_0 (1 + \xi) \quad (4-8)$$

und damit die maximale Leistung P^*

$$P^* = \frac{1}{48} \frac{\pi D_c^2 ((1 + \xi) (\beta D_c^2 T_0 \sqrt{6 A_1} + 12 g H \alpha G T_0 c_p \rho D_t^2) - \sqrt{2 A_1 A_2}) (-A_3 + \sqrt{3 A_2})}{\rho D_t^2 c_p^2 T_0^2 (1 + \xi) (A_3 + \sqrt{3 A_2})} \quad (4-9)$$

Im Kollektor stellen sich die Aufwärmspanne ΔT und der Kollektorwirkungsgrad η_c wie folgt ein:

$$\Delta T = \frac{\alpha D_c^2 G}{\beta D_c^2 + \rho c_p v D_t^2} \quad (4-10)$$

$$(4-11)$$

$$\eta_c = \alpha - \frac{\beta \Delta T}{G} \quad (4-12)$$

Das Druckgefälle Δp ist gegeben durch

$$\Delta p = \frac{\rho g H \Delta T}{T_0} = \frac{\rho g H \alpha D_c^2 G}{(\beta D_c^2 + \rho c_p v D_t^2) T_0} \quad (4-13)$$

4.1.2 Kostenmodell zum Auslegungsmodell

Für die Investitionskosten bei einer Auslegungsleistung P_0 wird eine Gleichung benutzt, die gemäß /Haaf et al. 1986/ näherungsweise gilt:

$$K = a \frac{1}{4} \pi D_c^2 + b \pi D_t H + c P_0 \quad (4-14)$$

wobei

a : spezifische Kollektorkosten (€/m² Kollektorfläche) - Gleichung (3-1)

b : spezifische Kaminkosten (€/m² Kaminoberfläche) - Gleichung (3-4)

c : Maschinenkosten (€/kWe installierter Leistung)

Die Koeffizienten c_1 bis c_4 für die die Berechnung der spezifischen Kollektorkosten (Gleichung (3-1)) sind in der Tabelle 4-1 nach /Büro Schlaich Bergermann und Partner 2002/

gegeben.

Tabelle 4-1: Spezifische Mengen von Materialien für den Bau des Kollektors - Koeffizienten für die Gleichung (3-1)

Koeffizient	Werte
c_1	5,089 kg _{Stahl} /m ²
c_2	1,340 m ² _{Glas} /m ²
c_3	1,859×10 ⁻³ m ³ _{Beton} /m ²
c_4	9,345×10 ⁻³ m ² _{Wellblech} /m ²

Führt man die folgenden Parameter in die Gleichung (3-1) ein

$$P_S = 1,02 \text{ €/Kg}_{\text{Stahl}}$$

$$P_G = 2,56 \text{ €/m}_{\text{Glas}}^2$$

$$P_B = 503,64 \text{ €/m}_{\text{Beton}}^3$$

$$P_W = 30,68 \text{ €/m}_{\text{Wellblech}}^2$$

erhält man $a = 9,85 \text{ €/m}^2$ für die spezifischen Kollektorkosten.

4.1.3 Anlagenoptimierung

Zur Anlagenoptimierung wird in dieser Arbeit die Methode des Optimierungsverfahrens mit nichtlinearen Beschränkungen eingesetzt. Die Berechnung der maximalen Anlagenleistung wird durchgeführt, an die sich die Minimierung der Investitionskosten bei gegebener Generatorleistung P_0 im Auslegungspunkt anschließt. Dies führt nach der Methode der Lagrange-Multiplikatoren auf folgende Funktion Φ und Nebenbedingungen λ :

$$\Phi = K - \lambda(\eta_M P^* - P_0) \quad (4-15)$$

wobei für η_M der Maschinenwirkungsgrad einzusetzen ist.

Die Lösung der Gleichung (4-15) führt auf das folgende nichtlineare Gleichungssystem

$$\begin{aligned} \frac{\partial P^*}{\partial D_c} - t \frac{\partial K}{\partial D_c} &= 0 \\ \frac{\partial P^*}{\partial D_t} - t \frac{\partial K}{\partial D_t} &= 0, \\ \frac{\partial P^*}{\partial H} - t \frac{\partial K}{\partial H} &= 0 \\ P_0 - \eta_M P^* &= 0 \end{aligned} \quad (4-16)$$

das mit Hilfe von Standardverfahren (/Press et al. 1992/) numerisch gelöst werden kann.

4.2 Referenzsysteme

Um das Gleichungssystem (4-16) zu lösen, wurden die folgenden Umwelt-, Stoff- und Kollektordaten eingesetzt, die approximativ den Werten aus dem Prototyp von Manzanares entsprechen

$$G = 800 \text{ W/m}^2$$

$$T_0 = 303 \text{ K}$$

$$\rho = 1,148 \text{ kg/m}^3 \text{ (bei 303 K)}$$

$$c_p = 1007 \text{ J/kg}\cdot\text{K (bei 303 K)}$$

$$\alpha = 0,7$$

$$\beta = 7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$\xi = 0,13$$

$$\eta_M = 0,75$$

Die Auslegungsleistung P_0 wurde im Bereich von 5000 kWe bis 100 MWe variiert. Nach der Lösung des Gleichungssystems (4-16) ergeben sich für drei Referenzsysteme, die in Tabelle 4-2 angegebenen Daten.

Tabelle 4-2: Referenzsysteme

Auslegungsleistung P_0	Durchmesser		Kaminhöhe	Aufwindgeschw.	Aufwärmspanne	Kollektorkwirk.	spez. Inst. Kosten
	Kamin	Kollektor					
[MWe]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[K]	[%]	[10^3 €/kWe]
5	46	1600	370	10,0	33,7	40,5	5,21
30	75	3130	600	13,3	35,1	39,0	3,32
100	110	4950	850	16,0	36,2	38,0	2,47

In Abb. 4-2 sind die geometrischen, thermischen und hydrodynamischen Parameter sowie die spezifischen Installationskosten in Abhängigkeit der Auslegungsleistung P_0 dargestellt. Durchmesser und Höhe des Kamins sowie der Kollektordurchmesser wachsen mit P_0 näherungsweise nach einem Potenzgesetz, dessen Exponent ca. 0,27 bzw. 0,37 beträgt. Gleichzeitig fallen die spezifischen Installationskosten wie $40P_0^{-0,23}$. Weil aus wachsender Leistung hohe Kamine mit großem Durchmesser resultieren, ändern sich die dynamischen Anlagenparameter ΔT , und η_c nur wenig mit P_0 .

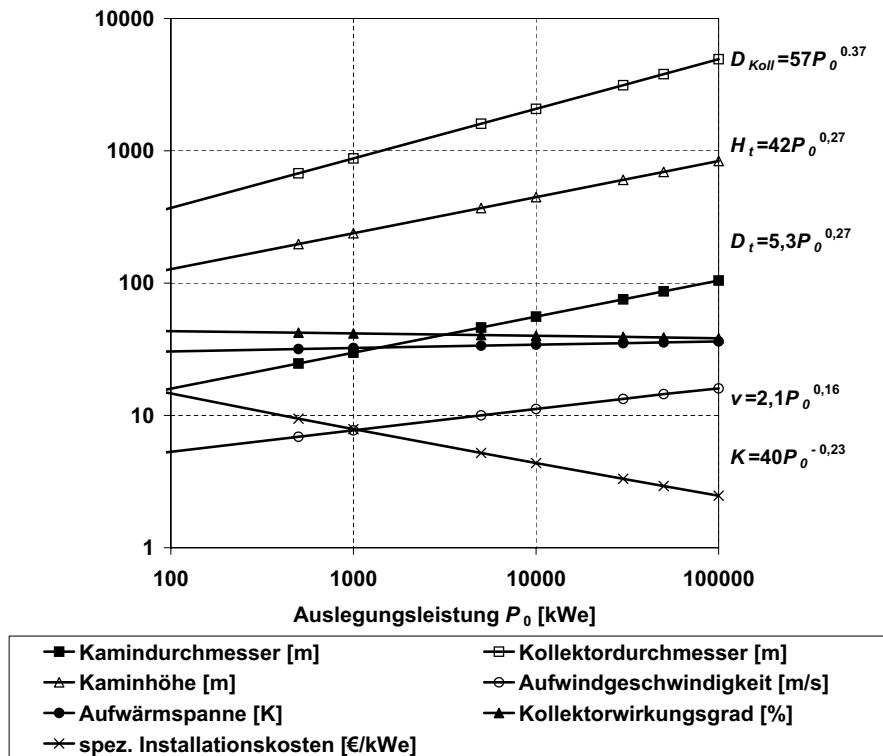


Abb. 4-2: Variation der Anlagenparameter als Funktion der Auslegungsleistung

4.3 Sensitivitätsanalyse

Da die für die Referenzsystemen unterstellten optischen und thermischen Eigenschaften des Prototyps in Manzanares sowie die spezifischen Kosten nicht notwendigerweise auf andere Anlagen übertragbar sind, werden in einer Parametervariation die folgenden Kenngrößen untersucht:

- effektive Absorptivität $\alpha = 0,8$ und $0,6$
- thermische Verluste des Kollektors $\beta = 7 \pm 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Reibungsverluste im Kollektor $\xi = 0,13 \pm 0,05$
- spezifische Kollektorkosten $a = 9,85 \pm 3 \text{ €/m}^2$

Für das Beispiel einer Auslegungsleistung von 30 MWe ergeben sich die in Tabelle 4-3 dargestellten Geometrie- und Kostendaten. Eine Erhöhung des Kollektorwirkungsgrads bzw. eine Senkung der spezifischen Kollektorkosten und der thermischen Verluste des Kollektors bewirken die Reduzierung der relevanten Geometrieparameter sowie der spezifischen Installationskosten. Die Variationen der Reibungsverluste im Kollektor ergeben keine große Veränderung. Die Ergebnisse machen deutlich, dass eine verlässliche Anlagendimensionierung die Kenntnis sämtlicher physikalischer und ökonomischer Randbedingungen voraussetzt.

Tabelle 4-3: Parametervariationen

α	β	ξ	a	Durchmesser		Kamin- höhe	spez. Inst. Kosten
				Kamin	Kollektor		
[-]	[W/m ² K]	[-]	[€/m ²]	[m]	[m]	[m]	[T€/kWe]
0,7	7,0	0,13	9,85	75	3130	600	3,3
0,6	7,0	0,13	9,85	80	3300	640	3,7
0,8	7,0	0,13	9,85	72	2990	570	3,0
0,7	5,0	0,13	9,85	66	2950	530	2,8
0,7	9,0	0,13	9,85	93	2600	745	3,2
0,7	7,0	0,08	9,85	71	2990	570	3,0
0,7	7,0	0,18	9,85	72	2990	575	3,0
0,7	7,0	0,13	12,85	75	2840	600	2,9
0,7	7,0	0,13	6,85	68	3220	550	3,3

Das hier angewendete Rechenmodell erlaubt eine schnelle Abschätzung der optimalen Anlagengrößen in Abhängigkeit der Auslegungsleistung. Es enthält einige Annahmen, die einer Überprüfung bedürfen. Eine exaktere Beschreibung des physikalischen Verhaltens eines Aufwindkraftwerks unter gegebenen meteorologischen Randbedingungen und bautechnischen Abmessungen ist nur mit einem umfangreichen thermo- und strömungsdynamischen Simulationsprogramm möglich. Im Kapitel 5 wird ein solches Simulationsprogramm entwickelt.

5 Technische Analyse

Im folgenden Abschnitt wird die Modellierung des Luftzustandes in dem beschriebenen solarthermischen Aufwindkraftwerk erläutert. Von Anfang an wurde darauf geachtet, schon bei der Modellierung Gesichtspunkte der späteren Entwicklung eines Computerprogramms zu berücksichtigen.

Zunächst sollen an dieser Stelle jedoch die grundlegenden Mechanismen, die zur Ausbildung einer freien Konvektionsströmung in einem solaren Aufwindkraftwerk führen, beschrieben werden: direkte und diffuse Sonnenstrahlung trifft auf den Kollektor, sie wird zu einem geringem Teil in die Umgebung reflektiert, ein weiterer geringer Teil von der Abdeckung absorbiert und der größte Teil durchdringt die Abdeckung. Seinem höheren Absorptionsgrad entsprechend erwärmt sich dadurch der Boden stärker als die teiltransparente Abdeckung. Durch konvektiven Wärmeübergang vom Boden erwärmt sich die Luft im Kollektor, entsprechend verringert sich ihre Dichte. Aufgrund des Dichteunterschiedes zur Umgebungsluft wirkt auf das Luftvolumen im Kamin eine Auftriebskraft, die eine Strömung der Luft im System verursacht.

Die Berechnung der von der Abdeckung absorbierten Sonnenstrahlung erfordert detaillierte Untersuchungen hinsichtlich der Strahlungsgeometrie und der optischen Eigenschaften der Abdeckung. In einem Aufwindkraftwerk kann es sich um eine laminare, eine turbulente oder eine Strömung im Übergangsbereich handeln (s. Abschnitt „Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den Begrenzungsflächen und der strömenden Luft“). Hier soll eine im folgenden Abschnitt erläuterte Modellierung durchgeführt werden, die auf die Gleichungen zur Berechnung des Wärmeübergangs bei freier und erzwungener Konvektion und den Druckverlustkoeffizienten im ebenen Spalt zurückgreift.

5.1 Modellierung des Luftzustandes im Kollektor

Zur Untersuchung der Zusammenhänge werden die relevanten Massen-, Impuls- und Energiebilanzen für die Bauelemente Kollektor und Kamin erstellt. Folgende Annahmen liegen der Modellierung des Kollektors zugrunde:

- der Kollektor steht auf einer Ebene,
- er weist eine ebene Spalte auf, wobei die transparente Abdeckung die Mantelfläche und der Absorber den ebenen Boden bildet,
- der Kollektor kann einfache oder doppelte Abdeckung aufweisen,
- wie aus Abb. 5-1 hervorgeht, wird der Eintritt des Kollektors mit 1 bezeichnet, 2 kennzeichnet den Luftaustritt des Kollektors,
- achsensymmetrische Strömung der Luft im Kollektor, d.h. ungleichmäßige Heizung der Kollektoroberfläche wird vernachlässigt.

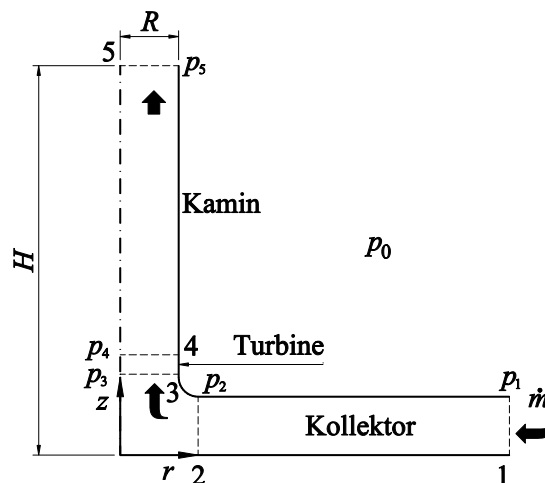


Abb. 5-1: Modelldarstellung des Aufwindkraftwerks.

5.1.1 Massenbilanz der Luft im Kollektor

Da die Abdeckung des Kollektors in dieser Arbeit als luftdicht betrachtet wird, erfolgt kein Massentransport durch die Abdeckung. Nach der Kontinuitätsgleichung gilt daher:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial r} = 0 \quad (5-1)$$

5.1.2 Impulsbilanz der Luft im Kollektor

Der Impulssatz sagt aus, dass die zeitliche Änderung des Impulses gleich der Summe aus den in ein System eintretenden Impulsströmen und den am System angreifenden äußeren Kräften ist. In diesem Fall ist unter „System“ ein Kontrollraum zu verstehen, der das Luftvolumen innerhalb des Kollektors enthält. Die Impulsgleichung am differentiellen Längenelement lautet

$$\frac{\partial(\rho A_c u)}{\partial t} = -\frac{\partial(\dot{m}u)}{\partial r} - \frac{\partial(pA_c)}{\partial r} + p \frac{\partial A_c}{\partial r} - 2\pi r \tau \quad (5-2)$$

Bei Integration über den Kollektorradius wird der Einfluss folgender äußerer Kräfte deutlich

- die durch die Wandschubspannung τ induzierte Reibungskraft,
- die aus den statischen Drücken p_1 und p_2 resultierenden Kräfte.

Ausgehend von Gleichung (5-2) ergibt sich damit für das gesamte Luftvolumen im Kollektor folgende Impulsgleichung

$$\frac{\partial(\dot{m}u)}{\partial t} = -\dot{m}u_2 + \dot{m}u_1 + p_1 A_1 - p_2 A_2 - 2\pi r r_c \tau \quad (5-3)$$

Die senkrecht zur Strömungsrichtung wirkende Komponente der Gewichtskraft wird durch die Reaktionskraft des festen Bodens kompensiert. Nach der Druckgleichung von Bernoulli kann der statische Druck p_1 am Kollektoreintritt ermittelt werden. Wenn der Umgebungs-

druck auf dem Niveau des Kollektoreinganges als p_0 bezeichnet wird, so gilt

$$p_1 = p_0 - \frac{\rho_0}{2} u_1^2 \quad (5-4)$$

Der statische Druck p_2 wird durch das angeschlossene Bauelement beeinflusst, er dient daher als Kopplungsbedingung der Impulsgleichung für Kollektor und Kamin. Mit der gesamten Widerstandskraft des Kollektorspalts,

$$F = 2b \int_0^L \tau_w dx \quad (5-5)$$

erhält man für den Widerstandskoeffizienten

$$\frac{c_w}{2} = \frac{F}{A \rho u^2} \quad (5-6)$$

bei laminarer Strömung

$$\frac{c_w}{2} = \frac{0,664}{\sqrt{Re_L}} \quad (5-7)$$

und bei turbulenter Strömung.

$$\frac{c_w}{2} = \frac{0,036}{Re_L^{1/5}} \quad (5-8)$$

Diese Beziehung stimmt nach /Schlichting 1982/ sehr gut mit Messwerten überein, wenn statt des Zahlenwerts 0,036 der Wert 0,037 eingesetzt wird. Die Genauigkeit verschiedener Formeln zur Berechnung des Plattenwiderstandsbeiwerts der vollturbulenten Plattengrenzschicht einer glatter Wand hat /White 1974/ untersucht. Die „exakt“ berechneten Werte erfasst am besten die Beziehung

$$c_w = 0,523 [\ln(0,06 Re_L)]^{-2}. \quad (5-9)$$

Die von /Prandtl 1927/ vorgeschlagene Formel

$$c_w = 0,455 (\log Re_L)^{-2,58} \quad (5-10)$$

kann ebenfalls als sehr zuverlässig angesehen werden.

Um den Einfluss der laminaren Schichte zu erfassen, schlägt /Prandtl 1927/ vor, diese durch ein Zusatzglied in der Gleichung (5-8) zu berücksichtigen:

$$c_w = \frac{0,072}{Re_L^{1/5}} - \frac{A}{Re_L} \quad (5-11)$$

Für die Reynoldszahl des laminar-turbulenten Umschlags $Re = 5 \times 10^5$ ist $A = 1700$ zu setzen.

Für den Bereich der vollausbildeten Rauheitsströmung lässt sich für den Spaltwiderstandsbeiwert die Interpolationsformel (turbulent, rau, $10^{-6} < k/L < 10^{-2}$, /Schlichting 1982/)

$$c_w = \left[1,89 - 1,62 \log\left(\frac{k}{L}\right) \right]^{-2,5} \quad (5-12)$$

angeben. In Abb. 5-2 sind die Gleichungen (5-7), (5-10), (5-11) und (5-12) dargestellt. Bei höheren Reynoldszahlen und niedrigeren Werten von k/l nehmen die Widerstandbeiwerte ab.

Im Kollektor gilt für den gesamten Reibungswiderstand an der glatten Abdeckung und am rauhen Absorber die Reynoldszahl Re_L

$$Re_L = \frac{\dot{m}}{2\pi v \bar{h}}, \quad (5-13)$$

wobei \bar{h} die durchschnittliche Höhe des Kollektors ist.

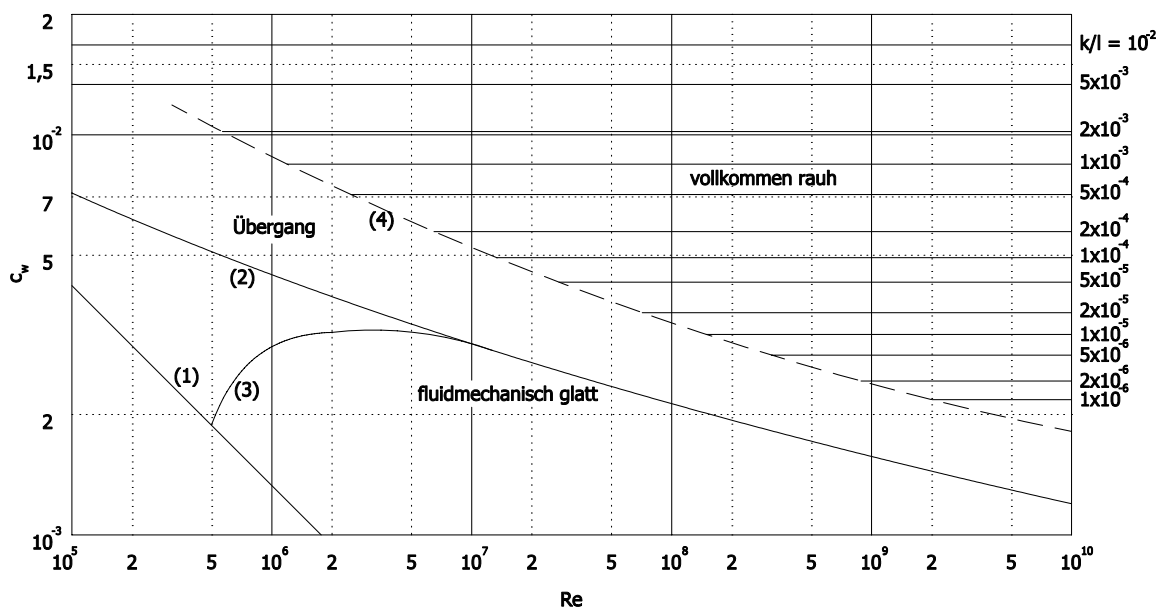


Abb. 5-2: Widerstandbeiwerte c_w der längsangeströmten rauhen ebenen Platte bei der Strömung eines homogenen Fluids nach (5-12). (1) Laminar nach (5-7), (2) turbulent glatt nach (5-10), laminar-turbulent nach (5-11), (4) Grenze des Bereichs der vollausbildeten Rauheitsströmung.

In Hinblick auf die angestrebte numerische Erfassung der Vorgänge ist es wünschenswert, ein instationäres Modell durch die Einführung definierter Zeitintervalle in ein quasistationäres Modell umzuwandeln. Als allgemeine Voraussetzung für eine derartige Behandlung gilt, dass das gewählte Zeitintervall im Vergleich mit dem Zeitraum, den die Änderung von Zustandsgrößen im System in Anspruch nimmt, genügend klein sein muss. Ist dies der Fall, so kann vereinfachend angenommen werden, dass der Impuls der Luftmasse im System während eines Zeitintervalls konstant bleibt:

$$\frac{\partial(mu)}{\partial t} = 0 \quad (5-14)$$

Somit kann die Gleichung umgeformt werden, es ergibt sich die Impulsgleichung im quasistationären Fall unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung

$$0 = -\frac{\dot{m}^2}{\rho_2 A_2} + \frac{\dot{m}^2}{\rho_1 A_1} + \left(p_0 - \frac{\rho_0}{2} u_1^2 \right) A_1 - p_2 A_2 - 2\pi r r_c \tau \quad (5-15)$$

5.1.3 Energiebilanz der Luft im Kollektor

Der Kollektor wird als eindimensionaler Strömungskanal betrachtet, in dem zwischen der Abdeckung und dem Boden, durch die Luft konvektiv Wärme übertragen wird. Zunächst ist die Energiebilanz der Luft in einem differentiellen Kollektorelement aufzustellen.

Für die Energiegleichung folgt:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = -\nabla \dot{q} + \frac{Dp}{Dt} + \tau \frac{\partial u}{\partial r} \quad (5-16)$$

Für ein thermisch ideales Gas folgt mit $(\partial e_i / \partial v)_T = 0$

$$\frac{Dh}{Dt} = c_p \frac{DT}{Dt}. \quad (5-17)$$

Durch Einsetzen von (5-17) in die Gleichung (5-16) erhält man

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \dot{q} + \frac{Dp}{Dt} + \tau \frac{\partial u}{\partial r}. \quad (5-18)$$

Die Gleichung enthält die Terme:

- Enthalpie,
- Verschiebarbeit,
- Wärmeleitung in Strömungsrichtung,
- die über die Abdeckung konvektiv zugeführten Wärmeenergie,
- die durch eine innere Wärmequelle zugeführte Wärmeenergie,
- die Dissipationsarbeit.

Das Modell wird durch einige Annahmen vereinfacht:

- die Änderung der Lufttemperatur im differentiellen Wegelement ist konstant, damit entfällt der Term der Wärmeleitung,
- Druckunterschiede im Wegelement werden vernachlässigt,
- die den Kollektor durchströmende feuchte Luft wird als Gemisch zweier idealer Gase mit den bekannten Zustandsfunktionen betrachtet,
- während der Strömung der Luft führt nicht der in den Kollektor eintretende Luftmassenstrom den aus dem Boden austretenden Dampfmassenstrom ab.

Gemäß den in Abschnitt 5.1.2 angestellten Überlegungen zur Umwandlung in ein quasi-stationäres Modell kann auch die Differenzialgleichung für die Enthalpie unter der Bedingung genügend kleiner Zeitintervalle in eine quasistationäre Gleichung umgeformt werden. Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung $\dot{m} = \rho u A_c$ und der erwähnten Annahmen ergibt

sich durch Umformung der Gleichung (5-16) die Differenzialgleichung der Lufttemperatur in einem Längenelement des Kollektors (Abb. 5-3)

$$\dot{m}c_p T_f + q2\pi r dr = \dot{m}c_p \left(T_f + \frac{dT_f}{dr} dr \right). \quad (5-19)$$

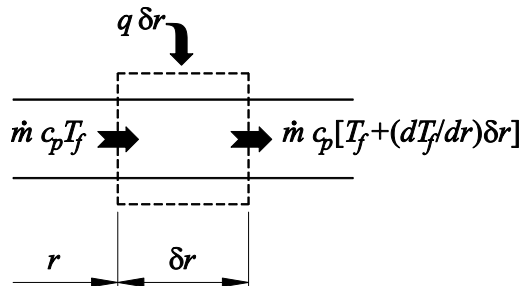


Abb. 5-3: Energiebilanz für ein Längenelement

Dividiert man die Gleichung (5-19) durch dr , so erhält man

$$\frac{dT_f}{dr} = \frac{q2\pi r}{\dot{m}c_p}. \quad (5-20)$$

Unter der Annahme, dass die Nutzwärme, die an die Luft übertragen wird, entlang einem Längenelement der Länge L konstant ist, kann die Mitteltemperatur am Austritt gefunden werden, indem man die oben genannte Gleichung integriert

$$T_{f,o} - T_{f,i} = \frac{q2\pi rL}{\dot{m}c_p}. \quad (5-21)$$

Die Mitteltemperatur kann als arithmetischer Mittelwert von Eintritt- und Austrittstemperatur des Längenelements errechnet werden

$$T_f = \frac{(T_{f,i} + T_{f,o})}{2}. \quad (5-22)$$

Die Wärmestromdichte q (W/m^2) lässt sich entsprechend

$$q = \frac{2\dot{m}c_p(T_f - T_{f,i})}{2\pi rL} \quad (5-23)$$

ausdrücken. Durch das Einführen von $\Gamma = \dot{m}c_p / \pi rL$ in Gleichung (5-23) erhält man

$$q = \Gamma(T_f - T_{f,i}) \quad (5-24)$$

Thermisches Netzwerk

Zur Erstellung der Energiebilanzen der Abdeckung ist die Berücksichtigung des Wärmetransports durch langwellige Infrarotstrahlung notwendig, ebenso sind die Koeffizienten für die folgenden Wärmeübergänge zu ermitteln:

- zwischen der Abdeckung und der Umgebungsluft

- zwischen der Abdeckung und der strömenden Luft, im Kollektor
- zwischen dem Absorber und der strömenden Luft
- zwischen den beiden Abdeckungen (im Falle einer doppelten Abdeckung)
- zwischen der Abdeckung und dem Wasserspeicher.

Eine über die Erdoberfläche gelegene Absorberfolie (z.B. eine schwarze Folie) dient als Absorber des Kollektors. Bei der Nutzung keiner Absorberfolie wird die Erdoberfläche als Absorber betrachtet.

Eine Prozedur ähnlich wie /Ong 1995/ wurde verwendet, um die Temperatur im Kollektor zu berechnen.

Kollektor mit einfacher Abdeckung ohne Wasserspeicher

Das thermischen Netzwerk des Kollektors mit einfacher Abdeckung ohne Wasserspeicher ist in Abb. 5-4 dargestellt.

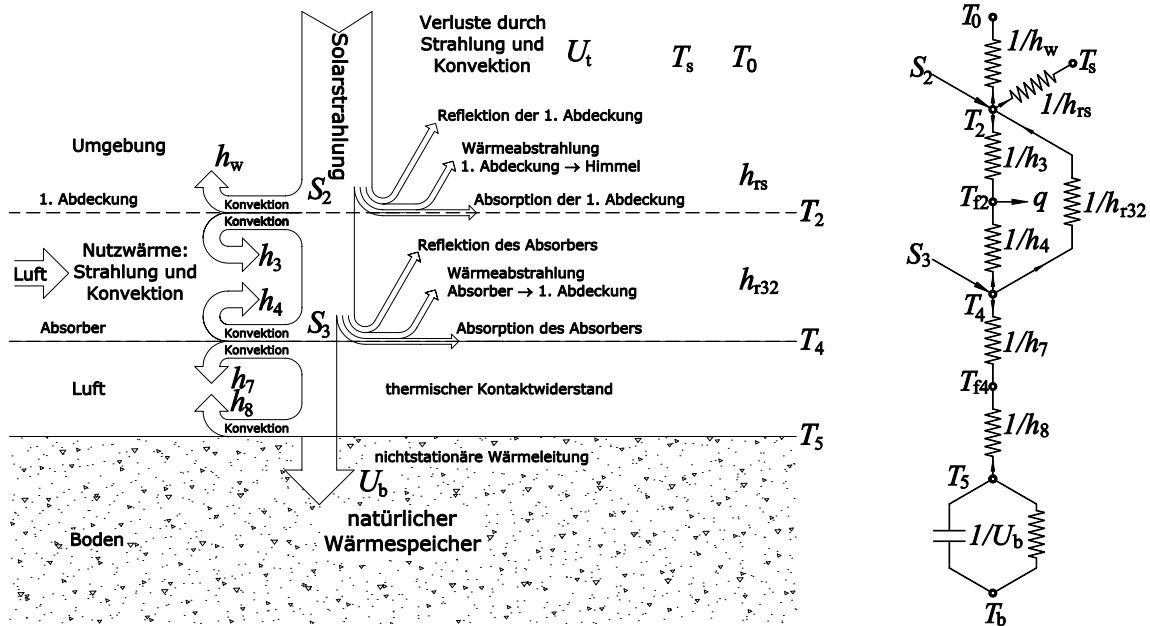


Abb. 5-4: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit einfacher Abdeckung ohne Wasserspeicher.

Die Wärmebilanz für die Punkte des thermischen Netzwerks für einen Kollektor mit einfacher Abdeckung ohne Wasserspeicher kann wie folgt ermittelt werden:

$$T_2: \quad S_2 + h_{r32}(T_4 - T_2) + h_3(T_{f2} - T_2) = h_w(T_2 - T_0) + h_{rs}(T_2 - T_s) \quad (5-25)$$

$$T_{f2}: \quad h_4(T_4 - T_{f2}) = h_3(T_{f2} - T_2) + q \quad (5-26)$$

$$T_4: \quad S_3 = h_4(T_4 - T_{f2}) + h_{r32}(T_4 - T_2) + h_7(T_4 - T_{f4}) \quad (5-27)$$

$$T_{f4}: \quad h_7(T_4 - T_{f4}) = h_8(T_{f4} - T_5) \quad (5-28)$$

$$T_5: \quad h_8(T_{f4} - T_5) = U_b(T_5 - T_{5,0}) \quad (5-29)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5-24) in die Gleichung (5-26) und Umordnen der Terme folgt

$$(h_3 + h_{r32} + h_w + h_{rs})T_2 - h_3T_{f2} - h_{r32}T_4 = S_2 + h_wT_0 + h_{rs}T_s \quad (5-30)$$

$$h_3T_2 - (h_3 + h_4 + \Gamma)T_{f2} + h_4T_4 = -\Gamma T_{f2,i} \quad (5-31)$$

$$-h_{r32}T_2 - h_4T_{f2} + (h_4 + h_{r32} + h_7)T_4 - h_7T_{f4} = S_3 \quad (5-32)$$

$$h_7T_4 - (h_7 + h_8)T_{f4} + h_8T_5 = 0 \quad (5-33)$$

$$-h_8T_{f4} + (h_8 + U_b)T_5 = U_bT_{5,0} \quad (5-34)$$

Die Gleichungen (5-30) bis (5-34) können in einer 5×5 Matrixform (5-35) geschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} h_3 \\ +h_{r32} \\ +h_{rs} \\ +h_w \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & T_2 & S_2 + h_wT_0 + h_{rs}T_s \\ h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +\Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & T_{f2} & -\Gamma T_{f2,i} \\ -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_7 \end{pmatrix} & -h_7 & 0 & T_4 & S_3 \\ 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 & T_{f4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} & T_5 & U_bT_{5,0} \end{bmatrix} = \quad (5-35)$$

Kollektor mit doppelter Abdeckung ohne Wasserspeicher

Für einen Kollektor mit doppelter Abdeckung ohne Wasserspeicher gilt das folgende thermische Netzwerk (Abb. 5-5):

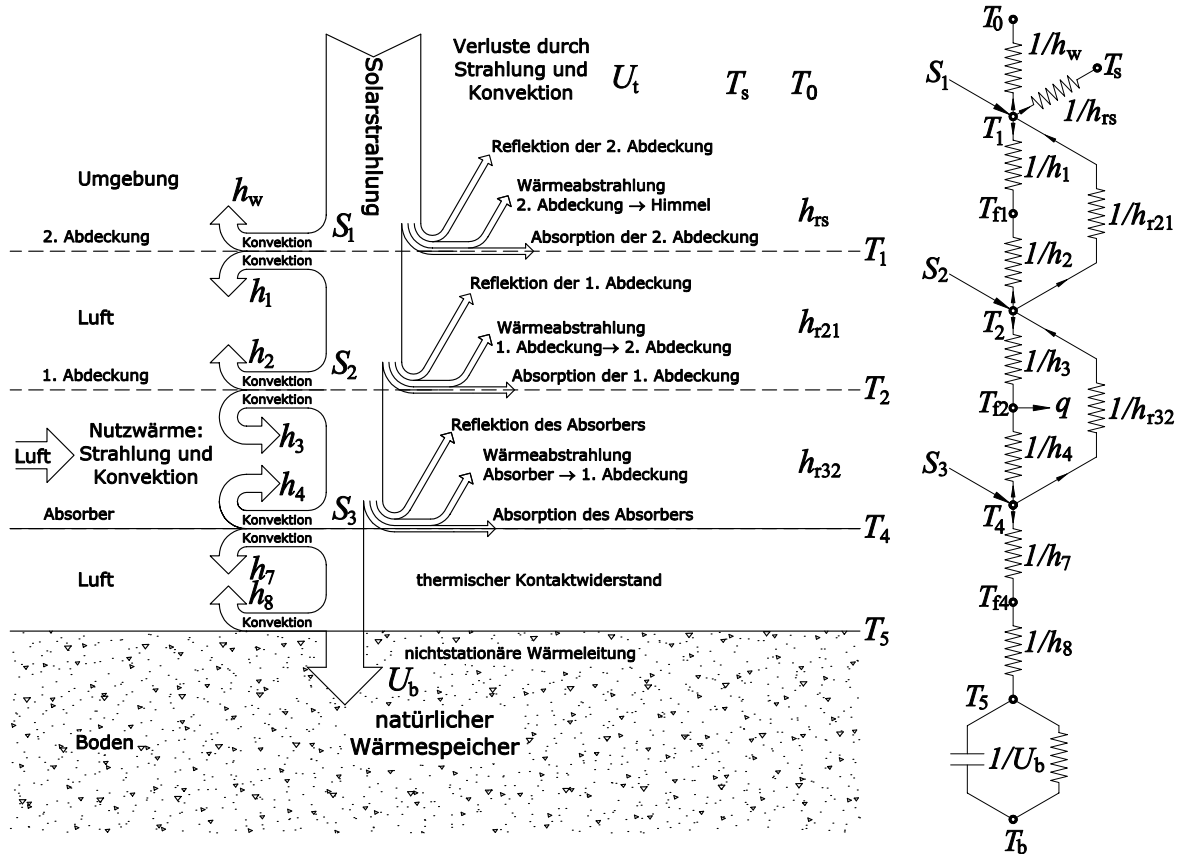


Abb. 5-5: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit doppelter Abdeckung ohne Wasserspeicher.

Dann kann die Wärmebilanz wie folgt ermittelt werden:

$$T_1: \quad S_1 + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_1(T_{f1} - T_1) = h_w(T_1 - T_0) + h_{rs}(T_1 - T_s) \quad (5-36)$$

$$T_{f1}: \quad h_1(T_1 - T_{f1}) = h_2(T_{f1} - T_2) \quad (5-37)$$

$$T_2: \quad S_2 + h_2(T_{f1} - T_2) = h_3(T_2 - T_{f2}) + h_{r32}(T_2 - T_4) + h_{r21}(T_2 - T_1) \quad (5-38)$$

$$T_{f2}: \quad h_3(T_2 - T_{f2}) = h_4(T_{f2} - T_4) + q \quad (5-39)$$

$$T_4: \quad S_3 = h_4(T_4 - T_{f2}) + h_{r32}(T_4 - T_2) + h_7(T_4 - T_{f4}) \quad (5-40)$$

$$T_{f4}: \quad h_7(T_4 - T_{f4}) = h_8(T_{f4} - T_5) \quad (5-41)$$

$$T_5: \quad h_8(T_{f4} - T_5) = U_b(T_5 - T_{5,0}) \quad (5-42)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5-24) in die Gleichungen (5-39) und Umordnen der Terme folgt

$$(h_1 + h_{r21} + h_{rs} + h_w)T_1 - h_1 T_{f1} - h_{r21} T_2 = S_1 + h_w T_0 + h_{rs} T_s \quad (5-43)$$

$$h_1 T_1 - (h_1 + h_2) T_{f1} + h_2 T_2 = 0 \quad (5-44)$$

$$-h_{r21} T_1 - h_2 T_{f1} + (h_2 + h_3 + h_{r21} + h_{r32}) T_2 - h_3 T_{f2} - h_{r32} T_4 = S_2 \quad (5-45)$$

$$h_3 T_2 - (h_3 + h_4 + \Gamma) T_{f2} + h_4 T_4 = -\Gamma T_{f2,i} \quad (5-46)$$

$$-h_{r32} T_2 - h_4 T_{f2} + (h_4 + h_{r32} + h_7) T_4 - h_7 T_{f4} = S_3 \quad (5-47)$$

$$h_7 T_4 - (h_7 + h_8) T_{f4} + h_8 T_5 = 0 \quad (5-48)$$

$$-h_8 T_{f4} + (h_8 + U_b) T_5 = U_b T_{5,0} \quad (5-49)$$

Die Gleichungen (5-43) bis (5-49) können in einer 7×7 Matrixform (5-50) geschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ +h_{r21} \\ +h_{rs} \\ +h_w \end{pmatrix} & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 & 0 & 0 & T_1 & \begin{pmatrix} S_1 \\ +h_w T_0 \\ +h_{rs} T_s \end{pmatrix} \\ h_1 & -\begin{pmatrix} h_1 \\ +h_2 \end{pmatrix} & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{f1} & 0 \\ -h_{r21} & -h_2 & \begin{pmatrix} h_2 \\ +h_3 \\ +h_{r21} \\ +h_{r32} \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & T_2 & S_2 \\ 0 & 0 & h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +\Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & T_{f2} & -\Gamma T_{f2,i} \\ 0 & 0 & -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_7 \end{pmatrix} & -h_7 & 0 & T_4 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 & T_{f4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} & T_5 & U_b T_{5,0} \end{bmatrix} = \quad (5-50)$$

Kollektor mit einfacher Abdeckung und Wasserspeicher

Das thermische Netzwerk des Kollektors mit einfacher Abdeckung und Wasserspeicher ist in Abb. 5-6 dargestellt.

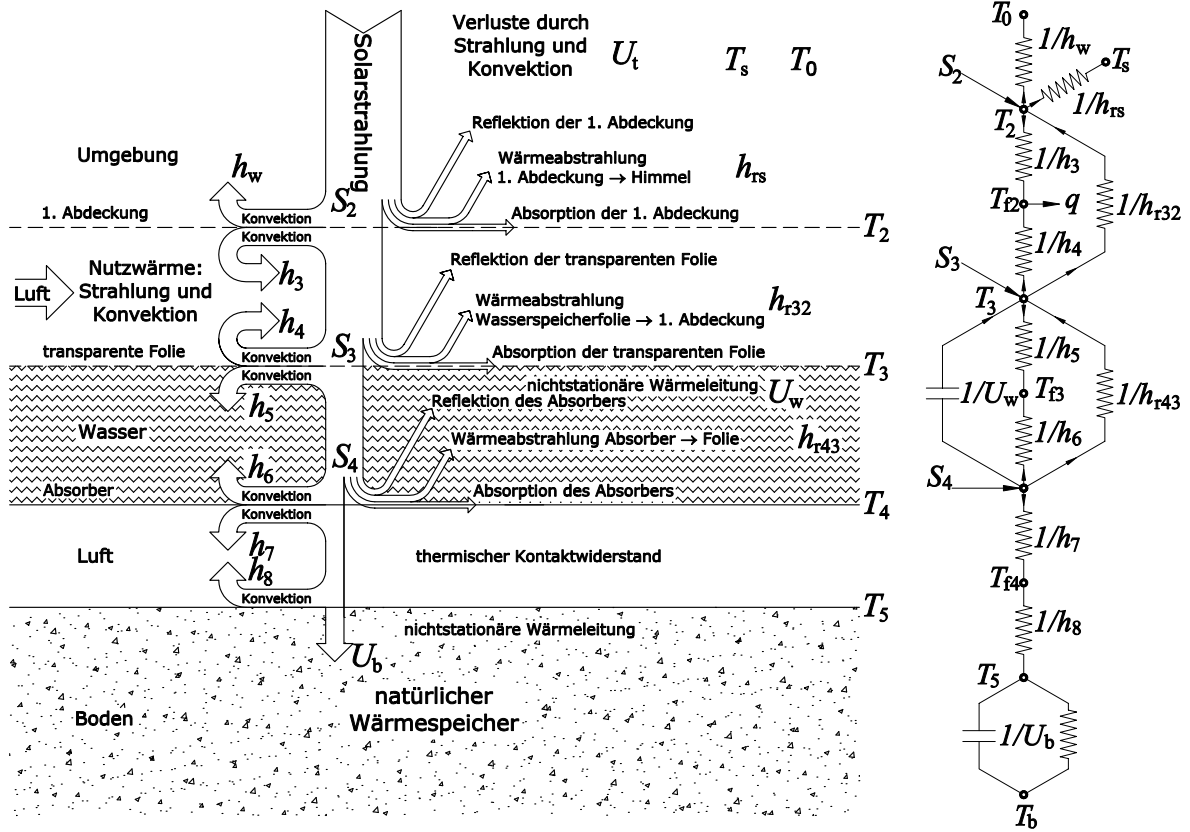


Abb. 5-6: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit einfacher Abdeckung und Wasserspeicher.

Die Wärmebilanz für die Punkte des thermischen Netzwerks für einen Kollektor mit einfacher Abdeckung ohne Wasserspeicher kann wie folgt ermittelt werden:

$$T_2: \quad S_2 + h_{r32}(T_3 - T_2) + h_3(T_{f2} - T_2) = h_w(T_2 - T_0) + h_{rs}(T_2 - T_s) \quad (5-51)$$

$$T_{f2}: \quad h_4(T_3 - T_{f2}) = h_3(T_{f2} - T_2) + q \quad (5-52)$$

$$T_3: \quad S_3 = h_4(T_3 - T_{f2}) + h_{r32}(T_3 - T_2) + h_5(T_3 - T_{f3}) - h_{r43}(T_4 - T_3) \quad (5-53)$$

$$T_{f3}: \quad h_5(T_3 - T_{f3}) = h_6(T_{f3} - T_4) \quad (5-54)$$

$$T_4: \quad S_4 = h_6(T_4 - T_{f3}) + h_{r43}(T_4 - T_3) + h_7(T_4 - T_{f4}) + U_w(T_4 - T_{4,0}) \quad (5-55)$$

$$T_{f4}: \quad h_7(T_4 - T_{f4}) = h_8(T_{f4} - T_5) \quad (5-56)$$

$$T_5: \quad h_8(T_{f4} - T_5) = U_b(T_5 - T_{5,0}) \quad (5-57)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5-24) in die Gleichung (5-52) und Umordnen der Terme

folgt

$$(h_3 + h_{r32} + h_{rs} + h_w)T_2 - h_3T_{f2} - h_{r32}T_3 = S_2 + h_wT_0 + h_{rs}T_s \quad (5-58)$$

$$h_3T_2 - (h_3 + h_4 + \Gamma)T_{f2} + h_4T_3 = -\Gamma T_{f2,i} \quad (5-59)$$

$$-h_{32r}T_2 - h_4T_{f2} + (h_4 + h_{r32} + h_{r43} + h_5)T_3 - h_5T_{f3} - h_{r43}T_4 = S_3 \quad (5-60)$$

$$h_5T_3 - (h_5 + h_6)T_{f3} + h_6T_4 = 0 \quad (5-61)$$

$$-h_{r43}T_3 - h_6T_{f3} + (h_6 + h_{r43} + h_7 + U_w)T_4 - h_7T_{f4} = S_4 + U_wT_{4,0} \quad (5-62)$$

$$h_7T_4 - (h_7 + h_8)T_{f4} + h_8T_5 = 0 \quad (5-63)$$

$$-h_8T_{f4} + (h_8 + U_b)T_5 = U_bT_{5,0} \quad (5-64)$$

Die Gleichungen (5-58) bis (5-64) werden in einer 7×7 Matrixform (5-65) geschrieben.

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} h_3 \\ +h_{r32} \\ +h_{rs} \\ +h_w \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & 0 & 0 & T_2 & \begin{pmatrix} S_2 \\ +h_wT_0 \\ +h_{rs}T_s \end{pmatrix} \\ h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +\Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{f2} & -\Gamma T_{f2,i} \\ -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_{r43} \\ +h_5 \end{pmatrix} & -h_5 & -h_{r43} & 0 & 0 & T_3 & S_3 \\ 0 & 0 & h_5 & -\begin{pmatrix} h_5 \\ +h_6 \end{pmatrix} & h_6 & 0 & 0 & T_{f3} & 0 \\ 0 & 0 & -h_{r43} & -h_6 & \begin{pmatrix} h_6 \\ +h_{r43} \\ +h_7 \\ +U_w \end{pmatrix} & -h_7 & 0 & T_4 & S_4 + U_wT_{4,0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 & T_{f4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} & T_5 & U_bT_{5,0} \end{bmatrix} = \quad (5-65)$$

Kollektor mit doppelter Abdeckung und Wasserspeicher

Für einen Kollektor mit doppelter Abdeckung und Wasserspeicher gilt das folgende thermische Netzwerk (Abb. 5-7):

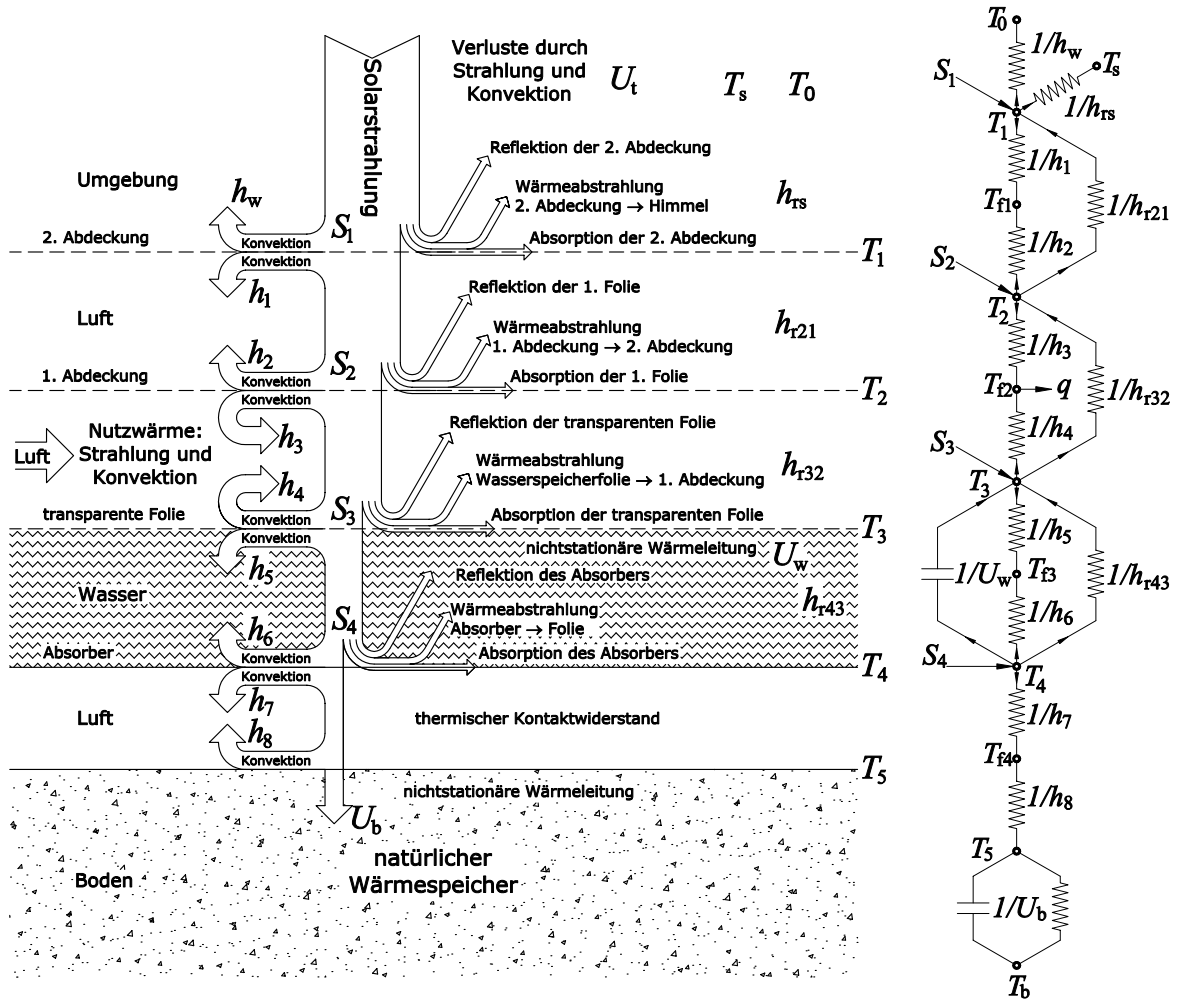


Abb. 5-7: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk des Kollektors mit doppelter Abdeckung und Wasserspeicher.

Dann kann die Wärmebilanz wie folgt ermittelt werden:

$$T_1: \quad S_1 + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_1(T_{f1} - T_1) = h_w(T_1 - T_0) + h_{rs}(T_1 - T_s) \quad (5-66)$$

$$T_{f1}: \quad h_1(T_1 - T_{f1}) = h_2(T_{f1} - T_2) \quad (5-67)$$

$$T_2: \quad S_2 + h_2(T_{f1} - T_2) = h_3(T_2 - T_{f2}) + h_{r32}(T_2 - T_3) + h_{r21}(T_2 - T_1) \quad (5-68)$$

$$T_{f2}: \quad h_3(T_2 - T_{f2}) = h_4(T_{f2} - T_3) + q \quad (5-69)$$

$$T_3: \quad S_3 = h_4(T_3 - T_{f2}) + h_{r32}(T_3 - T_2) + h_5(T_3 - T_{f3}) - h_{r43}(T_4 - T_3) \quad (5-70)$$

$$T_{f3}: \quad h_5(T_3 - T_{f3}) = h_6(T_{f3} - T_4) \quad (5-71)$$

$$T_4: \quad S_4 = h_6(T_4 - T_{f3}) + h_{r43}(T_4 - T_3) + h_7(T_4 - T_{f4}) + U_w(T_4 - T_{4,0}) \quad (5-72)$$

$$T_{f4}: \quad h_7(T_4 - T_{f4}) = h_8(T_{f4} - T_5) \quad (5-73)$$

$$T_5: \quad h_8(T_{f4} - T_5) = U_b(T_5 - T_{5,0}) \quad (5-74)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5-24) in die Gleichung (5-69) und Umordnen der Terme folgt:

$$(h_1 + h_{r21} + h_{rs} + h_w)T_1 - h_1T_{f1} - h_{r21}T_2 = S_1 + h_wT_0 + h_{rs}T_s \quad (5-75)$$

$$h_1T_1 - (h_1 + h_2)T_{f1} + h_2T_2 = 0 \quad (5-76)$$

$$-h_{r21}T_1 - h_2T_{f1} + (h_2 + h_3 + h_{r21} + h_{r32})T_2 - h_3T_{f2} - h_{r32}T_3 = S_2 \quad (5-77)$$

$$h_3T_2 - (h_3 + h_4 + \Gamma)T_{f2} + h_4T_3 = -\Gamma T_{f2,i} \quad (5-78)$$

$$-h_{r32}T_2 - h_4T_{f2} + (h_4 + h_{r32} + h_{r43} + h_5)T_3 - h_5T_{f3} - h_{r43}T_4 = S_3 \quad (5-79)$$

$$h_5T_3 - (h_5 + h_6)T_{f3} + h_6T_4 = 0 \quad (5-80)$$

$$-h_{r43}T_3 - h_6T_{f3} + (h_6 + h_{r43} + h_7 + U_w)T_4 - h_7T_{f4} = S_4 + U_wT_{4,0} \quad (5-81)$$

$$h_7T_4 - (h_7 + h_8)T_{f4} + h_8T_5 = 0 \quad (5-82)$$

$$-h_8T_{f4} + (h_8 + U_b)T_5 = U_bT_{5,0} \quad (5-83)$$

Die Gleichungen (5-75) bis (5-83) können in einer 9×9 Matrixform (5-84) geschrieben werden.

$$\begin{bmatrix}
 \begin{pmatrix} h_1 \\ +h_{r21} \\ +h_{rs} \\ +h_w \end{pmatrix} & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_1 & \begin{pmatrix} S_1 \\ +h_w T_0 \\ +h_{rs} T_s \end{pmatrix} \\
 h_1 & -\begin{pmatrix} h_1 \\ +h_2 \end{pmatrix} & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{f1} & 0 \\
 -h_{r21} & -h_2 & \begin{pmatrix} h_2 \\ +h_3 \\ +h_{r21} \\ +h_{r32} \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & 0 & 0 & T_2 & S_2 \\
 0 & 0 & h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +\Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{f2} & -\Gamma T_{f2,i} \\
 0 & 0 & -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_{r43} \\ +h_5 \end{pmatrix} & -h_5 & -h_{r43} & 0 & 0 & T_3 & S_3 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & h_5 & -\begin{pmatrix} h_5 \\ +h_6 \end{pmatrix} & h_6 & 0 & 0 & T_{f3} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -h_{r43} & -h_6 & \begin{pmatrix} h_6 \\ +h_{r43} \\ +h_7 \\ +U_w \end{pmatrix} & -h_7 & 0 & T_4 & \begin{pmatrix} S_4 \\ +U_w T_{4,0} \end{pmatrix} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 & T_{f4} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} & T_5 & U_b T_{5,0}
 \end{bmatrix} = \quad (5-84)$$

Strahlungsbilanzen im langwelligen Bereich

Die Energiebilanzen für Abdeckungsmaterialien, die im langwellige IR-Bereich nicht opak sind, erfordern eine Untersuchung der Wärmeübertragung durch langwellige Infrarotstrahlung. Im Anhang wird das verwendete Modell zur Ermittlung der optischen Eigenschaften der Folien nach /Whillier, A. 1977/ beschrieben.

Mitteltemperaturmatrix

Im Allgemeinen können die oben genannten Matrizen als $[A][T] = [B]$ geschrieben werden. Der Mitteltemperaturvektor $[T]$ kann dann durch Multiplikation der inversen Matrix $[A]^{-1}$ mit der Matrix $[B]$ berechnet werden:

$$[T] = [A]^{-1}[B] \quad (5-85)$$

5.1.4 Bestimmung der Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten

Die in diesem Abschnitt zu ermittelnden Koeffizienten des Wärmeübergangs an die Umgebung bzw. die Luft im Kollektor berücksichtigen nur die Einflüsse der Konvektion.

Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den Begrenzungsflächen und der strömenden Luft

Die Luftströmung im System ist allein die Folge der Dichtedifferenz zwischen Umgebungsluft und der wärmeren Luft im Inneren. Sie kann daher als freie Konvektionsströmung bezeichnet werden. Zugleich weist diese Strömung aber auch Merkmale einer erzwungenen Strömung auf. Aus diesem Grunde ist von einem Wärmeübergang sowohl durch freie als auch durch erzwungene Konvektion auszugehen. Die gesuchten Wärmeübergangskoeffizienten h für den Wärmeübergang von den Folien an die strömende Luft ergeben sich in Abhängigkeit von den Nußeltzahlen Nu und den hydraulischen Durchmesser D_h :

$$h = \frac{kNu}{D_h} \quad (5-86)$$

Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit k der Luft ist einschlägigen Tabellenwerken zu entnehmen (z. B. /Wärmeatlas 1997/) und der hydraulische Durchmesser ist bekannt, damit bleiben die Nußeltzahlen zu bestimmen. Nach /Churchill 1977/ kann die Nußeltzahl bei Mischkonvektion aus der Nußeltzahl bei Zwangskonvektion und der Nußeltzahl bei freier Konvektion ermittelt werden:

$$Nu^n = Nu_{erzw}^n + Nu_{frei}^n \quad (5-87)$$

Für den Exponenten wird der Wert 3 empfohlen. Zur Ermittlung der Nußeltzahl bei Zwangskonvektion ist zunächst mit Hilfe der Reynoldszahl der Strömungszustand (laminar - turbulent) im Kollektor abzuschätzen. Nach /Merker 1987/ zeigen experimentelle Beobachtungen, dass die Plattengrenzschicht erst ab etwa $Re_x = 3$ bis 5×10^5 vollkommen turbulent ist. Nach der Definition der lokalen Reynoldszahl für Spaltenströmung

$$Re_x = \frac{ux}{\nu} \quad (5-88)$$

können bei Kenntnis der kinematischen Viskosität der strömenden Luft die relevanten Luftgeschwindigkeiten im Bereich des Übergangs vom laminaren zum turbulenten Strömungszustand abgeschätzt werden. Der hydraulische Durchmesser kann wie folgt ermittelt werden:

$$D_h = \frac{4 \cdot \text{durchströmte Fläche}}{\text{benetzter Umfang}} = \frac{4(H_c 2\pi r)}{4\pi r} = 2H_c \quad (5-89)$$

Die Geschwindigkeit wird

$$u = \frac{\dot{m}}{\rho \pi r D_h} = \frac{\dot{m}}{2\rho \pi r H_c} \quad (5-90)$$

Mit dem hydraulischen Durchmesser des Kollektors ergibt die Abschätzung für den Kol-

lektor des Prototyps in Manzanares (/Schlaich 1995/) bei $D_h = 4$ m und einer kinematischen Viskosität der Luft bei einer Temperatur von $T = 30^\circ\text{C}$ einen maximalen Bereich der Strömungsgeschwindigkeit von etwa $0,75$ m/s (Eintritt) $\leq u \leq 15$ m/s (Kamin), in dem der turbulente Strömungszustand herrscht. Wegen des instationären Verhaltens eines Aufwindkraftwerks kann im Verlauf eines Tages die Geschwindigkeit so variieren, dass der laminare, der Übergang von laminarem zu turbulentem und der turbulente Strömungszustand stattfindet. Diese Abschätzung erlaubt die Annahme, dass es sich bei der Luftströmung im Kollektor um eine laminare, turbulente Strömung oder um eine Strömung im Übergangsbereich handeln kann.

Strömung zwischen zwei parallelen Platten

Bei der Strömung durch zwei parallelen Platten werden zwei Bereiche unterschieden (Abb. 5-8), nämlich die Strömung im Einlaufbereich, innerhalb dessen sich das Geschwindigkeits- und das Temperaturprofil mit der Längskoordinate x ändern, und der Bereich der vollausgebildeten Strömung, in dem das Geschwindigkeits- und das Temperaturprofil unabhängig von der Längskoordinate x sind.

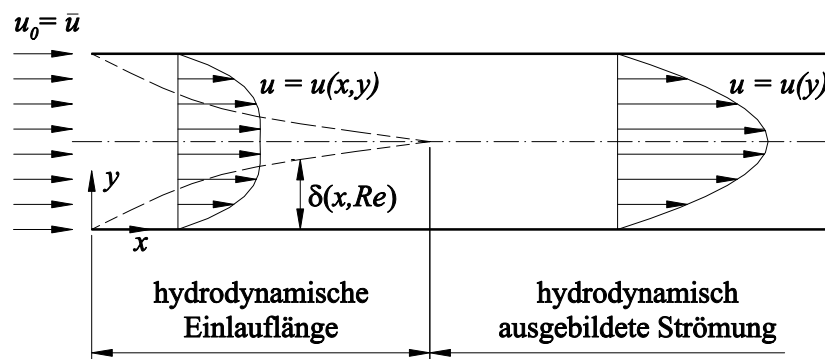


Abb. 5-8: Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils bei hydrodynamischem Einlauf.

Für die hydrodynamische Einlauflänge bei laminarer Strömung hat /Chen 1973/ die folgende Beziehung vorgeschlagen:

$$\frac{L_{hyd}}{ReD_h} = 0,011 + \frac{0,315}{Re(1 + 0,0175Re)} \quad (5-91)$$

An der Grenze der laminaren Strömung ($Re = 2300$) erhält man aus (5-91) mit $D_h = 4$ m eine hydrodynamische Einlauflänge von $L_{hyd} = 101$ m.

/Na und Lu 1973/ führten eine integrale Analyse des hydrodynamischen Einlaufbereich-Problems für glatte ebene Platten durch und stellten fest, dass die hydrodynamische Einlauflänge, unter der Annahme, dass die sich vom Anfang der zwei Platten entwickelnde hydrodynamische Grenzschichten vereinigen, gleich $L_{hyd} = 13,75D_h$ bei $Re = 2,21 \times 10^5$ ist. Die experimentellen Ergebnisse von /Byrne et al. 1969-70/ über den hydrodynamischen Parameter der Impuls- und Verdrängungsdicke stimmen ausgezeichnet mit den Vorhersagen von /Na und Lu 1973/ überein. Nach dieser Studie erhält man mit $D_h = 4$ m eine hydrodynamische Einlauflänge von $L_{hyd} = 55$ m für $Re = 2,21 \times 10^5$.

Bei der Strömung entlang einer ebenen Platte (Abb. 5-9) bildet man die Reynoldszahl Re_x mit der Plattenlänge x , also $Re_x = u_\infty x / \nu$. Vom Plattenanfang bis zu einer bestimmten Plat-

tenlänge bzw. bestimmten örtlichen Reynoldszahl verläuft die Strömung vollkommen laminar. Nach Durchlaufen eines sog. Übergangsbereich ist die Strömung dann vollkommen turbulent.

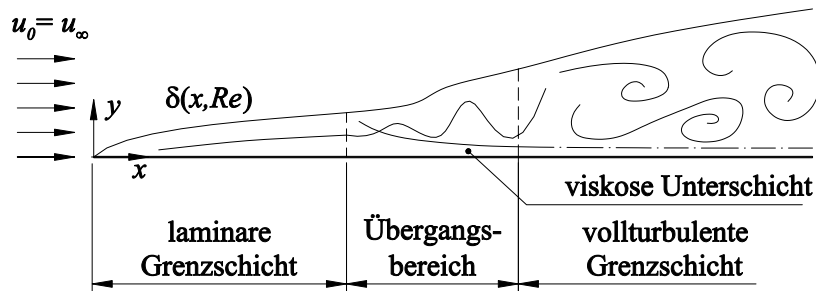


Abb. 5-9: Strömungsformen an der längsüberströmten ebenen Platte

Da es derzeit jedoch keine tauglichen Modelle zur Untersuchung instationärer Strömung zwischen zwei Platten gibt, und somit die Berechnung der Vorgänge (erzwungene und freie Konvektion bei laminarer und turbulenter Strömung; der Übergang von laminarer in turbulenter Strömung) nicht möglich ist, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Verhalten des Warmluftgerätes als Strömung zwischen zwei parallelen voneinander unabhängig angeströmten ebenen Platten behandelt.

Erzwungene Konvektion an einer horizontalen ebenen Platte

Für die Berechnung der Nußeltzahl bei laminarer Zwangskonvektion und konstanter Wandtemperatur stellen /Baehr und Stephan 1996/ die folgende Gleichung auf

$$Nu_x = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Re_x} \frac{Pr}{(1 + 1,7Pr^{1/4} + 21,36Pr)^{1/6}} \quad (5-92)$$

Die mittlere Nußeltzahl ist

$$Nu_{m, lam} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Re} \frac{\sqrt{Pr}}{(1 + 1,7Pr^{1/4} + 21,36Pr)^{1/6}} \quad (5-93)$$

Die Reynoldssche Analogie, wonach Wärmeübergangskoeffizienten mit dem Reibungsbeiwert verknüpft sind gemäß

$$\frac{Nu_x}{Re_x} = \frac{c_f}{2} \quad \text{für } Pr = 1, \quad (5-94)$$

liefert bereits eine einfache Beziehung für den Wärmeübergangskoeffizienten bei turbulenter Strömung, da der Reibungsbeiwert aus Messungen bekannt ist (/Schlichting 1965/):

$$c_f = 0,0592 Re_x^{-1/5} \quad \text{für } 5 \times 10^5 < Re < 10^7 \quad (5-95)$$

Damit wird

$$\frac{Nu_x}{Re_x} = 0,0296 Re_x^{-1/5} \quad \text{für } Pr = 1 \quad (5-96)$$

in dem genannten Bereich der Reynoldszahl.

Nach /Chilton 1934/ und /Colburn 1933/ kann man den Einfluss der Prandtlzahl auf den Wärmeübergang durch den empirischen Ansatz

$$Nu_x = 0,0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \quad (5-97)$$

beschreiben, gültig für $0,6 < Pr < 60$ und $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$.

Für praktische Rechnungen interessiert vor allen die mittlere Nußeltzahl. Als Beispiel hierfür sei die aus einer Beziehung von /Petukhov und Popov 1963/ hergeleitete Gleichung von /Gnielinski 1975/ für die mittlere Nußeltzahl mitgeteilt:

$$Nu_{m,tur} = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5-98)$$

Sie gilt für $5 \times 10^5 < Re < 10^7$ und $0,6 < Pr < 2000$. Nach /Baehr und Stephan 1996/ erhält man im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung gute Überstimmung durch eine quadratische Überlagerung

$$Nu_m = \sqrt{Nu_{m,lam}^2 + Nu_{m,tur}^2} \quad (5-99)$$

worin $Nu_{m,lam}$ die mittlere Nußeltzahl der laminaren Strömung $Nu_{m,lam} = 2 Nu_x$ mit Nu_x nach (5-92) und $Nu_{m,turb}$ die der turbulenten Strömung nach (5-98) ist. In (5-99) wird bei kleinen Reynoldszahlen der turbulente und bei großen Reynoldszahlen der laminare Anteil klein. Sie kann daher im gesamten Bereich der Reynoldszahlen verwendet werden.

Freie Konvektion an einer horizontalen ebenen Platte

Im Folgenden sind einige empirische Korrelationen für den Wärmeübergang bei freier Strömung /Churchill und Chu 1975/ genannt. Charakteristische Länge in der mittleren Nußelt- und Rayleighzahl ist eine äquivalente Länge ($L=A/U$), gebildet aus wärmeübertragender Oberfläche A und Umfang U der äußeren Umrandung der Platte. Die mittlere Nußeltzahl für den vorliegenden Fall, dass die Oberseite der Platte beheizt oder die Unterseite gekühlt ist, wird

$$Nu_m = 0,54 Ra^{1/4} \quad \text{gültig für } 10^4 \leq Ra < 10^7 \quad (5-100)$$

$$Nu_m = 0,14 Ra^{1/3} \quad \text{gültig für } 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \quad (5-101)$$

Der gesamte obere Wärmeverlustkoeffizient kann nach

$$U_t = h_w + h_{rs} \quad (5-102)$$

ermittelt werden, wobei

$$h_w = \frac{k}{L} Nu \quad (5-103)$$

und h_{rs} durch Gleichung (5-132) gegeben ist.

Wirkungsgrad des Kollektors

Der Wirkungsgrad des Kollektors wurde wie folgt definiert:

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} q_r > 0 \left\{ \begin{array}{l} q_r = 0 \rightarrow \eta_c = \frac{q_l}{|q_b + q_w|} \\ q_b > 0 \text{ und } q_w > 0 \rightarrow \eta_c = \frac{q_l}{|q_r + q_b + q_w|} \\ q_b > 0 \text{ und } q_w < 0 \rightarrow \eta_c = \frac{q_l}{|q_r + q_b|} \\ q_b < 0 \text{ und } q_w > 0 \rightarrow \eta_c = \frac{q_l}{|q_r + q_w|} \\ q_b < 0 \text{ und } q_w < 0 \rightarrow \eta_c = \frac{q_l}{q_r} \end{array} \right. \quad (5-104)$$

wobei

- q_r : absorbierte Strahlungsleistung [W],
- q_l : an die strömende Luft abgegebene Wärmeleistung [W],
- $q_b < 0$: ans Erdreich abgegebene Wärmeleistung [W],
- $q_b > 0$: vom Erdreich abgegebene Wärmeleistung [W],
- $q_w < 0$: an den Wasserspeicher abgegebene Wärmeleistung [W],
- $q_w > 0$: vom Wasserspeicher abgegebene Wärmeleistung [W].

Nichtstationäre eindimensionale Wärmeleitung im Boden

Für die Erstellung einer korrekten Energiebilanz ist es nicht nur erforderlich, den Wärmeübergang vom Absorber an die Luft im Kollektor zu bestimmen, auch der Wärmetransport zwischen dem Absorber und dem Erdreich darunter muss berücksichtigt werden. Der Absorber und die Bodenoberfläche werden zu diesem Zweck als parallel angesehen, zwischen ihnen wird Wärme durch Strahlung, Konvektion und Leitung übertragen. Die Abgabe der Strahlung und der Konvektion wurde im Abschnitt 3.2 betrachtet. Da die unregelmäßige Auflage der Folie auf dem Boden kaum zu modellieren ist, wird der Wärmestrom durch Wärmeleitung in einen halbunendlichen Körper berücksichtigt:

$$\frac{T_b - T_5}{T_{b,0} - T_5} = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (5-105)$$

Die Funktion $\operatorname{erf}(x)$ ist definiert als

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi. \quad (5-106)$$

Für die Wärmestromdichte erhalten wir

$$q_z = \frac{k_b}{\sqrt{\pi\alpha_b t}} (T_{5,0} - T_5) e^{-\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}} \quad (5-107)$$

An der Oberfläche ($z = 0$) ist

$$q''_b = \frac{k_b}{\sqrt{\pi\alpha_b t}} (T_{5,0} - T_5). \quad (5-108)$$

Die durchschnittliche Wärmemenge q_{01} , die in der Zeit von $t = 0$ bis $t = t_1$ eintritt, wird

$$q_{01} = \frac{1}{t} \int_0^{t_1} q_b dt = \frac{1}{t} \frac{2k_b \sqrt{t}}{\sqrt{\pi\alpha_b}} (T_{5,0} - T_5). \quad (5-109)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient des Bodens kann so ermittelt werden

$$U_b = \frac{2k_b}{\sqrt{\pi t \alpha_b}} \quad (5-110)$$

Neben den bereits verwendeten Größen k und α ist auch der Wärmeeindringkoeffizient (thermische Effusivität, SI-Einheit $\text{Ws}^{1/2}/\text{K}\cdot\text{m}^2$)

$$b = \frac{k}{\sqrt{\alpha}} = \sqrt{k\rho c_p} \quad (5-111)$$

aufgenommen, der z.B. angibt, wie groß die in einen Körper in einer bestimmten Zeit nach plötzlicher Erhöhung der Oberflächentemperatur eingedrungene Wärmemenge ist. Einsetzen dieser Ausdrücke in (5-110) ergibt

$$U_b = \frac{2b}{\sqrt{\pi t}} \quad (5-112)$$

Folgende Annahmen und Vereinfachungen wurden getroffen:

- Unter der Absorberfläche wird für einen Zeitabschnitt konstante und einheitliche Temperatur angenommen.
- Das Erdreich wird als homogene Masse mit gleich bleibenden Werten für Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität angenommen.

Nichtstationäre eindimensionale Wärmeleitung im Wasserspeicher

Der Wasserspeicher wird als eine ebene Platte betrachtet, wenn diese sich bei $t = 0$ auf einheitlicher Temperatur befindet und für $t > 0$ durch Wärmeübertragung an ein der Körper umgebendes Fluid gemäß zunächst der Randbedingung dritter Art erwärmt oder abgekühlt wird. Hierfür lässt sich der Produktansatz von Bernoulli erfolgreich verwenden (nach Grigull und Sandner 1990/). Im Folgenden wird die ebene Platte genauer behandelt. Wird die Plattendicke mit $2L$ bezeichnet und die Längenkoordinate z von der Mittellinie aus gezählt, so gilt

$$\vartheta = \vartheta_c \quad \text{für } -L < z < L, \quad (5-113)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = -\frac{h}{k} \vartheta \quad \text{für } z = L \text{ und } t > 0, \quad (5-114)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \frac{h}{k} \vartheta \quad \text{für } z = -L \text{ und } t > 0, \quad (5-115)$$

wobei

$$\vartheta = T - T_0 \quad (5-116)$$

und

$$\vartheta_c = T_w - T_0, \quad (5-117)$$

wenn die Fluidtemperatur ϑ_c gleich Null gesetzt wird ($T_w = T_0$). α und h/k sollen konstant sein. In der Lösung

$$\vartheta = C e^{(-q^2 \alpha t)} \psi(qz) \quad (5-118)$$

kann die nur von z abhängige Funktion ψ lauten

$$\psi = C' \cos(qz) + C'' \sin(qz). \quad (5-119)$$

Da nach unseren Voraussetzungen das Temperaturfeld symmetrisch zu $z = 0$ sein muss, kommt nur die \cos -Funktion in Frage, so dass wir bisher folgende Lösung erhalten haben (wobei $C' = C$ gesetzt wurde)

$$\vartheta(x, t) = C e^{(-q^2 \alpha t)} \cos(qz) \quad (5-120)$$

Die noch freien Konstanten C und q dienen zur Befriedigung der Anfangs- und Randbedingungen. Aus den Randbedingungen für $z = \pm L$ erhält man über die Gleichung (5-120)

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = C e^{(-q^2 \alpha t)} [\mp q \sin(qL)] \quad \text{für } z = \pm L \quad (5-121)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = -\frac{h}{k} \vartheta = -\frac{h}{k} C e^{(-q^2 \alpha t)} \cos(qL) \quad \text{für } z = L \quad (5-122)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \frac{h}{k} \vartheta = \frac{h}{k} C e^{(-q^2 \alpha t)} \cos(qL) \quad \text{für } z = -L \quad (5-123)$$

Das ergibt für die Konstante q die transzendente Gleichung

$$\frac{k}{h} \cos(qL) = \sin(qL) \quad (5-124)$$

oder mit der neuen Konstanten $\delta = qL$ und der Biotzahl $Bi = hL/k$:

$$\cot \delta = \frac{\delta}{Bi} \quad \text{oder} \quad \delta \tan \delta = Bi \quad (5-125)$$

Da die \cot -Funktion periodisch ist, erhält man aus den Schnittpunkten von $\cot \delta$ mit der

Geraden δ/Bi eine unendliche Zahl von δ -Werten $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k$ mit folgenden Grenzwerten:

- Für $Bi = \infty$ (Randbedingung 1. Art) wird $\delta_1 = \pi/2, \delta_2 = 3\pi/2, \delta_3 = 5\pi/2, \dots, \delta_k = (k-1/2)\pi$;
- Für $Bi = 0$ (adiabate Wand) wird $\delta_1 = 0, \delta_2 = \pi, \delta_3 = 2\pi, \dots, \delta_k = (k-1)\pi$;

Nur für die δ -Werte nach Gleichung (5-125), die auch die Eigenwerte des Problems genannt werden und die nur von Bi abhängen, wird die Fourier-Gleichung mit ihren Randbedingungen erfüllt. Die Lösung muss daher als Summe über die Teillösungen angeschrieben werden in der Form

$$\vartheta(z, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[C_k e^{(-\delta_k^2 Fo)} \cos\left(\delta_k \frac{z}{L}\right) \right] \quad (5-126)$$

mit der Fourierzahl $Fo = \alpha t/L^2$.

Bei der Erfüllung der Anfangsbedingung handelt es sich um die Entwicklung einer gegebenen Funktion in trigonometrischen Fourier-Reihen hier noch mit der Besonderheit, dass die Koeffizienten δ_k die transzendente Gleichung (5-125) erfüllen müssen. Das Ergebnis, dessen Ableitung hier übergangen wird, lautet für die ebene Platte

$$\frac{\partial \vartheta(z, t)}{\partial z} = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{2 \sin(\delta_k)}{\delta_k + \sin(\delta_k) \cos(\delta_k)} e^{(-\delta_k^2 \alpha \frac{t}{L^2})} \cos\left(\delta_k \frac{z}{L}\right) \right] \quad (5-127)$$

Für die Wärmestromdichte erhalten wir:

$$q_z = -k \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{-2\delta_k \sin(\delta_k)}{L \delta_k + \sin(\delta_k) \cos(\delta_k)} e^{(-\delta_k^2 \alpha \frac{t}{L^2})} \sin\left(\delta_k \frac{z}{L}\right) \right] (T_{4,0} - T_4) \quad (5-128)$$

An der Oberfläche ($z = \pm L$) ist

$$q_w = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{-2\delta_k \sin(\delta_k)^2}{L \delta_k + \sin(\delta_k) \cos(\delta_k)} e^{(-\delta_k^2 \alpha \frac{t}{L^2})} \right] (T_{4,0} - T_4) \quad (5-129)$$

Die durchschnittliche Wärmemenge q_{01} , die in der Zeit von $t = 0$ bis $t = t_1$ durch die Oberfläche tritt, wird

$$q_{01} = \frac{1}{t} \int_0^{t_1} q_w dt = \frac{1}{t} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{2L \sin(\delta_k)^2}{\alpha \delta_k [\delta_k + \sin(\delta_k) \cos(\delta_k)]} e^{(-\delta_k^2 \alpha \frac{t_1}{L^2})} \right] (T_{4,0} - T_4) \quad (5-130)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient des Wasserspeichers kann ermittelt werden

$$U_w = \frac{1}{t} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{2L \sin(\delta_k)^2}{\alpha \delta_k [\delta_k + \sin(\delta_k) \cos(\delta_k)]} e^{(-\delta_k^2 \alpha \frac{t_1}{L^2})} \right]. \quad (5-131)$$

5.1.5 Wärmeübertragung durch Strahlung

Solarstrahlung

Der Anhang enthält die detaillierten Gleichungen zur Ermittlung der diffusen und direkten Solarstrahlung.

Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung zwischen Himmel und Kollektorabdeckung

Die Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem Himmel und dem Vordach, welche die Umgebungstemperatur berücksichtigt, kann wie folgt errechnet werden (/Duffie und Beckman 1991/)

$$h_{rs} = \sigma \varepsilon (T_1 + T_s)(T_1^2 + T_s^2) \quad (5-132)$$

Die Himmelstemperatur für klaren Himmel wird nach /Swinbank 1963/ gegeben durch

$$T_s = 0,0552 T_0^{1,5} \quad (5-133)$$

/Berdahl und Martin 1984/ verwendeten umfangreiche Messdaten von den Vereinigten Staaten, um die effektive Himmelstemperatur in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur, der Temperatur bei ungesättigter Luft und der Zeit t von Mitternacht durch die folgende Gleichung zu ermitteln:

$$T_s = T_0 [0,711 + 0,0056(T_{dp} - 237,15) + 0,000073(T_{dp} - 273,15)^2 + 0,013 \cos(15t)]^{1/4} \quad (5-134)$$

Absorbierte Solarstrahlung

Die Solarstrahlung in $[\text{W}/\text{m}^2]$, die durch die Kollektorabdeckung absorbiert wird, ist

$$S_1 = \alpha_1 G, \quad (5-135)$$

$$S_2 = \tau_1 \alpha_2 G, \quad (5-136)$$

durch den Wasserspeicher

$$S_3 = \tau_2 \alpha_3 G \quad (5-137)$$

und durch den Absorber

$$S_4 = \tau_3 \alpha_4 G. \quad (5-138)$$

Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung zwischen Flächen

Die Strahlung zwischen zwei endlosen parallelen Platten wird wie folgt gegeben

$$h_{r21} = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (5-139)$$

$$h_{r32} = \frac{\sigma(T_2^2 + T_3^2)(T_2 + T_3)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1\right)} \quad (5-140)$$

$$h_{r43} = \frac{\sigma(T_3^2 + T_4^2)(T_3 + T_4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1}{\varepsilon_4} - 1\right)} \quad (5-141)$$

5.1.6 Optische Eigenschaften der Abdeckungen

Für eine glatte Oberfläche gilt die folgende Gleichung für Reflexion der unpolarisierten Strahlung bei Übergang von Medium 1 mit einem Brechungsindex n_1 zu Medium 2 mit einem Brechungsindex n_2 (/Duffie und Beckman 1991/)

$$r_{\perp} = \frac{[\sin(\theta_2 - \theta_1)]^2}{[\sin(\theta_2 + \theta_1)]^2} \quad (5-142)$$

$$r_{\parallel} = \frac{[\tan(\theta_2 - \theta_1)]^2}{[\tan(\theta_2 + \theta_1)]^2} \quad (5-143)$$

$$r = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (5-144)$$

Der Transmissionskoeffizient für die unpolarisierte Strahlung ist

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (5-145)$$

Die Absorption der Strahlung in einem teilweise transparenten Medium kann mit dem Ansatz

$$\tau_a = e^{\left(-\frac{Kt}{\cos\theta_2}\right)} \quad (5-146)$$

berechnet werden. Für Glas schwankt der Wert von K je nach Glasqualität von ca. 4 bis 32 m^{-1} .

Den Transmissions- und den Absorptionskoeffizient der einfachen Abdeckung erhält man mit

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (5-147)$$

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (5-148)$$

Nach /Duffie und Beckman 1991/ wird die oben dargestellte Methode empfohlen, wenn die Abdeckungen identisch sind. Für unterschiedliche Abdeckungen soll man die folgenden Gleichungen anwenden.

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_{\perp} + \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_{\parallel} \right] \quad (5-149)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\left(\rho_2 + \frac{\tau \rho_1 \tau_2}{\tau_1} \right)_{\perp} + \left(\rho_2 + \frac{\tau \rho_1 \tau_2}{\tau_1} \right)_{\parallel} \right] \quad (5-150)$$

5.2 Modellierung des Luftzustandes im Kamin

Der Kamin wird als Kreisrohr betrachtet, in dem zwischen der Kamininnenwand und der strömenden Luft konvektiv Wärme übertragen wird. Die Modellierung einer eindimensionalen Kanalströmung wird wiederum als ausreichend angesehen.

5.2.1 Massenbilanz der Luft im Kamin

Da die Mantelfläche des Kamins luftdicht ist und keine Öffnungen aufweist, kann kein Massentransport durch die Kaminwand erfolgen. Nach der Kontinuitätsgleichung gilt daher

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial z} = 0 \quad (5-151)$$

5.2.2 Impulsbilanz der Luft im Kamin

Der Kamin wandelt den vom Kollektor umgesetzten Wärmestrom in kinetische Energie und potenzielle Energie um. Dabei wirkt der durch die Temperaturerhöhung im Kollektor hervorgerufene Dichteunterschied der Luft als treibende Kraft. Die leichtere Luftsäule im Kamin ist am Austritt mit der Atmosphäre verbunden und erfährt einen Auftrieb. Es entsteht ein Druckunterschied zwischen Kaminfuß (Kollektorausstritt) und der Umgebung. Damit ist bestimmend für die gesamte Druckdifferenz das Dichteprofil und damit das Temperaturprofil mit der Höhe in und außerhalb des Turmes.

Die Bewegung eines Fluids bei freier Konvektion entsteht ausschließlich durch Dichteunterschiede als Folge von Temperaturunterschieden. Die aus der Temperaturabhängigkeit der Dichte resultierende Auftriebskraft ist die Kraft für die Bewegung des Fluids, die im stationären Fall durch gleichmäßige Wärmezufuhr bzw. abfuhr aufrecht erhalten wird. Die Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur ist damit grundsätzlich in allen Termen der Differenzialgleichungen zu berücksichtigen. In die Bewegungsgleichung

$$\rho \frac{D\vec{w}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (5-152)$$

wird zweckmäßigerweise statt der Massenkraft ρg die Auftriebskraft $(\rho - \rho_0)g$ eingeführt. Diese erhält man formal durch Zerlegung des Drucks in einen statischen und einen dynamischen Anteil,

$$p = p_{stat} + p_{dyn} \quad (5-153)$$

Aus der Gleichung (5-152) folgt für das statische Druckfeld des als bewegungslos gedachten Fluids

$$\frac{dp_{stat}}{dz} = \rho_0 g, \quad (5-154)$$

wobei der Index 0 bei der Dichte auf das bewegungslos vorausgesetzte Fluid hinweisen soll. Da das Fluid nicht notwendigerweise isotherm sein muss, kann ρ_0 , entsprechend dem Temperaturfeld $T(z)$, grundsätzlich eine beliebige Funktion des Orts z sein. Mit den Gleichungen

(5-153) und (5-154) erhält man aus der Gleichung (5-152)

$$\rho \frac{D\vec{w}}{Dt} = -\nabla p_{dyn} + \nabla \tau + (\rho - \rho_0)g \quad (5-155)$$

Der in (5-155) auftretende dynamische Anteil des Drucks ist nicht mehr identisch mit dem Druck p der thermodynamischen Zustandsgleichung in der Gleichung (5-152). Diese Tatsache ist jedoch nur dann von Bedeutung, wenn die Druckabhängigkeit der Stoffwerte berücksichtigt werden muss, was in der Regel nicht der Fall ist. Der statische Druck p_4 am Kamineintritt dient, wie erwähnt, als Randbedingung zur Kopplung der Impulsgleichungen für die Luft im Kollektor und im Kamin, $p_4 = p_3$. Die Impulsgleichung für die freie Konvektion erhält man zu

$$\frac{d\rho w^2}{dz} = \frac{dp}{dz} - (\rho - \rho_0)g. \quad (5-156)$$

Die Gleichung für die Luftgeschwindigkeit im Kamin lautet so

$$\frac{1}{2}\rho w^2 = \int_0^H (\rho_0 - \rho)dz - \Delta p_{reib} \quad (5-157)$$

oder

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(\int_0^H (\rho_0 - \rho)dz - \Delta p_{reib} \right)} \quad (5-158)$$

wobei Δp_{reib} die gesamten Druckverluste durch Reibung im Kollektor, Turmeinlauf und die Druckverluste im Kamin beinhaltet.

Aufgrund der in Manzanares gesammelten Erfahrungen wird außen eine Normalatmosphäre mit einem Temperaturhub von ca. 0,6 K/ 100 m und im Kamin ca. 1 K/ 100 m (adiabatische Expansion) angenommen, d.h für die Umgebung gilt:

$$T_0(z) = T_0(0) \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{z}{H_0} \right) \quad (5-159)$$

$$p_0(z) = p_0(0) \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{z}{H_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (5-160)$$

$$\rho_0(z) = \rho_0(0) \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{z}{H_0} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \quad (5-161)$$

wobei

$$H_0 = \frac{R_l T_\infty(0)}{g} \quad (5-162)$$

und $\kappa = 1,235$.

Im Kamin gilt

$$T_t(z) = T_{t, \text{ein}} \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{z}{H_0} \right) \quad (5-163)$$

$$p_t(z) = p_t(0) \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{z}{H_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (5-164)$$

$$\rho_t(z) = \rho_t(0) \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{z}{H_0} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \quad (5-165)$$

wobei

$$H_0 = \frac{R_l T_{t, \text{ein}}}{g} \quad (5-166)$$

und $\kappa = 1,4005$.

Dabei ist allerdings die atmosphärische Temperaturschichtung zu berücksichtigen, wobei diese durch die örtlichen meteorologischen Bedingungen (Standort, jeweilige Wetterbedingung und ggf. die Tageszeit) vorgegeben ist.

5.2.3 Energiebilanz der Luft im Kamin

Die vollständige Differenzialgleichung für die Enthalpie in einem differentiellen Höhenglement dz lautet:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{q} + \frac{Dp}{Dt} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5-167)$$

Folgende Einflüsse werden berücksichtigt:

- Die Enthalpie
- Die Verschiebearbeit
- Die Wärmeleitung in Strömungsrichtung
- Die über die Wand konvektiv zugeführte Wärmeenergie
- Die durch eine innere Wärmequelle zugeführte Wärmeenergie
- Die Dissipationsarbeit

Das Modell wird durch einige Annahmen vereinfacht:

- Die Änderung der Lufttemperatur im differentiellen Weegelement dz ist annähernd konstant, damit entfällt der Term der Wärmeleitung.
- Druckunterschiede im Weegelement werden vernachlässigt.
- Es existiert keine innere Wärmequelle.
- Die den Kamin durchströmende feuchte Luft wird als Gemisch zweier idealer Gase betrachtet.

Gemäß der in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Argumentation kann die

instationäre Differenzialgleichung bei Definition genügend kleiner Zeitintervalle in eine quasistationäre Gleichung umgeformt werden. Unter Berücksichtigung der Annahmen ergibt sich mit der Kontinuitätsgleichung folgende Differenzialgleichung der Lufttemperatur im Kamin:

$$q_i = \frac{(T_{f,i} - T_0)}{\left(\frac{1}{h_t D_{in}} + \frac{1}{2k} \ln \frac{D_{ex}}{D_{in}} + \frac{1}{h_\infty D_{ex}} \right)} + q_{i-1} \quad (5-168)$$

Als Randbedingung gilt, dass die Temperatur und Dichte der Luft am Kamineintritt gleich der Temperatur und Dichte der Luft am Austritt des Kollektors sind.

5.2.4 Bestimmung der Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten

Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten im Kamin (Kreisrohr) bei laminarer Strömung

Zwei dimensionslose axiale Längen, x^+ und x^* , werden wie folgt definiert

$$x^+ = \frac{x}{D_h Re} \quad (5-169)$$

$$x^* = \frac{x}{D_h Re Pr} \quad (5-170)$$

wobei

$$Re = \frac{wz}{\nu} \quad (5-171)$$

Zur Berechnung des Druckverlustkoeffizienten wird eine Lösung benutzt, welche die Vereinfachungen der Grenzschichttheorie $L_{th} = L_{hy}$ einbezieht.

$$\Delta p^* = 13,76 \sqrt{x^+} + \frac{K(\infty) + \xi_\infty Re x^+ - 13,76 \sqrt{x^+}}{1 + \frac{C}{(x^+)^2}} \quad (5-172)$$

Es ist offensichtlich, dass die Länge des thermischen Einlaufbereichs von Pr abhängig ist. Für $Pr > 1$, $L_{th} > L_{hy}$, für $Pr < 1$, $L_{th} < L_{hy}$. Zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten wird der Einlaufbereich als gleichzeitiger thermischer und hydrodynamischer Einlauf betrachtet. Eine Lösung, die mit den Vereinfachungen der Grenzschichttheorie arbeitet, wird benutzt.

Die dimensionslose thermische Einlauflänge L_{th}^* ist definiert als die beheizte oder gekühlte Rohrlänge innerhalb derer die lokale Nußeltzahl bis auf das 1,05-fache der Nußeltzahl für die entwickelte Strömung abgesunken ist (/Baehr und Stephan 1996/). Sie wird als

$$L_{th}^* = \frac{L_{th}}{D_h Re Pr} \quad (5-173)$$

definiert.

Bei laminarer voll ausgebildeter Strömung folgt die Nußeltzahl für das mit konstanter Temperatur beheizte Rohr

$$Nu = 3,657 \quad (5-174)$$

und der Druckverlustkoeffizient zu

$$f = \frac{16}{Re}. \quad (5-175)$$

Bei gleichzeitigem thermischen und hydrodynamischen Einlauf kann die mittlere Nußeltzahl im Einlaufbereich wie folgt berechnet werden. Passt man die Koeffizienten einer von /Stephan 1959/ entwickelten empirischen Korrelationsgleichung an die von /Hornbeck 1964/ numerisch berechneten Werte an, so erhält man

$$Nu_m = 3,657 + \frac{0,05565(x^*)^{-1,3335}}{1 + 0,8386Pr^{0,2}(x^*)^{-0,8559}} \quad (5-176)$$

Diese Beziehung weicht von /Hornbeck 1964/ angegebenen Werten für $Pr = 0,7$ im Bereich $10^{-4} \leq x^* \leq 8$ um weniger als 2% ab. Die thermische Einlauflänge wird mit $L_{th}^* = 0,037$ angegeben.

Zur Berechnung des Druckverlustkoeffizienten im Einlaufbereich wird die Gleichung (5-172) benutzt. Nach /Shah und London 1978/ sind folgende Parameter für $400 \leq Re \leq 2100$ gültig.

$$L_{hy}^+ = \frac{L_{hy}}{D_h Re} = 0,0565 \quad (5-177)$$

$$\xi_{\infty} Re = 64 \quad (5-178)$$

$$K(\infty) = 1,28 \quad (5-179)$$

$$C = 21 \times 10^{-5} \quad (5-180)$$

Nach /Churchill und Chu 1975/ wird die folgende Beziehung für $Re \leq 400$ und $x^+ < 0,005$ empfohlen.

$$L_{hy}^+ = 0,056 + \frac{0,60}{Re(1 + 0,035Re)} \quad (5-181)$$

$$\xi_{\infty} Re = 64 \quad (5-182)$$

$$K(\infty) = 1,20 + \frac{38}{Re} \quad (5-183)$$

$$C = 21 \times 10^{-5} \quad (5-184)$$

Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten im Kamin im Übergangsbereich

Die Berechnung der Wärmeübertragung im Übergangsbereich ist angesichts der vielen Parameter, die erforderlich sind, ziemlich unsicher, um die wärmebeeinflusste Übergangsströmung zu kennzeichnen. Die folgende Beziehung, die von /Churchill 1977/ für $2100 \leq Re \leq 10^6$, d.h. die laminare, turbulente Strömung und Übergangsströmung entwickelt wurde, empfiehlt sich

für die Berechnung der Nußeltzahl

$$(Nu)^{10} = (Nu_1)^{10} + \left\{ \frac{e^{\left(\frac{2200-Re}{365}\right)}}{Nu_1} + \frac{1}{(Nu_t)^2} \right\}^{-5} \quad (5-185)$$

$$Nu_t = Nu_0 + \frac{0,79(f/2)^{1/2} Re Pr}{(1 + Pr^{4/5})^{5/6}} \quad (5-186)$$

wobei für konstante Wandtemperatur $Nu_t = 3,657$ und $Nu_0 = 4,8$ ist.

/Churchill 1977/ entwickelte die folgende Beziehung für die Berechnungen des Druckverlustkoeffizienten, die den Übergangsbereich ($2100 \leq Re \leq 4000$) umfasst.

$$\frac{2}{f} = \left\{ \frac{1}{[(8/Re)^{10} + (Re/36500)^{20}]^{1/2}} + \left[2,21 \ln\left(\frac{Re}{7}\right) \right]^{10} \right\}^{1/5} \quad (5-187)$$

/Kakaç et al. 1987/ entwickelten die folgende Gleichung, die anwendbar auf den Übergangsbereich ($2300 \leq Re \leq 10^4$; $0,001 = \varepsilon/D = 0,05$) ist.

$$Nu = \frac{(Re - 1000)Pr(f/2)}{1 + (f/2)^{1/2} [(17,42 - 13,77Pr_t^{0,8})4,5Re_\varepsilon^{0,5} - 8,48]} \quad (5-188)$$

Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten im Kamin bei turbulenter Strömung

Nach /Gnielinski 1976/ berechnet sich die Nußeltzahl für den Übergangsbereich und turbulente Strömung ($2300 \leq Re \leq 5 \times 10^6$) im Kamin wie folgt

$$Nu = \frac{(f/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/2)^2 (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5-189)$$

Diese Beziehung stimmt insgesamt am besten mit den vorhandenen experimentellen Daten überein (/Kakaç et al. 1987/).

Die Nußeltzahl im Übergangsbereich für turbulente raue Strömung ($Re > 10^4$; $0,002 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$) kann wie folgt ausgedrückt werden (/Kakaç et al. 1987/).

$$Nu = \frac{Re Pr (f/2)}{1 + (f/2)^{1/2} (4,5 Re Pr_\varepsilon^{0,2} Pr^{0,5} - 8,48)} \quad (5-190)$$

Nach /Kakaç et al. 1987/ wird für eine voll ausgebildete turbulente Strömung die Beziehung Prandtl-Kármán-Nikuradse (PKN) als die Genaueste angesehen. Der Hauptnachteil der PKN-Formel ist, dass f nur implizit gegeben ist, weil f auf beiden Seiten der Gleichung auftritt. Die explizite Gleichung durch /Colebrook 1939/ erbringt numerische Werte innerhalb von $\pm 1\%$ von PKN für glatte Rohre ($4000 < Re < 10^7$ und $2\varepsilon/D < 10^{-8}$).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,5635 \ln\left(\frac{Re}{7}\right) \quad (5-191)$$

Für ein rauhes Rohr ($4000 < Re < 10^8$ und $10^{-8} < 2\varepsilon/D < 10^{-1}$) gilt (/Serghides 1984/):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A - \frac{(A - B)^2}{A - 2B + C} \quad (5-192)$$

$$A = -0,8686 \ln\left(\frac{2\varepsilon/D}{7,4} + \frac{12}{Re}\right) \quad (5-193)$$

$$B = -0,86868 \ln\left(\frac{2\varepsilon/D}{7,4} + \frac{2,5A}{Re}\right) \quad (5-194)$$

$$C = -0,8686 \ln\left(\frac{2\varepsilon/D}{7,4} + \frac{2,51B}{Re}\right) \quad (5-195)$$

/Kakaç et al. 1987/ haben Nu_m für einen rechteckigen Einlauf durch die folgende Gleichung ausgedrückt ($x/D_h > 3$)

$$\frac{Nu_m}{Nu_\infty} = 1 + \frac{2,4254}{(x/D_h)^{0,676}} \quad (5-196)$$

wobei Nu_∞ die Nußeltzahl für die voll ausgebildete Strömung ist. Bei konstanter Wandtemperatur ist $Nu_\infty = 3,6567935$. Dann erhält man

$$Nu_m = 3,6567935 + \frac{8,869187}{(x/D_h)^{0,676}} \quad (5-197)$$

Einige Versuche, die in die Kategorie der integralen Methoden fallen, wurden durchgeführt, um das Problem der turbulenten hydrodynamischen Strömung im Einlauf eines Kreisrohrs zu lösen. Die analytische Lösung der impliziten Gleichung von /Zhi-qing 1982/ ist für diesen Bereich besonders anwendbar. Entsprechend dieser Analyse wird die Geschwindigkeitsverteilung im hydrodynamischen Einlauf wie folgt gegeben:

$$\frac{u}{u_{max}} = (y/\delta)^{1/7} \quad \text{für } 0 \leq y \leq \delta \quad (5-198)$$

$$\frac{u}{u_{max}} = 1 \quad \text{für } \delta \leq y \leq r \quad (5-199)$$

$$\frac{u_m}{u_{max}} = 1 - \frac{1}{4}\left(\frac{\delta}{r}\right) + \frac{1}{15}\left(\frac{\delta}{r}\right)^2 \quad (5-200)$$

wobei δ die Dicke der Strömungsgrenzschicht ist. Sie ändert sich mit der axialen Koordinate x in Übereinstimmung mit der Beziehung

$$\frac{x/D_h}{Re^{1/4}} = 1,4036\left(\frac{\delta}{r}\right)^{5/4} \left[1 + 0,1577\left(\frac{\delta}{r}\right) - 0,1793\left(\frac{\delta}{r}\right)^2 - 0,0168\left(\frac{\delta}{r}\right)^3 + 0,0064\left(\frac{\delta}{r}\right)^4 \right] \quad (5-201)$$

Der Druckverlust Δp^* , der Korrekturterm für den Druck $K(x)$, und der Druckverlustkoeffizient nach Fanning f_{app} werden wie folgt gegeben:

$$\Delta p^* = \left(\frac{u_{max}}{u_m}\right)^2 - 1 \quad (5-202)$$

$$K(x) = \Delta p^* - 0,316 \frac{x/D_h}{Re^{1/4}} \quad (5-203)$$

$$f_{app} Re^{1/4} = \frac{\Delta p^*}{4x/(D_h Re^{1/4})} \quad (5-204)$$

5.3 Turbinen

In Aufwindkraftwerken dienen die Turbinen neben der Umwandlung der Strömungsenergie in technische Arbeit zur Steuerung des Durchsatzes an Arbeitsluft. Daran gekoppelt ist die Aufteilung der Gesamtleistung in die kinetische Leistung der Luft und in die mechanische Leistung der Strömung zur Elektrizitätserzeugung. Die Temperaturabnahme der Luft beim Durchströmen der Turbine ist vernachlässigt.

$$\Delta p_{turb} = \Delta p_{ges} - \frac{1}{2}\rho w^2 \quad (5-205)$$

Der Turbinendruckabfall ist eine Funktion der gesamten Druckdifferenz,

$$\Delta p_{turb} = x\Delta p_{ges} \quad (5-206)$$

wobei der Druckentnahmefaktor x als der Anteil der gesamten Druckdifferenz bezeichnet wird, der an der Turbine abfällt. Damit ergibt sich für die an der Turbine verfügbare Druckdifferenz

$$x\Delta p_{ges} = \Delta p_{ges} - \frac{1}{2}\rho w^2 \quad (5-207)$$

und für die Geschwindigkeit

$$\frac{1}{2}\rho w^2 = (1-x)\Delta p_{ges} \quad (5-208)$$

$$\frac{1}{2}\rho w^2 = (1-x)\frac{1}{2}\rho w_{ges}^2 \quad (5-209)$$

$$w = w_{ges}\sqrt{1-x} \quad (5-210)$$

wobei

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho}(\Delta p_{ges} - \Delta p_{reib})} \quad (5-211)$$

$$w_{ges} = \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p_{ges}} \quad (5-212)$$

Die theoretische nutzbare Leistung kann wie folgt berechnet werden

$$P = \Delta p A w \eta_{sys} \quad (5-213)$$

$$P = \Delta p_{ges} A w_{ges} \eta_{sys} x \sqrt{1-x} \quad (5-214)$$

Der Wirkungsgrad des Kamins kann wie folgt ermittelt werden (s. Abschnitt 3.3.1)

$$\eta_k = \frac{gH_t}{c_p T_0} \quad (5-215)$$

Der Wirkungsgrad des gesamten Systems lässt sich wie folgt umrechnen

$$\eta_{\text{Sys}} = \eta_c \eta_k \eta_M \quad (5-216)$$

wobei η_M der Wirkungsgrad des Turbogeneratorsatzes ist.

5.4 Reibungsverlust im Turmeinlauf

Nach /Eck 1991/ lässt sich der Druckverlustkoeffizient für Druckabfalls durch Reibung im Turmeinlauf nach Abb. 5-10 entnehmen. Die Beziehung $r/d = 0,4$ wird in dieser Arbeit benutzt.

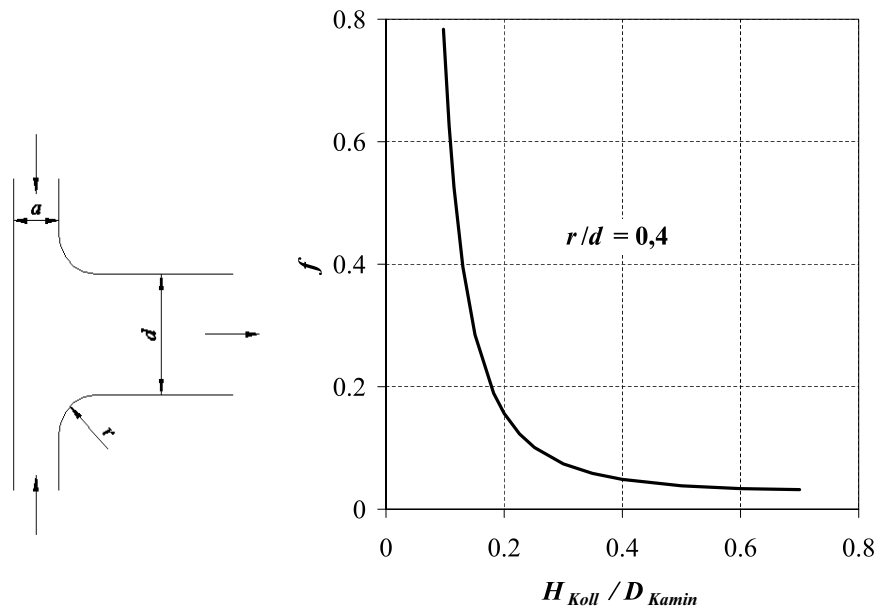


Abb. 5-10: Einströmung in eine abgerundete Rohrleitung kurz vor einer Wand.

5.5 Stoffwerte der feuchten Luft

Der Anhang enthält die detaillierte Gleichung zur Ermittlung der Stoffwerte der feuchten Luft.

5.6 Simulationsrechnung

Um das entwickelte physikalische Modell zur Berechnung der relevanten Größen einsetzen zu können, wurde ein Rechenprogramm erstellt. Ein Programmlauf soll die Werte der Temperatur, der relativen Feuchte und des Massenstroms der Luft im System für einen ganzen Tag liefern. Die verwendete Programmiersprache Delphi eignet sich allgemein gut zur Formulierung technisch-naturwissenschaftlicher Problemstellungen. Die komplexen Gleichungen lassen eine geschlossene Lösung nicht zu, so dass auf iterative Lösungsmethoden zurückgegriffen werden muss. Um die Fähigkeit des Rechners auszunützen, eine große Zahl von gleichartigen Rechenoperationen in sehr kurzer Zeit ausführen zu können, wurden die Tageszeit, die Kollektorlänge und die Kaminhöhe in Zeit bzw. Längenschritte unterteilt. Diese diskontinuierliche Betrachtungsweise führt, wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, zu einem quasistationären Modell, wobei sich in der großen Anzahl von identischen Operationen nur die Rechenparameter ändern. Die

Zahl der Zeit- und Längenschritte darf nicht zu groß gewählt werden, da dies die Rechenzeit verlängert. Wie bei der Modellierung der thermodynamischen Vorgänge in der Anlage müssen die Zeitschritte jedoch genügend klein sein, so dass zeitliche Änderungen der Größen während eines Zeitintervalls vernachlässigt werden können. Mit der folgenden Argumentation soll die Wahl der Länge der Zeitschritte begründet werden. Als Ausgangspunkt werden diejenigen Größen betrachtet, welche die zeitlichen Änderungen der relevanten Zustandsgrößen der Luft bewirken. Dabei handelt es sich um die Umgebungsdaten, die das Wettergeschehen beschreiben, sowie um die Temperatur der Bodenoberfläche unter der Anlage. Es wird angenommen, dass in einem Zeitraum, in dem die zeitlichen Änderungen der Umgebungsgrößen vernachlässigt werden können, auch die resultierende Änderung des Luftzustandes in der Anlage vernachlässigt werden kann. Dies bedeutet, dass sich die Wahl der Länge eines Zeitschrittes an der sinnvollen Erfassung des Wettergeschehens orientiert. Geläufig ist dabei die Erfassung der Wetterdaten in Zeitschritten von jeweils 600 Sekunden, wie im Falle der Anlagen in Manzanares (/Haaf et al. 1986/). Gemäß dieser Argumentation wurde in dem Rechenmodell die Einteilung eines Tages in 144 Zeitschritte von jeweils 600 Sekunden vorgenommen.

5.6.1 Programmstruktur

Dieser Abschnitt gibt Aufschluss über die Struktur des Rechenprogramms (s. Abb. 5-11) und eine kurze Übersicht über die Funktion der einzelnen Programmbausteine.

Eingaben

Der Anwender soll die Werte der nicht zeitabhängigen Parameter eingeben. Ihre Eingabe erfolgt menügesteuert mit vorgegebenen Standardwerten und Änderungsmöglichkeit. Die Werte für folgende Parameter sind einzugeben:

- Kollektorparameter
 - dimensionsbehaftete Größen
 - Durchmesser [m]
 - Vordachhöhe am Eintritt [m]
 - Vordachhöhe am Austritt [m]
 - Physikalischen Eigenschaften der Abdeckungen
 - Transmissionsgrad
 - Reflexionsgrad [-]
 - Emissionsgrad [-]
 - Extinktionskoeffizient [1/m]
 - Dicke [m]
- Kaminparameter
 - dimensionsbehaftete Größen

- Durchmesser am Eintritt (unten) [m]
- Durchmesser am Austritt (oben) [m]
- Höhe [m]
- Dicke der Wand [m]
- Thermische Eigenschaften
 - Wärmeleitfähigkeit der Wand [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
- Absorberparameter
 - Optische Eigenschaften
 - Absorptionsgrad [-]
 - Emissionsgrad [-]
 - dimensionsbehaftete Größen
 - Tiefe [m] (zum Visualisieren der Temperatur im Boden)
 - Dicke des Wasserspeichers [m] (falls vorhanden)
 - Absorptionsgrad, Emissionsgrad und Transmissionsgrad der Oberseite des Wasserspeichers [-]
 - Abstand zwischen dem Absorber und dem Boden [m] (für thermischen Kontaktwiderstand)
 - Thermische Eigenschaften
 - Wärmeleitfähigkeit des Bodens [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
 - Temperaturleitfähigkeit des Bodens [m^2/s]
 - oder Wärmeeindringkoeffizient (thermische Effusivität) des Bodens [$\text{Ws}^{1/2}/\text{Km}^2$]
- Umgebung
 - Thermische und hydrodynamische Eigenschaften
 - Windgeschwindigkeit [m/s]
 - Umgebungstemperatur [K]
 - Taupunkttemperatur [K]
 - Umgebungsdruck [Pa]
 - Optische Eigenschaften
 - Horizontalsicht [m]
 - Optische Dicke der Auslöschung durch Zirruswolken [m]
- Standort
 - Breitengrad [°]
 - Längengrad [°]

- Datum
- Tageszahl des ersten zu simulierenden Tages
- Anzahl der zu simulierenden Tage
- Längengrad der Zeitzone [°]
- Oberflächenalbedo [-]

- Rechenparameter
 - Maximaler Fehler [-]
 - Anzahl von Längenschritte [-]
 - Zeitschrittweite [s]

- Turbine
 - Druckentnahmefaktor [-]
 - Wirkungsgrad des Turbogeneratorsatzes [-]

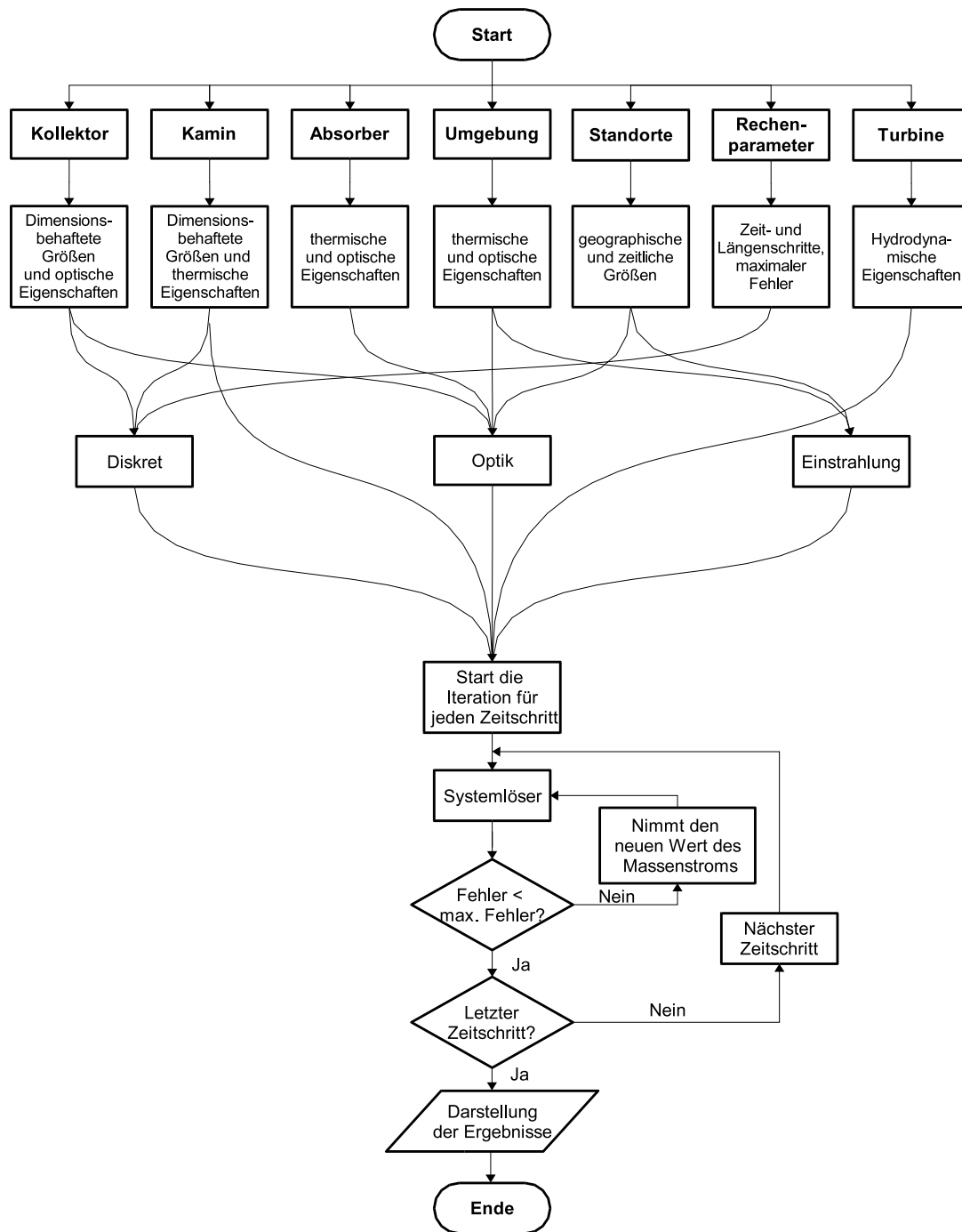


Abb. 5-11: Struktur des Simulationsprogramms

Unterprogramm Einstrahlung

Das Unterprogramm berechnet nach den Gleichungen (A-1) bis (A-19) die diffuse und direkte Solarstrahlung in Abhängigkeit von den Standortparametern.

Unterprogramm Optik

Für die Abdeckung werden die Absorptions- und Transmissionsgrade bei diffuser und direkter Einstrahlung durch die Gleichungen (5-140) bis (5-146) ermittelt.

Unterprogramm Eigenschaften

Das Unterprogramm ermittelt die folgenden Eigenschaften von Luft und Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur

- Dichte [kg/m^3]
- spezifische isobare Wärmekapazität [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]
- isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient [$1/\text{K}$]
- Wärmeleitfähigkeit [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]
- dynamische Viskosität [$\text{kg/m}\cdot\text{s}$]
- kinematische Viskosität [m^2/s]
- Temperaturleitfähigkeit [m^2/s]
- Prandtl-Zahl [-]

Um diese Eigenschaften zu berechnen, wurden die Daten aus einschlägigen Tabellenwerken (z. B. /Wärmeatlas 1997/) entnommen und für eine beliebige Temperatur interpoliert. Hier wird auch die spezifische Dichte von feuchter Luft in Abhängigkeit von der Temperatur und der Luftfeuchte nach den Gleichungen (C-1) bis (C-8) ermitteln.

Systemlöser

Das Unterprogramm beinhaltet die Rechenschleife über die Länge des Kamins und des Kollektors. Hier werden die in Tabelle 5-2 und Tabelle 5-1 dargestellten thermischen und hydrodynamischen Parameter ermittelt.

Tabelle 5-1: Berechnete Parameter für den Kamin

Parameter	Gleichung
Re	(5-171)
q	(5-168)
w	(5-158)

Tabelle 5-2: Berechnete Parameter für den Kollektor

Parameter	Gleichung
h_1 bis h_8, h_w	(5-92) - (5-101)
$h_{r21}, h_{r32}, h_{r43}$	(5-139), (5-141)
T_s	(5-134)
h_{rs}	(5-132)
U_t	(5-102)
S_1, S_2, S_3, S_4	(5-135), (5-136), (5-137), (5-138)
T_0	(5-159)
$T_1, T_{f1}, T_2, T_{f2}, T_3, T_{f3}, T_4, T_{f4}, T_5$	(5-35), (5-50), (5-65), (5-84)
T_b	(5-105)
U_b	(5-112)
U_w	(5-131)

Darstellung der Ergebnisse

Dieses Programm bietet folgende Möglichkeiten zur Darstellung der Ergebnisse:

- Temperatur und Wärmeübergangskoeffizienten der Luft, der Abdeckung und des Bodens, Geschwindigkeiten und Luftfeuchtigkeit in jedem Längenelement des Kollektors zu einem anzugebenden Zeitpunkt.
- Temperatur und Wärmeübergangskoeffizienten der Luft, Geschwindigkeiten und Luftfeuchtigkeit an jedem Längenelement des Kamins zu einem anzugebenden Zeitpunkt.
- Massenstrom, Einstrahlung, Leistung, Wirkungsgrad, Transmissionsgrad, Absorptionsgrad, Umgebungstemperatur in Abhängigkeit der Höhe über den Tag.

Die Ergebnisse können in eine Datei geschrieben werden. Zusätzlich werden Daten für die graphische Ausgabe erstellt, folgende Darstellungen sind möglich:

- Verlauf der Luft-, Boden und Abdeckungstemperatur, der Geschwindigkeit und der Wärmeströme über der Kollektorlänge zu einem beliebigen Zeitpunkt
- Verlauf der Lufttemperatur, der Geschwindigkeit und der Wärmeströme über der Kaminlänge an einem beliebigen Zeitpunkt

5.7 Validation des Modells

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Messungen von Manzanares und der Nachrechnungen des angewendeten Modells dargestellt und verglichen. Das energetische Verhalten der untersuchten Anlagen soll jeweils anhand eines repräsentativen Tages dar-

gestellt werden. Zu diesem Zweck wurden die Tage 7. und 8. Juni 1987 ausgewählt.

Als wesentliche Daten sind hier folgende Größen auszusehen:

- Globalstrahlungsflussdichte
- Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Höhe
- Relative Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit
- Druckentnahmefaktor

Vor Beginn der Simulationsrechnung wurden die Werte der konstanten Parameter festgelegt, die in der Tabelle 5-3 aufgeführt sind.

Tabelle 5-3: Eingabewerte für das Programm

	Werte	Einheit
Vordachhöhe am Eintritt des Kollektors	2	m
Vordachhöhe am Austritt des Kollektors	6	m
Kollektordurchmesser	250	m
Einfache Abdeckung	Ja	-
Konstanter Transmissionsgrad	Ja, 0,90	-
Kamindurchmesser am Eintritt	10	m
Kamindurchmesser am Austritt	10	m
Kaminhöhe	200	m
Thermischer Verlust im Kamin	Nein	-
Absorptionsgrad des Absorbers	0,93	-
Emissionsgrad des Absorbers	0,90	-
Rauheitshöhe des Bodens	0,05	m
Wärmeleitfähigkeit des Bodens	0,6	W/m·K
Temperaturleitfähigkeit des Bodens	$2,91 \times 10^{-7}$	m ² /s
Standort	Manzanares	-
Breitengrad	39,03 (Nord)	°
Längengrad	3,14 (Ost)	°
Datum	07 und 08.06.1987	-
Maximaler Fehler bei jeder Zeitschritte	0,1	%
Anzahl von Längenschritte	200	-
Zeitschritte	600	s
Wirkungsgrad des Turbogeneratorsatzes	0,42	

Abb. 5-12 und Abb. 5-13 zeigen den Verlauf der Globalstrahlungsflussdichte und der Außenwindgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit am 7. bzw. 8. Juni 1987. Die deutlichen Einbrüche im Strahlungsverlauf sind auf die abschattende Wirkung von vorüberziehenden Wolken zurückzuführen. Im Falle einer Abschattung des Strahlungsmessgerätes gilt der gesamte Kollektor als abgeschattet; Teilabschattungen können daher nicht berücksichtigt werden. Nach diesen Abbildungen traten an dem betreffenden Tag nur leichte Winde auf. Abb. 5-14 und Abb. 5-15 stellen den Verlauf der relativen Feuchte der Außenluft und der Temperatur am 7. bzw. 8. Juni 1987 dar. Abb. 5-16 und Abb. 5-17 stellen den Verlauf der Temperatur im Kollektor an 7. bzw. 8. Juni 1987 dar.

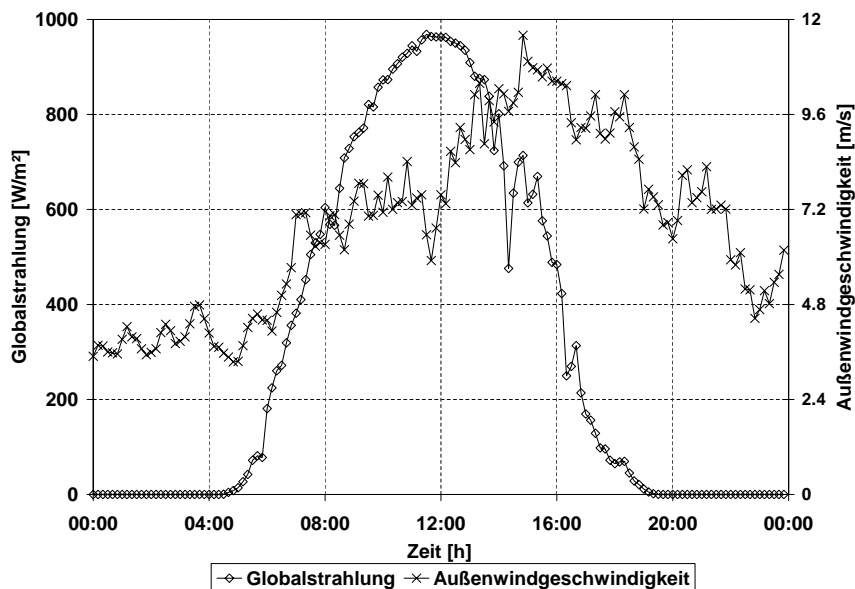


Abb. 5-12: Der zeitliche Verlauf der Globalstrahlung und der Außenwindgeschwindigkeit am 7. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)

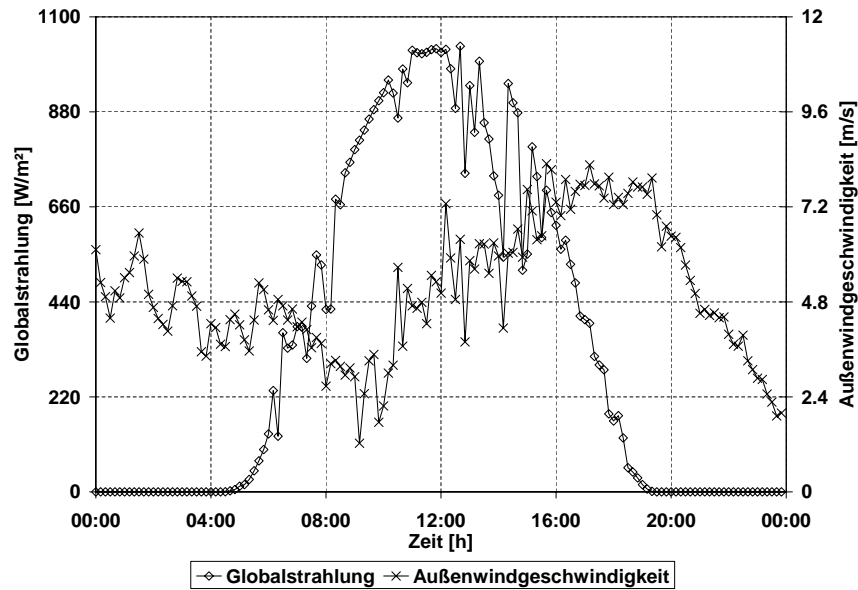


Abb. 5-13: Der zeitliche Verlauf der Globalstrahlung und der Außenwindgeschwindigkeit am 8. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)

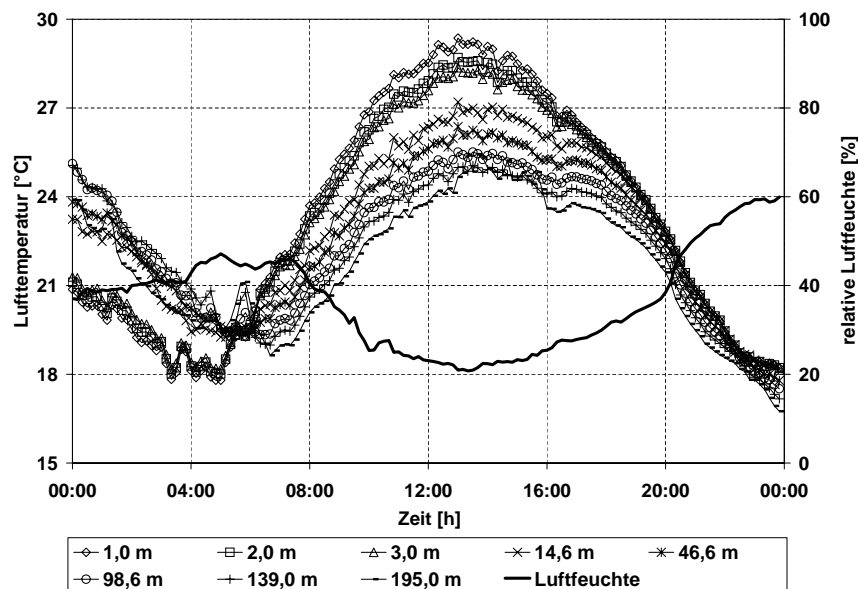


Abb. 5-14: Der zeitliche Verlauf der relativen Feuchte der Außenluft und der Temperatur in verschiedenen Höhen am 7. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)

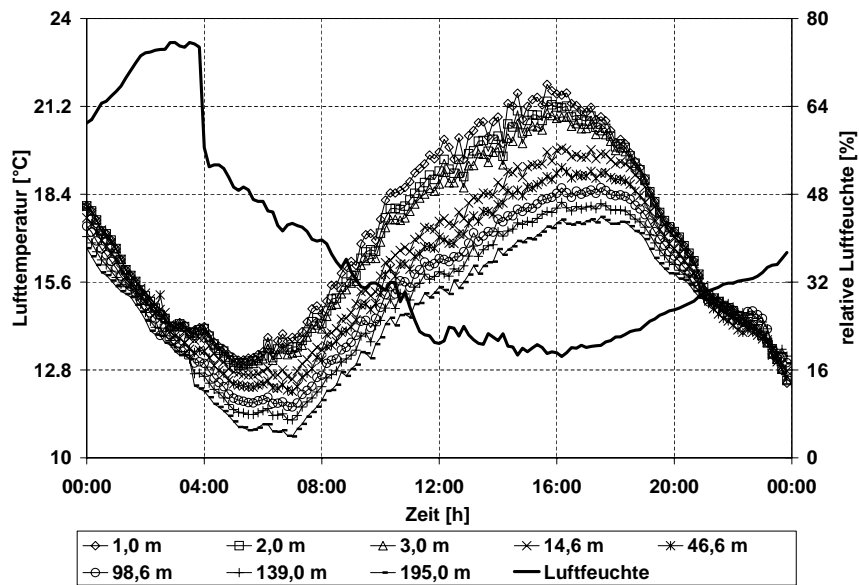


Abb. 5-15: Der zeitliche Verlauf der relativen Feuchte der Außenluft und der Temperatur in verschiedenen Höhen am 8. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)

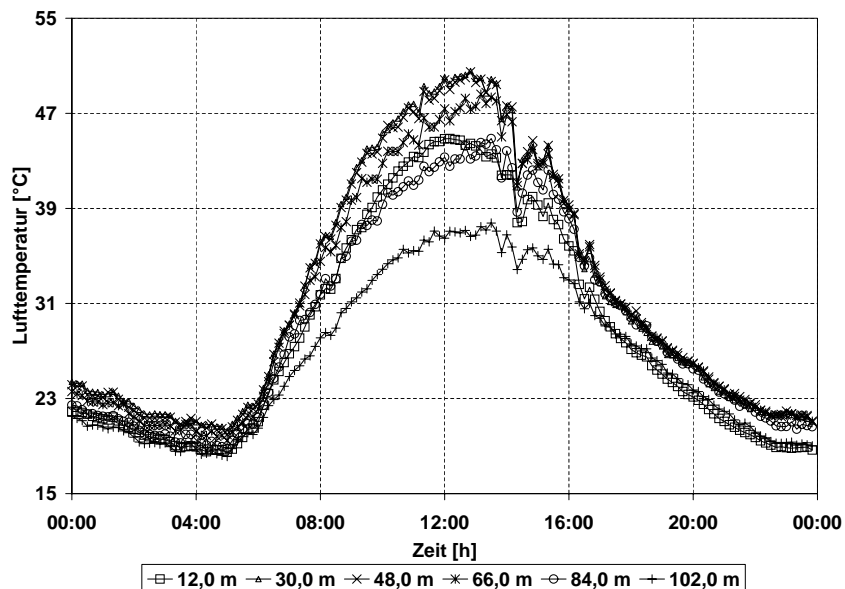


Abb. 5-16: Der zeitliche Verlauf der Temperatur bei verschiedenen Radien des Kollektors am 7. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)

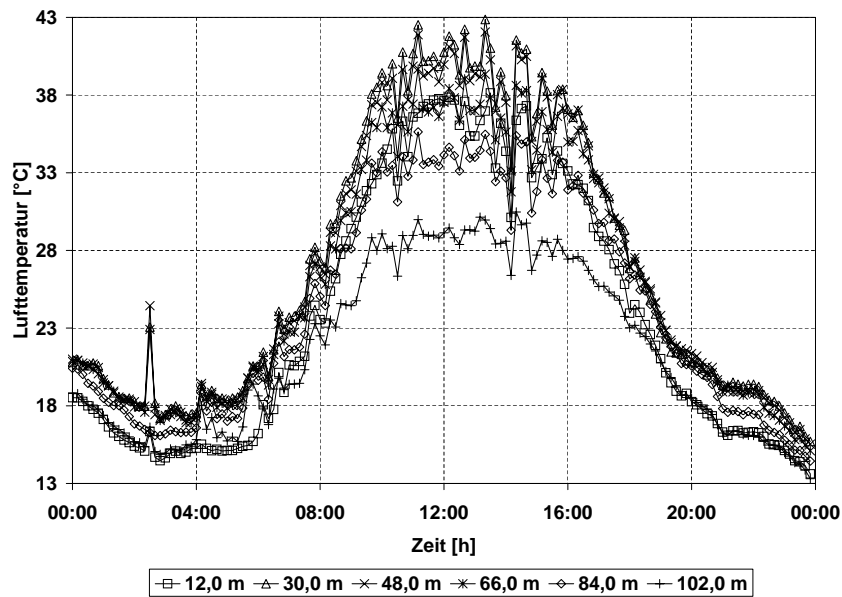
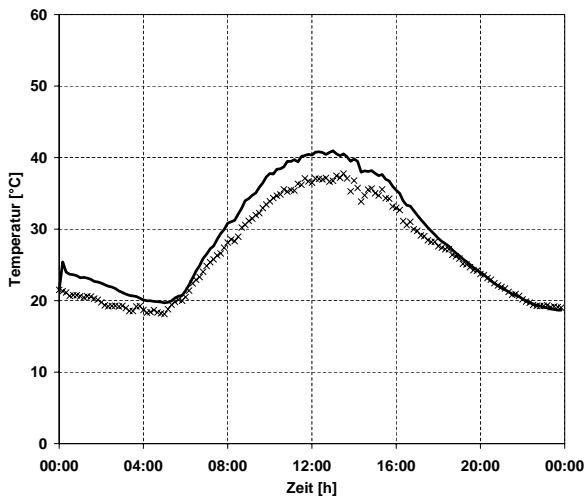


Abb. 5-17: Der zeitliche Verlauf der Temperatur bei verschiedenen Radien des Kollektors am 8. Juni 1987 (Quelle: /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/)

5.7.1 Ergebnisse der Untersuchungen

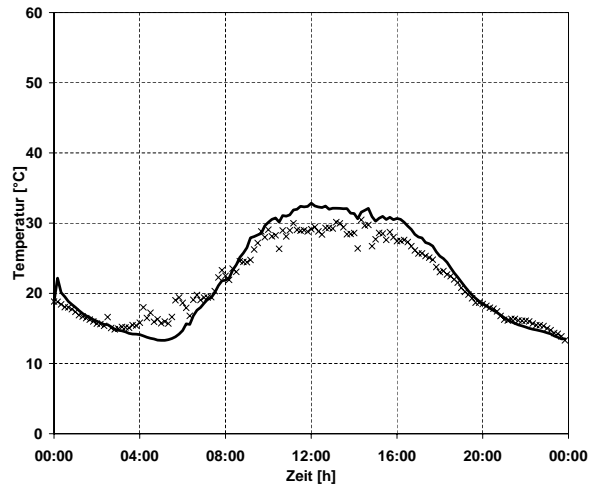
Das primäre Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung des Luftzustandes im Kollektor. Zunächst soll dabei der Verlauf der Lufttemperatur betrachtet werden. Abb. 5-18 - Abb. 5-27 zeigen den Verlauf der berechneten und gemessenen Lufttemperatur an verschiedenen Radien des Kollektors (R_c) in Abhängigkeit von der Tageszeit am 7. und 8. Juni. 1987. Deutlich ist der erwartete Temperaturanstieg im Kollektor zu erkennen. Der Einfluss der Abschattung durch Wolken auf die Lufttemperatur ist klar erkennbar. Mit der Temperaturerhöhung der Luft im Kollektor geht eine Verringerung der relativen Luftfeuchte einher (Abb. 5-28 und Abb. 5-29).

Speziell während der Nacht mit relativ geringer Lufttemperatur und höherer relativer Luftfeuchte fallen starke Differenzen zwischen den gemessenen und den nachgerechneten Werten der Lufttemperatur auf (Abb. 5-18 bis Abb. 5-27). Ein Blick auf das h - x -Diagramm von Mollier klärt diesen Umstand auf: ausgehend vom Umgebungszustand mit bekannter Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte wird die absolute Feuchte der Luft berechnet, die sich bei der Durchströmung der Anlage nicht ändert. Daher ist deutlich, dass im Bereich einer Temperatur von etwa 20 °C und einer relativen Feuchte von etwa 80% ein geringer Fehler bei der Berechnung der Lufttemperatur eine wesentlich größere Abweichung der relativen Luftfeuchte mit sich bringt als im Bereich einer Lufttemperatur von etwa 50 °C. Während des Tages mit relativ hohen Temperaturen ergibt sich daher eine bessere Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten.



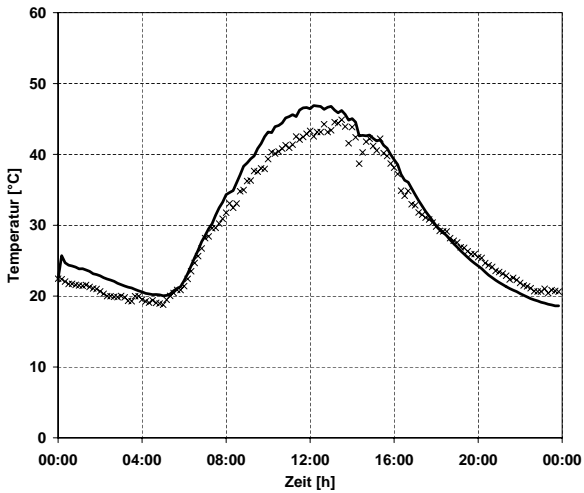
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-18: Lufttemperatur ($R_c=102$ m - 7.6.87)



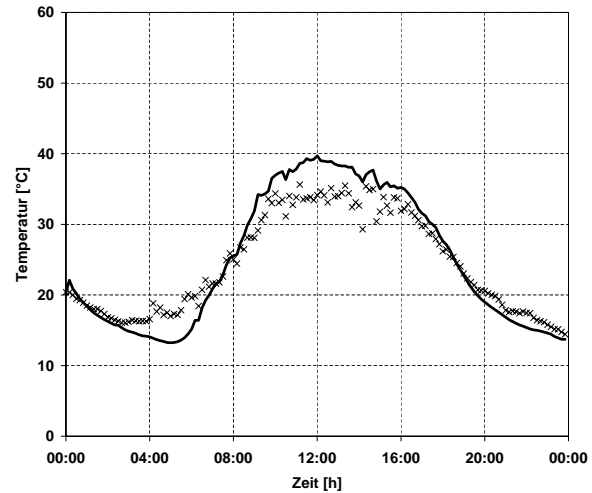
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-19: Lufttemperatur ($R_c=102$ m - 8.6.87)



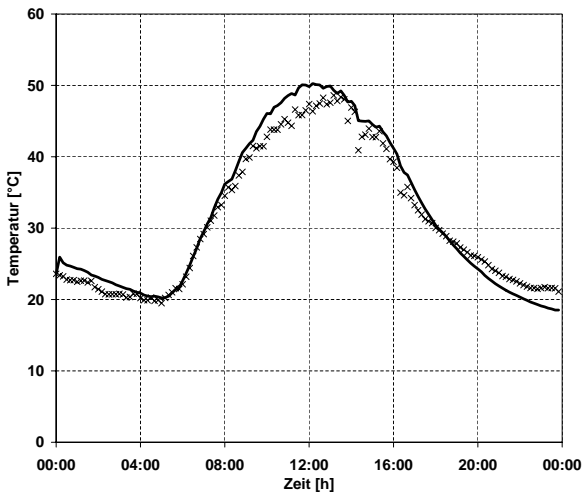
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-20: Lufttemperatur ($R_c=84$ m - 7.6.87)



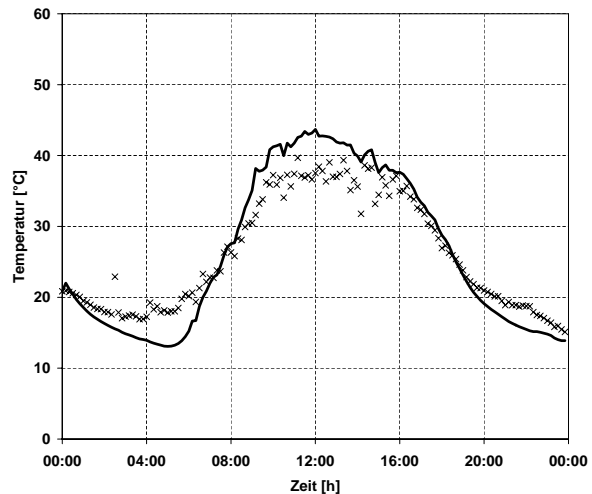
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-21: Lufttemperatur ($R_c=84$ m - 8.6.87)



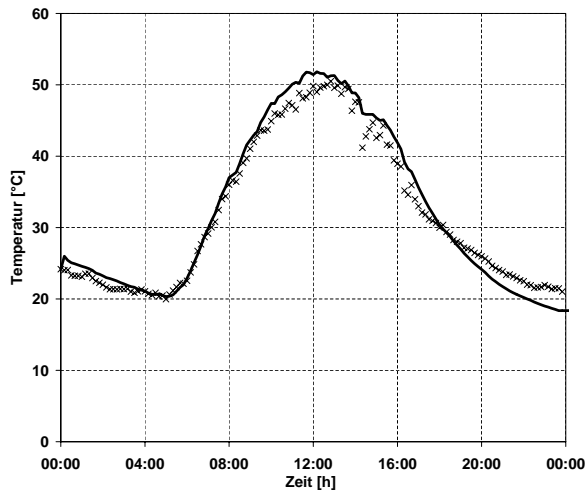
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-22: Lufttemperatur ($R_c=66$ m - 7.6.87)



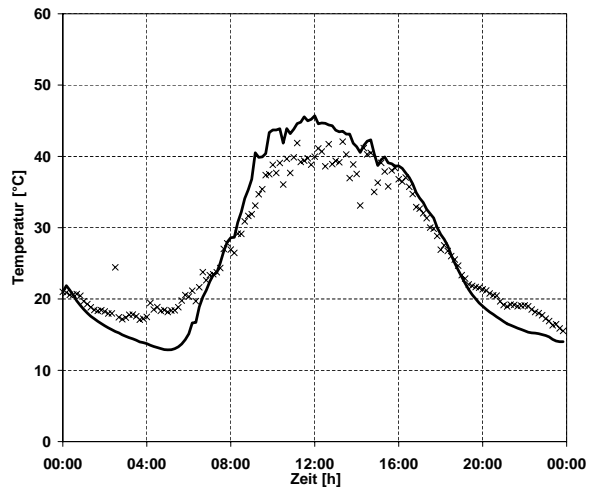
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-23: Lufttemperatur ($R_c=66$ m - 8.6.87)



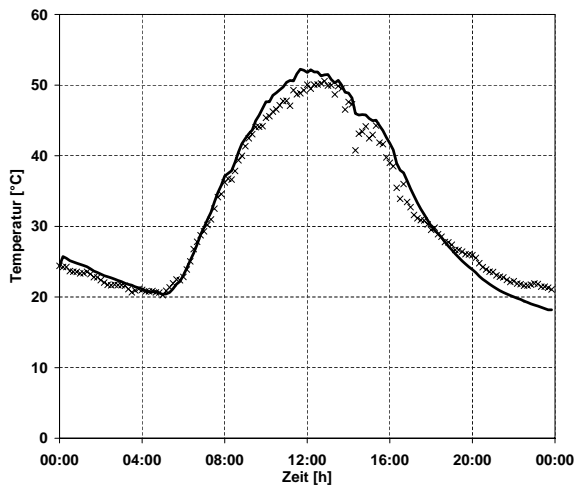
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-24: Lufttemperatur ($R_c=48\text{ m} - 7.6.87$)



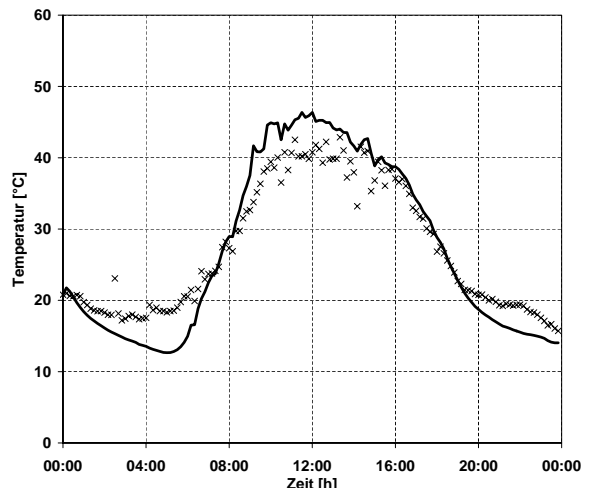
× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-25: Lufttemperatur ($R_c=48\text{ m} - 8.6.87$)



× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-26: Lufttemperatur ($R_c=30\text{ m} - 7.6.87$)



× Messergebnisse von Manzanares (/Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002)
— Simulationsprogramm

Abb. 5-27: Lufttemperatur ($R_c=30\text{ m} - 8.6.87$)

Bei der Durchströmung des Kollektors fällt die relative Feuchte kontinuierlich ab, wie Abb. 5-30 und Abb. 5-31 für den Zeitpunkt 12:00 Uhr zeigen. Die instationäre thermischen Eigenschaften des Bodens (/Haaf et al. 1986/, Seiten 101-108) spielen auch eine wichtige Rolle in der Funktionsfähigkeit des Kollektors und verursachen diese Abweichungen mit.

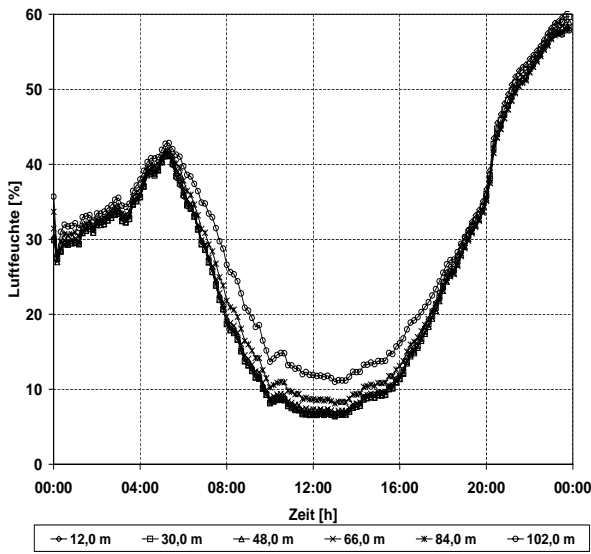


Abb. 5-28: Der berechnete Verlauf der Luftfeuchte am 7.6.1987

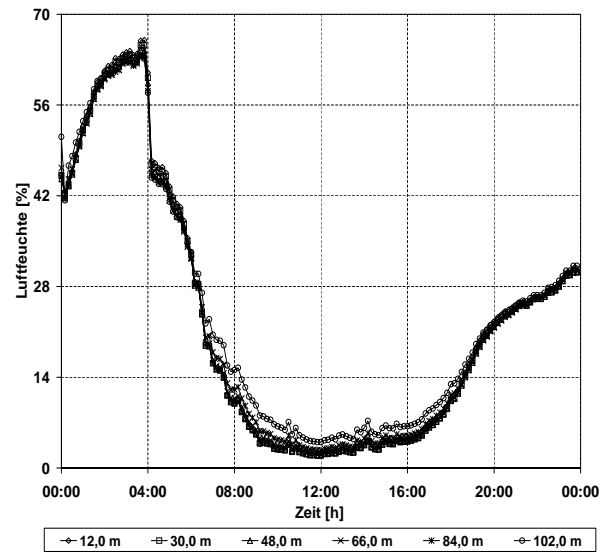


Abb. 5-29: Der berechnete Verlauf der Luftfeuchte am 8.6.1987

Aus Abb. 5-30 und Abb. 5-31 geht der berechnete Verlauf der Lufttemperatur über der Länge des Kollektors um 12 Uhr mittags des betreffenden Tages hervor. Deutlich ist der erwartete Temperaturanstieg im Kollektor zu erkennen. Die maximale Temperaturerhöhung der Luft im Kollektor beträgt ca. 24,3°C am 7.6.1987 bzw. 27,9 °C am 8.6.1987. Deutlich ist die abnehmende Steigung der Kurve zu erkennen, dies ist auf den abnehmenden Temperaturgradient zwischen der Abdeckung und der strömenden Luft zurückzuführen. Aufgrund der Steigung der Wärmeübertragung bei kleinem Radius (höherer Wärmeübergangskoeffizient wegen höherer Reynoldszahl, Abb. 5-32 und Abb. 5-33) nimmt die Temperatur des Absorbers ab einem bestimmten Punkt ($R \cong 80$ m) ab.

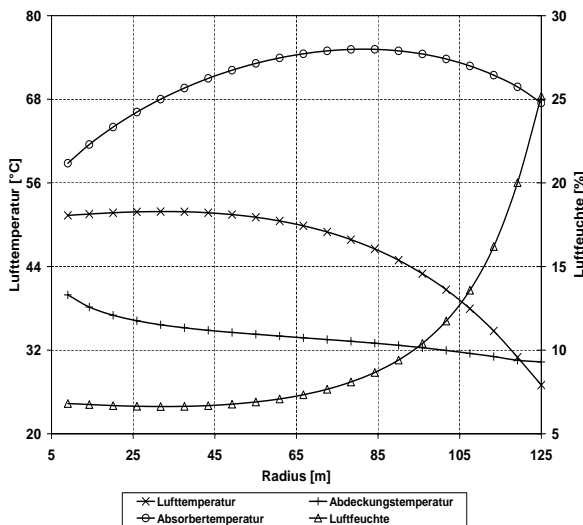


Abb. 5-30: Der berechnete Verlauf der Luft-, Abdeckungs- und Absorbtemperatur und Luftfeuchte als Funktion des Kollektorradius am 7.6.1987

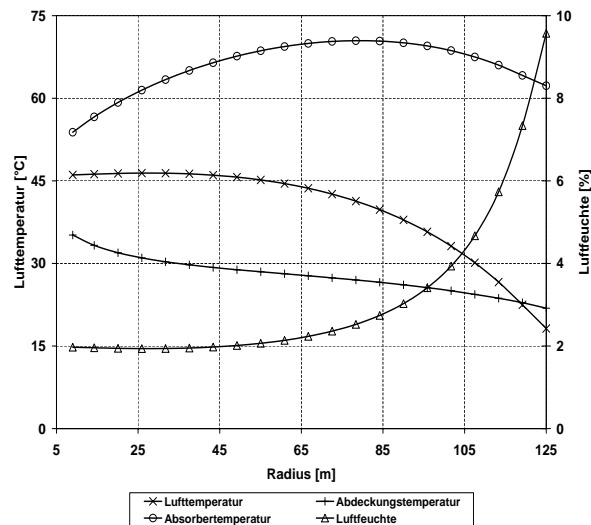


Abb. 5-31: Der berechnete Verlauf der Luft-, Abdeckungs- und Absorbtemperatur und Luftfeuchte als Funktion des Kollektorradius am 8.6.1987

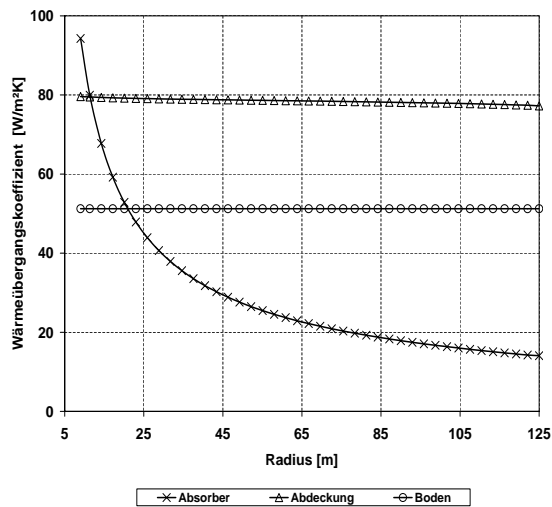


Abb. 5-32: Der berechnete Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten im Absorber, in der Abdeckung und im Boden als Funktion des Kollektorradius am 7.6.1987

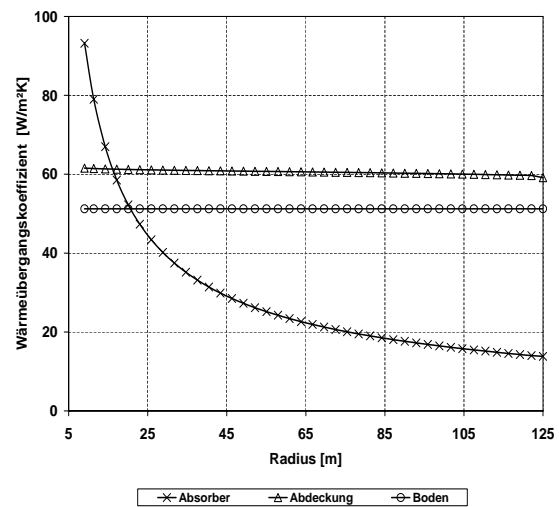


Abb. 5-33: Der berechnete Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten im Absorber, in der Abdeckung und im Boden als Funktion des Kollektorradius am 8.6.1987

Als wesentliche Größe werden nun die Aufwindgeschwindigkeit und die Leistung betrachtet. Aus Abb. 5-34 bis Abb. 5-37 geht sowohl der gemessene als auch der berechnete zeitliche Verlauf der Aufwindgeschwindigkeit und der Leistung hervor. Allgemein ist zwischen den gemessenen und den berechneten Werten eine gute Übereinstimmung festzustellen, wobei die Werte während der Nacht stärker differieren als am Tage. Dies liegt in den kaum exakt fassbaren Einflüssen des Windes und des Bodens begründet, deren relative Bedeutung bei fehlender kurzwelliger Einstrahlung sehr groß ist. Sonstige Abweichungen sind mit den vernachlässigten Wärmekapazitäten im System und der nicht erfassbaren Teilabschattung zu erklären (z.B.: ungleichmäßige Einstrahlung auf die Kollektoroberfläche).

Die berechnete und gemessene Energieproduktion des Prototyps in Manzanares am 7.6.1987 und 8.6.1987 sowie die Abweichung zwischen beiden Werten sind in Tabelle 5-4 dargestellt.

Tabelle 5-4: Vergleich der berechneten und gemessenen Energieproduktion [kWh].

	07.06.1987	08.06.1987
Messergebnisse von Manzanares (Quelle: /Büro Schlaich Bergermann und Partner 2002/)	268,0	366,8
Simulationsprogramm	274,5	360,9
Abweichung [%]	+2,4	-1,6

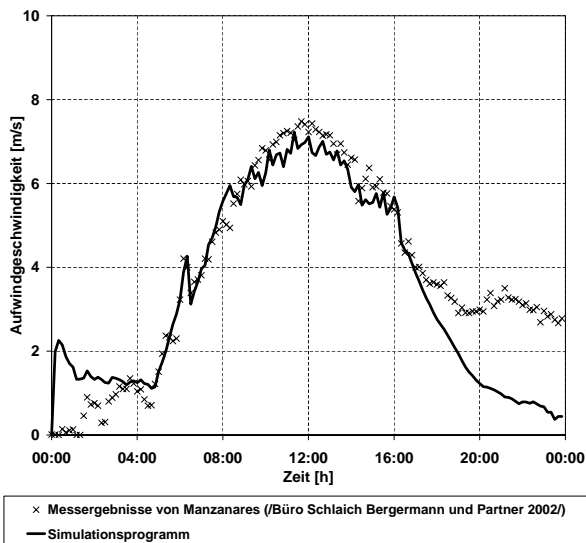


Abb. 5-34: Der berechnete und gemessene Verlauf der Aufwindgeschwindigkeit als Funktion der Zeit am 7.6.1987

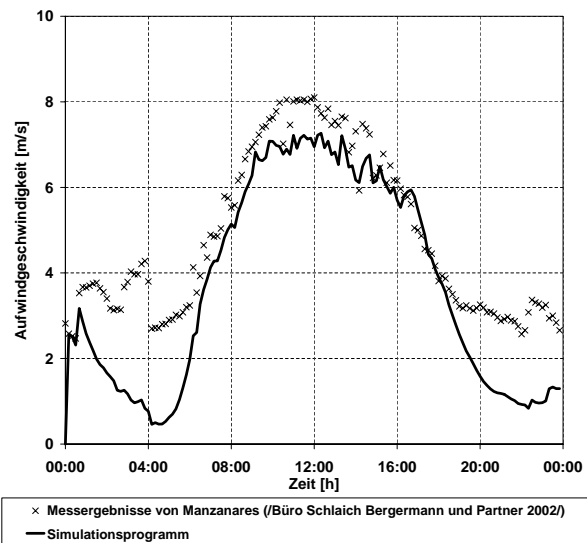


Abb. 5-35: Der berechnete und gemessene Verlauf der Aufwindgeschwindigkeit als Funktion der Zeit am 8.6.1987

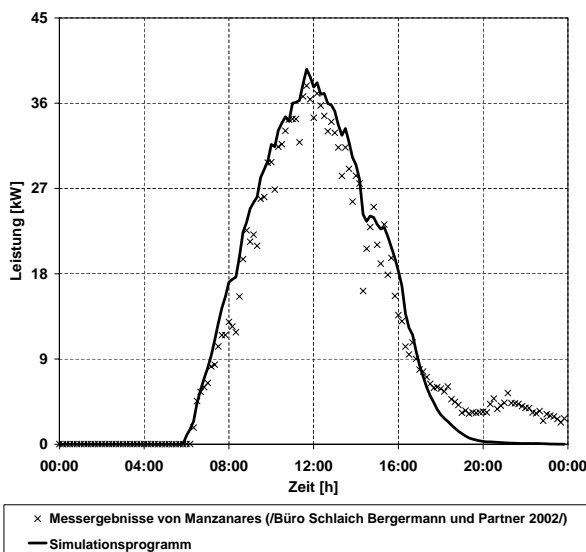


Abb. 5-36: Der berechnete und gemessene Verlauf der Leistung als Funktion der Zeit am 7.6.1987

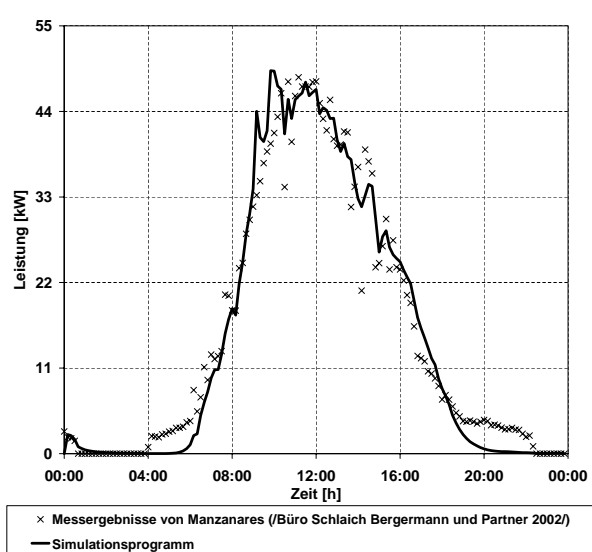


Abb. 5-37: Der berechnete und gemessene Verlauf der Leistung als Funktion der Zeit am 8.6.1987

Für die Beurteilung des solaren Aufwindkraftwerks bietet sich die Betrachtung der vom Kollektor aufgenommen und abgegebenen Wärmeströme bzw. Strahlungsleistung an. Das Programm ermöglicht die Berechnung der Leistungsbilanz zu jedem beliebigen Zeitpunkt und Längenschritt. Als Beispiel wird hier der Zeitpunkt 12 Uhr mittags als Funktion des Radius in Abb. 5-38 und Abb. 5-39 gezeichnet. Deutlich ist die zunehmende Steigung der Kurve der Wärmeströme in der Abdeckung in der Richtung des Kamins zu erkennen, dies ist auf den zunehmenden Temperaturgradient zwischen der Umgebung und der strömenden Luft zurückzu-

führen. Deswegen ist es aus thermodynamischer Sicht vorteilhaft, eine Doppelverglasung im turmnahe Bereich vorzusehen.

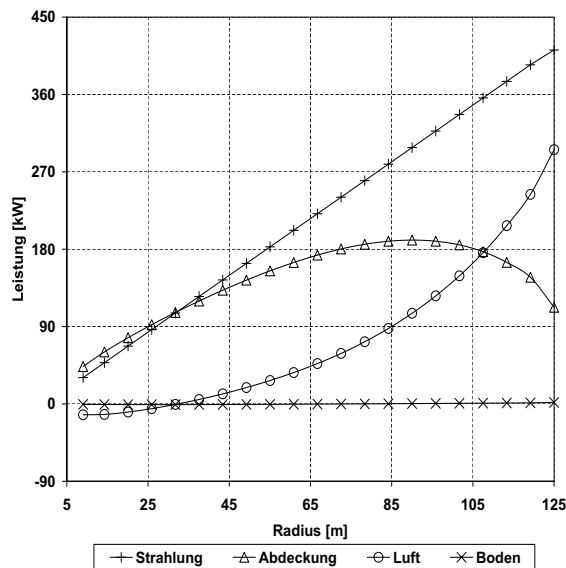


Abb. 5-38: Der berechnete Verlauf der Leistung als Funktion des Kollektorradius am 7.6.1987 (12 Uhr)

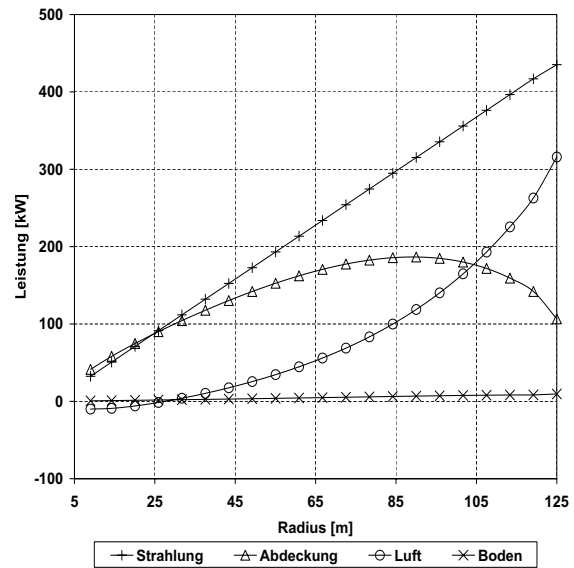


Abb. 5-39: Der berechnete Verlauf der Leistung als Funktion des Kollektorradius am 8.6.1987 (12 Uhr)

Für den Kollektor ergibt sich folgende Bilanz (Zeitpunkt 10:00 Uhr; 07.06.1987):

- 39,91 MW absorbierte Leistung durch kurzwellige, direkte und diffuse Strahlung: der Wert wird aus dem Produkt der Summe der Flussdichte der absorbierten, direkten Strahlung und der diffusen Himmelstrahlung und der diffusen Absorberstrahlung und der Fläche des Absorbers berechnet, d.h. $(S_2 + S_3)A_c$ (einfache Abdeckung).
- 25,19 MW emittierte Leistung: der Wert wird durch Summation der von einzelnen Flächenelementen der Abdeckfolie emittierten Strahlungswärmeströme und der an die äußere Luft abgegebenen konvektiven Wärmeströme ermittelt, d.h. $[h_w(T_2 - T_0) + h_{rs}(T_2 - T_s)]A_c$ (einfache Abdeckung).
- 11,53 MW konvektiv an die strömende Luft abgegebene Wärmeleistung: der Wert wird durch Summation der von den einzelnen Flächenelementen des Absorbers an die strömende Luft abgegebenen konvektiven Wärmeströme ermittelt, d.h. $\Gamma(T_{f2} - T_f)A_c$.
- 3,19 MW an das Erdreich abgegebene Wärmeleistung: der Wert wird durch Summation der von den einzelnen Flächenelementen des Absorbers an den Boden abgegebenen Wär-

mestrome ermittelt, d.h. $U_b(T_5 - T_{5,0})A_c$.

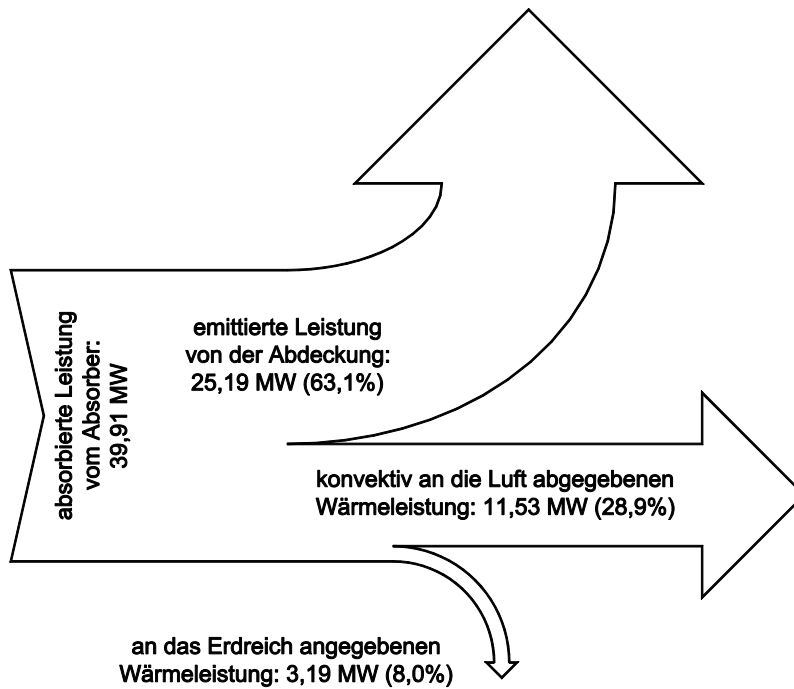


Abb. 5-40: Leistungsfluss im Kollektor.

Das Verhältnis der transportierten Wärmeleistung zur Summe der einfallenden Strahlungsleistung und der an die strömende Luft abgegebenen Wärmeleistung des Bodens wird als momentaner Wirkungsgrad des Kollektors bezeichnet. Für den Zeitpunkt 10:00 Uhr ergibt sich ein Wert von 28,9% (Abb. 5-40).

Abb. 5-41 und Abb. 5-42 zeigen den berechneten Verlauf der Leistung im Kollektor als Funktion der Zeit. Die Oszillationen innerhalb des Verlaufs der Kurve der absorbierten Leistung durch Strahlung beeinflusst schwach den Verlauf der Kurve der an die strömende Luft angegebene Wärmeleistung. Dieses Verhalten lässt sich durch den Speicherungseffekt im Boden erklären.

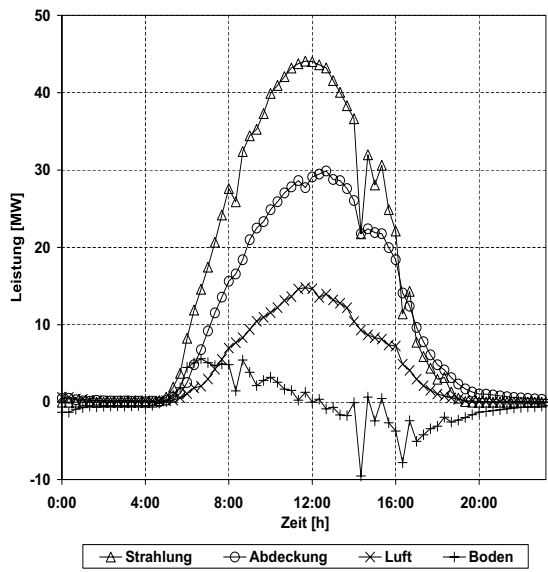


Abb. 5-41: Der berechnete Verlauf der Leistung am 7.6.1987

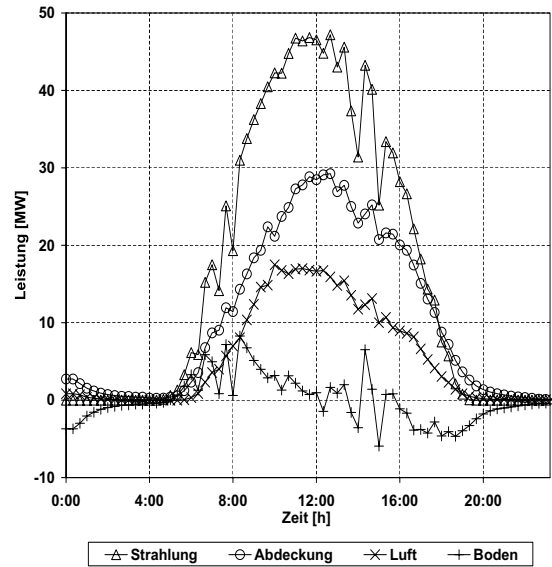


Abb. 5-42: Der berechnete Verlauf der Leistung am 8.6.1987

Der Wirkungsgrad des Kamins, Kollektors und Aufwindkraftwerks als Funktion der Zeit ist in Abb. 5-43 und Abb. 5-44 gezeigt. Obwohl der Wirkungsgrad des Kollektors etwas über 30% erreicht hat, beträgt der Wirkungsgrad des gesamten Systems etwas weniger als 0,10% wegen des geringen Wirkungsgrads des Kamins ($< 0,02\%$).

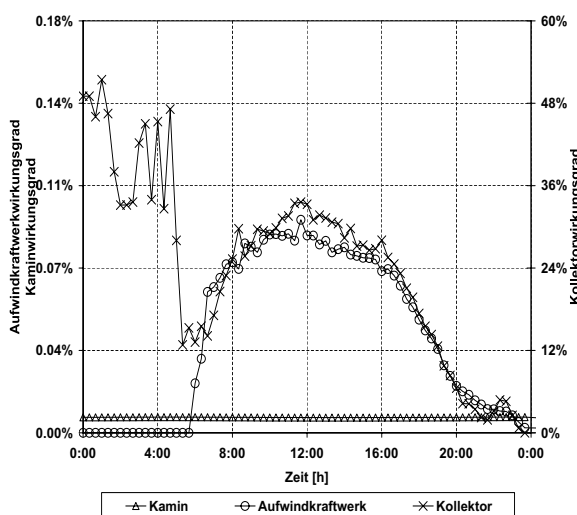


Abb. 5-43: Der berechnete Verlauf der Wirkungsgrade am 7.6.1987

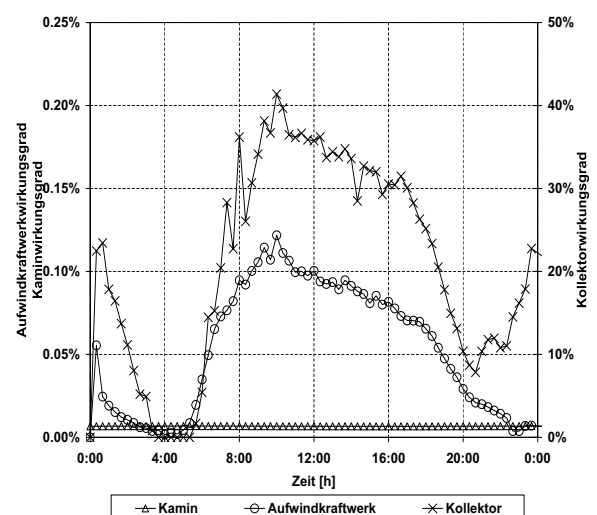


Abb. 5-44: Der berechnete Verlauf der Wirkungsgrade am 8.6.1987

5.8 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse kann Aufschluss über die Bedeutung relevanter Parameter bezüglich des energetischen Verhaltens eines solaren Aufwindkraftwerks sowie der Tauglichkeit des angewendeten Modells geben. Ausgehend von den Kenngrößen einer kommerziellen Anlage an einem fiktiven Ort soll zunächst die Leistung des Rechenprogramms bei der Variation der Zeitschrittweite überprüft werden. Im Anschluss daran wird das thermodynamische Verhalten des Aufwindkraftwerkes bei Variation jeweils eines Parameters untersucht. Die folgenden Parameter wurden ausgewählt:

- Zeitschrittweite
- Längenschrittzahl
- Kaminhöhe
- Kollektorfläche
- Oberfläche der Doppelabdeckungen
- Eigenschaften des Bodens
- Kontaktwiderstand zwischen Absorber und Boden
- Oberfläche und Höhe des Wasserspeichers
- Optische Eigenschaften der Abdeckung
- Luftfeuchte
- Druckentnahmefaktor

Die teilweise sehr komplexen von der Geometrie des Kollektors und des Kamins abhängigen physikalischen Vorgänge in einem Aufwindkraftwerk lassen sich nur mit Hilfe eines numerischen Strömungssimulationsprogramm (z.B. Finite-Volumen Methode) erfassen. Deswegen wird hier die Geometrie des Kollektors (Kollektorhöhe und Kollektorneigung) und des Kamins (Kamindurchmesser) in der Sensitivitätsanalyse nicht betrachtet.

Außer den Parametern, die variiert wurden, wurden die Werte der konstanten Parameter vor Beginn der Simulationsrechnung festgelegt (siehe Tabelle 5-5). Der Einfluss der Variation jedes Parameters auf den Massenstrom, die Lufttemperatur sowie die Leistung in Abhängigkeit von der Zeit soll graphisch dargestellt werden.

Um einen ganzen Tag (d.h. einen Tag mit dem Speichereffekt im Boden in dem Zeitraum von 0:00 Uhr bis zur Erwärmung des Absorber durch die Solarstrahlung) zu untersuchen, wurde der gleiche Tag mehrere Male simuliert. Alle Ausgaben (Ergebnisse) von 24:00 Uhr des letzten Tages wurden als Startwert für den Zeitpunkt 0:00 Uhr des neuen gleichen Tages verwendet. Dennoch werden die Simulationen drei mal nacheinander durchgeführt, da erst dann eine Abweichung zwischen den Tagen niedriger als 1,0% gefunden wurde.

Tabelle 5-5: Eingabewerte für die Sensitivitätsanalyse

Parameter	Werte	Einheit
Vordachhöhe am Eintritt des Kollektors	3,5	m
Vordachhöhe am Austritt des Kollektors	35	m
Kollektordurchmesser	4100	m
Einfache Abdeckung	Ja	-
Material	Glas	-
Brechungszahl	1,526	-
Emissionsgrad	0,90	-
Extinktionskoeffizient	23,6	1/m
Dicke	0,004	m
Kamindurchmesser am Eintritt	120	m
Kamindurchmesser am Austritt	120	m
Kaminhöhe	1000	m
Thermischer Verlust des Kamins	nicht berechnet	-
Absorptionsgrade des Absorbers	0,93	-
Emissionsgrad des Absorbers	0,90	-
Höhe des Wasserspeichers	0,10	m
Absorptionsgrad des Wasserspeichers	0,90	[-]
Emissionsgrad des Wasserspeichers	0,90	[-]
Transmissionsgrad des Wasserspeichers	0,10	[-]
Abstand zwischen dem Absorber und dem Boden	$1,0 \times 10^{-6}$	m
Rauheitshöhe des Bodens	0,05	m
Wärmeleitfähigkeit des Bodens	0,6	W/m·K
Temperaturleitfähigkeit des Bodens	$2,91 \times 10^{-7}$	m ² /s
Umgebungsdruck	1.01325×10^5	Pa
Horizontalsicht	100000	m
Optische Dicke der Auslöschung durch Zirruswolken	0,1	m
Breitengrad	0	°
Längengrad	-20 (Ost)	°
Datum	01.06.2001	-
Tageszahl des ersten zu simulierenden Tages	518	Tage
Längengrad der Zeitzone	-15	°
Oberflächealbedo	0,35	-
Maximaler Fehler bei jeder Zeitschritte	0,1	%
Anzahl von Längenschritt	300	-
Zeitschritte	1800	s
Druckentnahmefaktor	0,90	-
Wirkungsgrad des Turbogeneratorsatzes	0,75	-

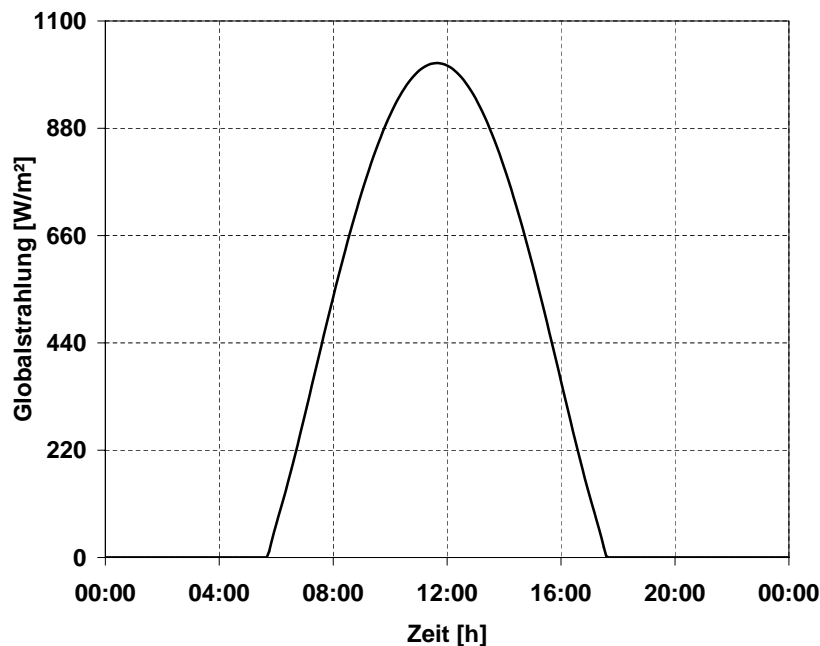


Abb. 5-45: Der zeitliche Verlauf der Globalstrahlung.

Abb. 5-45 zeigt den Verlauf der Globalstrahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Tageszeit für den ausgewählten Tag.

5.8.1 Variation der Zeitschrittweite

Die quasistationäre Modellierung der freien Konvektionsströmung in einen Aufwindkraftwerk wurde unter der Voraussetzung genügend kleiner Zeitschritte vorgenommen (s. Abschnitt 5.1.2), in Abschnitt 5.6 wurde die Wahl der Zeitschrittweite von 600 Sekunden begründet. An dieser Stelle ist nun durch den Vergleich mit den Ergebnissen bei der Verwendung anderer Zeitschrittweiten die Gültigkeit der getroffenen Annahmen zu beweisen. Zu diesem Zweck werden die Rechenergebnisse des Massenstroms und der Lufttemperatur bei der Berechnung mit den Zeitschrittweiten 300, 600, 1200, 1800 und 3600 Sekunden dargestellt. Wie die Abb. 5-46 und Abb. 5-47 zeigen, ist zwischen den verschiedenen Kurven kaum eine Differenz erkennbar, außer bei größeren Zeitschritten (3600 Sekunden). Damit weisen die Darstellungen die gewünschte Unabhängigkeit der Ergebnisse von der gewählten Zeitschrittweite und die Gültigkeit der Annahmen nach. Dies führt zur Wahl einer Zeitschrittweite von 1800 Sekunden. In Tabelle 5-6 ist ein Vergleich zwischen den Zeitschrittweiten bezogen auf 300 s dargestellt, die Abweichungen zwischen den simulierten Zeitschrittweiten sind niedriger als 0,10%.

Tabelle 5-6: Vergleich der berechneten erzeugten Energie eines Aufwindkraftwerks bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten.

Zeitschrittweite [s]	Erzeugte Energie [MWh]	Abweichung [%] (Bezugszeitschrittweite: 300 s)
300	2014,2	-
600	2013,9	0,01
1200	2013,6	0,03
1800	2013,3	0,05
3600	2013,4	0,04

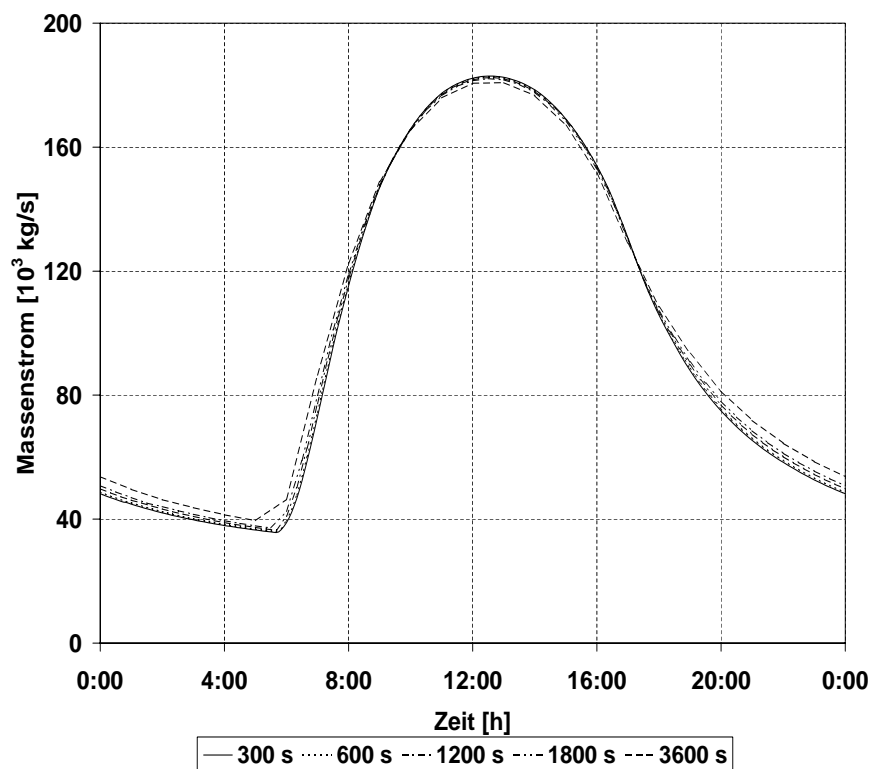


Abb. 5-46: Berechneter Massenstrom eines Aufwindkraftwerks bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten.

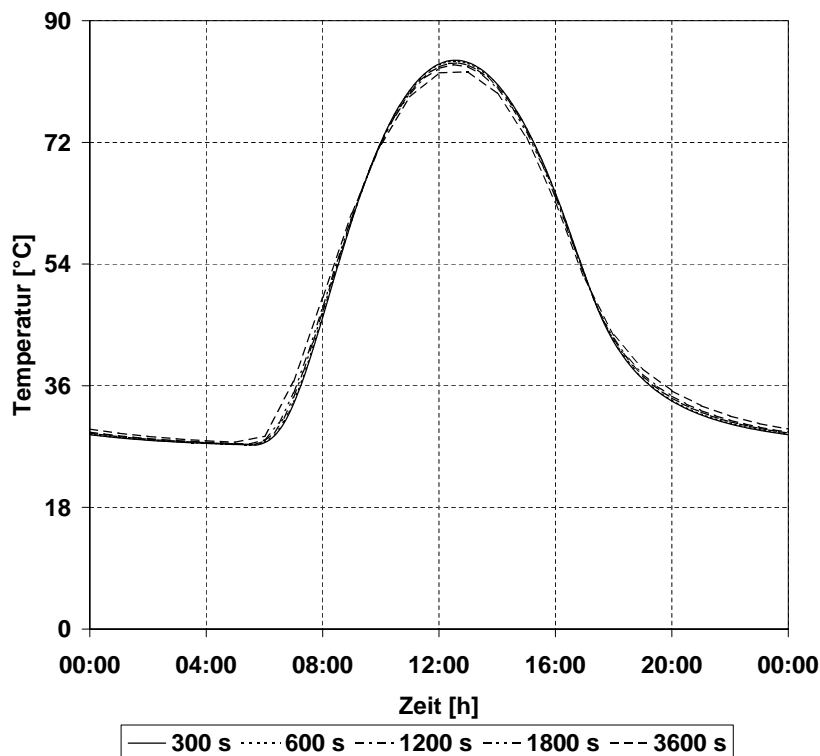


Abb. 5-47: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten.

5.8.2 Variation der Anzahl von Längenschritte

Die Annahmen, dass die Nutzwärme, die an die Luft übertragen wird, entlang einem Längenelement konstant ist und die Mitteltemperatur als arithmetischer Mittelwert von Eintritt- und Austrittstemperatur des Längenelements errechnet werden kann, wurde unter der Voraussetzung genügend kleiner Längenelemente vorgenommen (s. Abschnitt 5.1.3). Um die Gültigkeit der getroffenen Annahme zu beweisen, werden die Rechenergebnisse für den Massenstrom, die Lufttemperatur und die erzeugte Energie bei der Verwendung von Anzahl von Längenschritte von 100, 200, 300, 400 und 500 dargestellt (s. Abb. 5-48 bis Abb. 5-51). Damit weisen die Darstellung der kleinen Abweichungen des Massenstroms, der Lufttemperatur und der erzeugten Energie im Laufe des Tages von den gewählten Anzahl von Längenschritte und die Gültigkeit der Annahmen nach. Da die Anzahl von Längenschritte von 300 eine Abweichung der erzeugten Energie und der Austrittstemperatur des Kollektors von den Werten bei Verwendung der Anzahl von Längenschritte von 550 unter 2% dargestellt hat, wurde sie gewählt. Es ist empfehlenswert, keine Anzahl von Längenschritte unter 200 zu wählen.

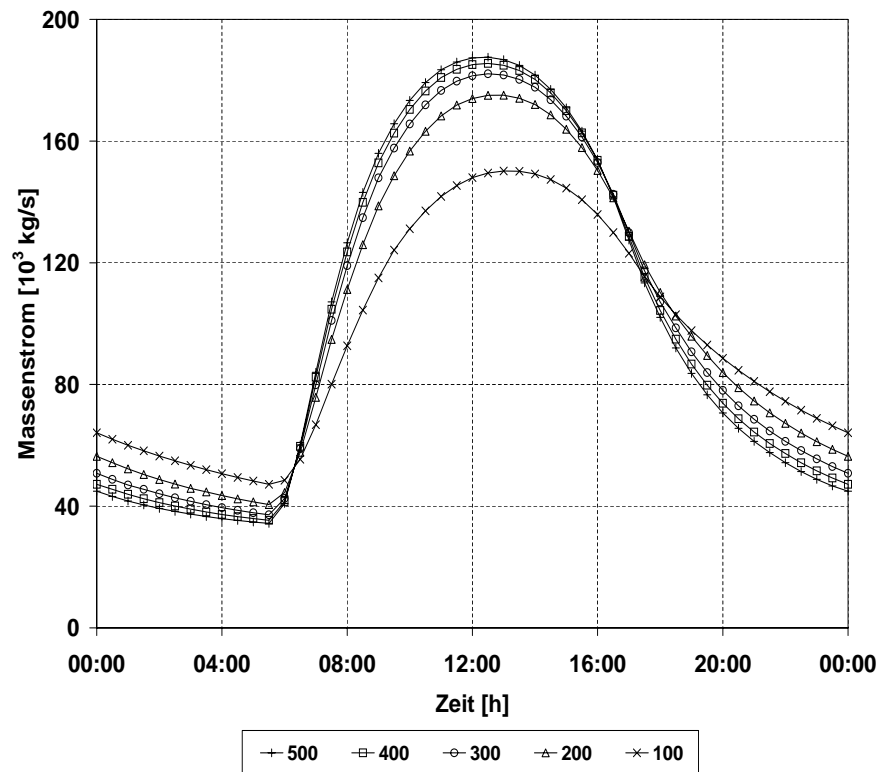


Abb. 5-48: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritten.

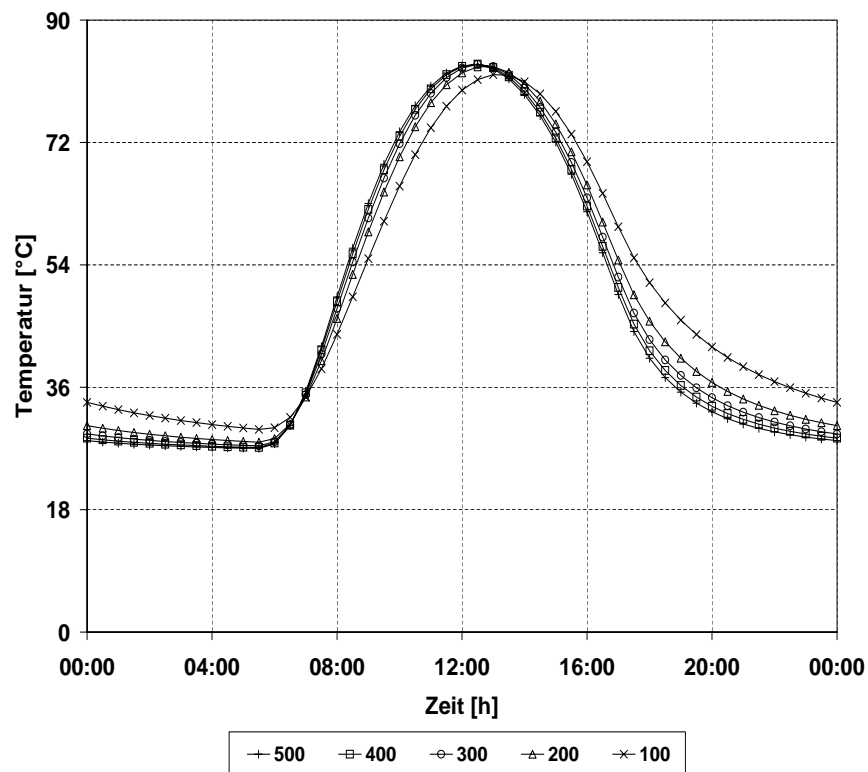


Abb. 5-49: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritten.

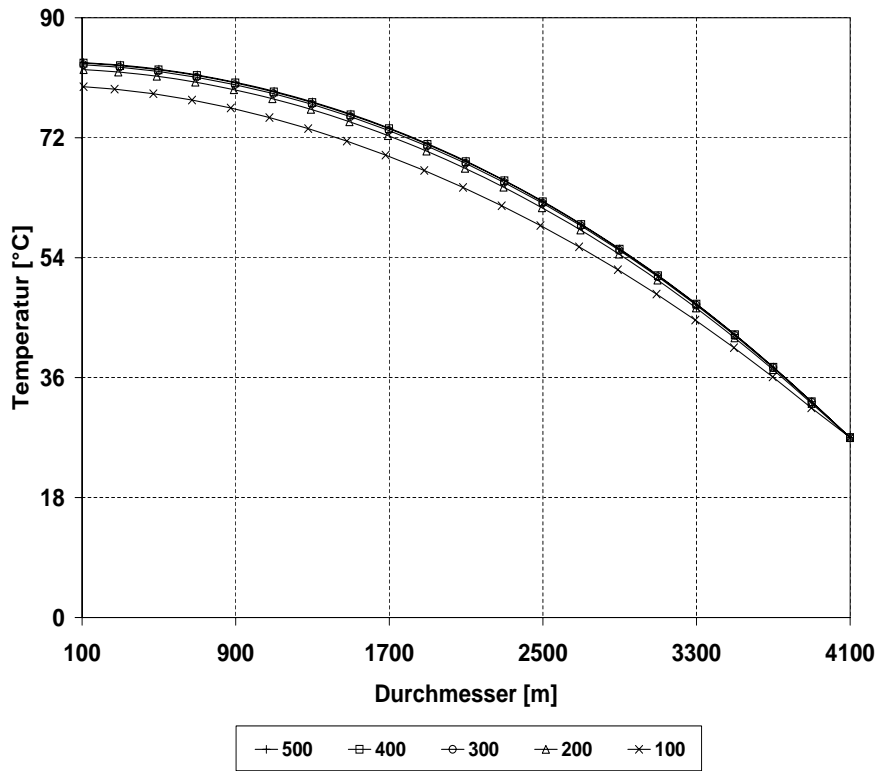


Abb. 5-50: Berechnete Lufttemperatur im Kollektor bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritte (12:00 Uhr).

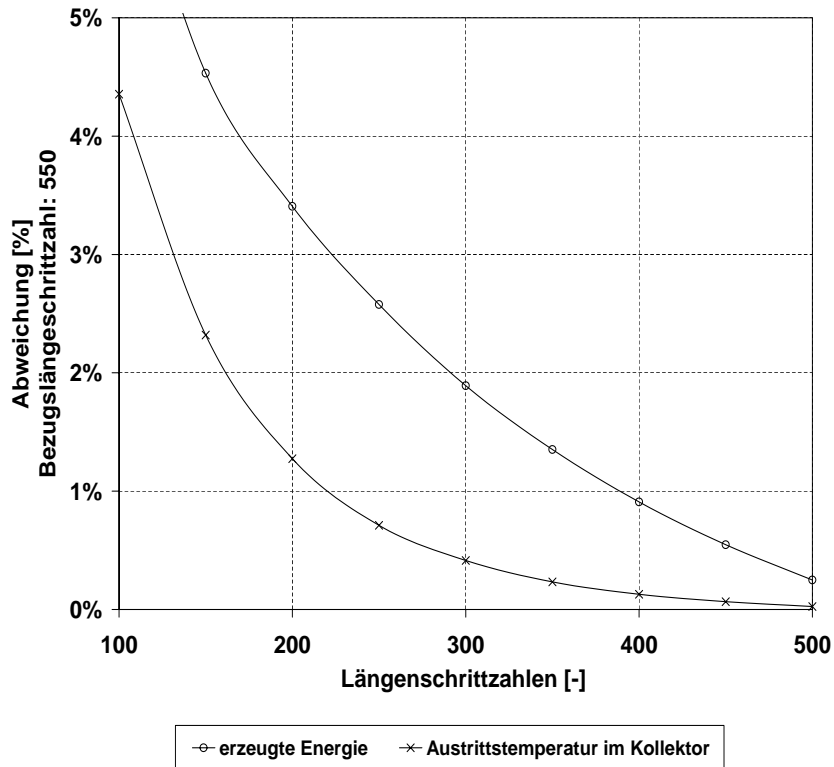


Abb. 5-51: Abweichungen der erzeugten Energie und der Austrittstemperatur des Kollektors bei unterschiedlicher Anzahl von Längenschritte (Bezugsanzahl: 550).

5.8.3 Variation der Kaminhöhe

Grundsätzlich nimmt mit höherem Kamin der Luftmassenstrom und die Leistung zu und die Austrittstemperatur der Luft im Kollektor ab (Abb. 5-52 bis Abb. 5-53). Aus den Abb. 5-54 und Abb. 5-55 kann man erkennen, dass der Massenstrom, die erzeugte Energie und der Wirkungsgrad des Kamins bei gegebener äußerer Temperaturschichtung fast linear von der Kaminhöhe abhängen. Höhere Kamine führen zur Erhöhung des Wirkungsgrads des Kamins und des gesamten Systems. Der Einfluss der Kaminhöheänderung auf den Wirkungsgrad des Kollektors ist relativ groß, da der Temperaturanstieg pro Längenelement bei erhöhtem Volumenstrom abnimmt.

Beim Projekt eines Aufwindkraftwerks kann der Parameter „Höhe des Kamins“ dazu dienen, den Auftriebseffekt des Systems einzustellen. Aus rein thermischer und hydrodynamischer Sicht (höherer Massenstrom und Wirkungsgrad) scheint ein höherer Kamin sehr vorteilhaft zu sein. Die technische Realisierbarkeit von höheren Kaminen und deren Kosten können aber diesen Vorteil einschränken.

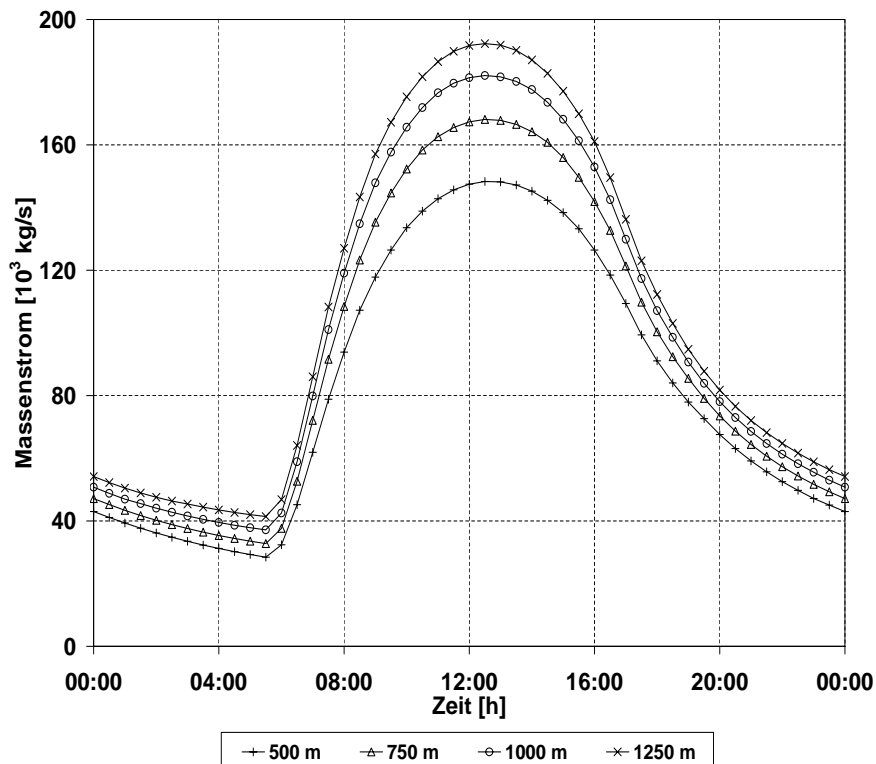


Abb. 5-52: Der Massenstrom bei unterschiedlichen Kaminhöhen.

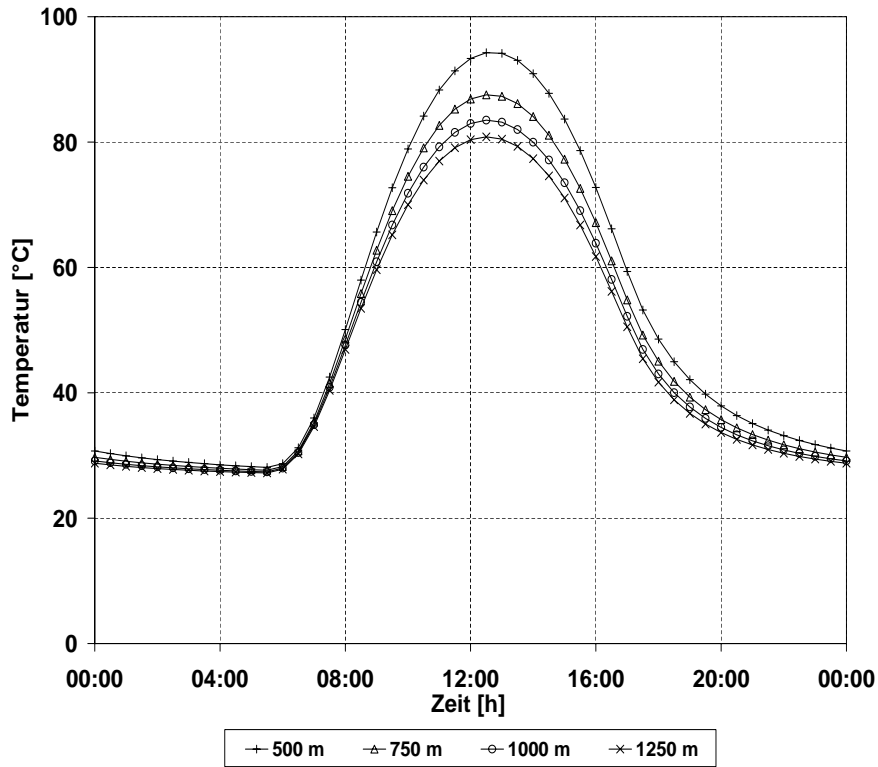


Abb. 5-53: Die Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Kaminhöhen.

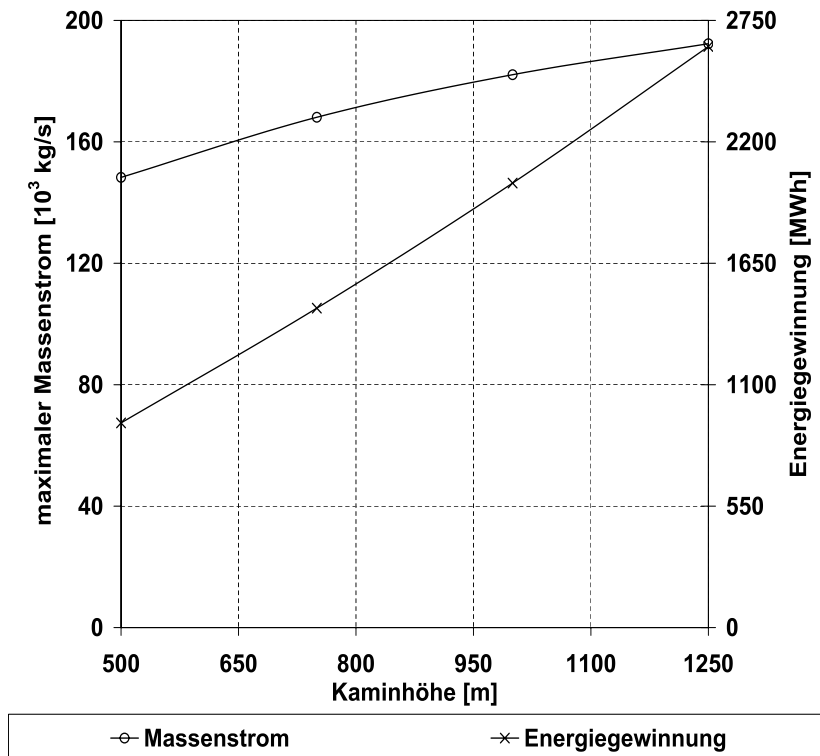


Abb. 5-54: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms von Kaminhöhe.

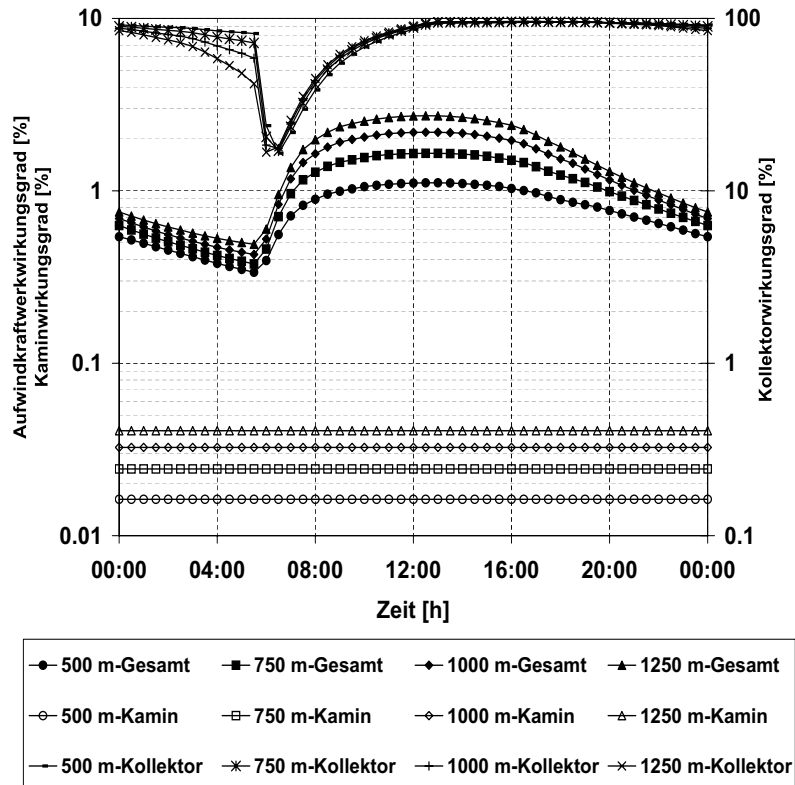


Abb. 5-55: Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichen Kaminhöhen.

5.8.4 Variation der Kollektorflächen

Die Vergrößerung des Kollektordurchmessers eines Aufwindkraftwerks bewirkt eine Erhöhung des Luftmassenstroms bzw. der Lufttemperatur im System (Abb. 5-56 und Abb. 5-57). Dies führt zu einer Erhöhung des Speichereffekts und des Wirkungsgrads des gesamten Systems bei Nacht (s. Abb. 5-59). In der Abb. 5-58 sieht man, dass der Einfluss der Größenänderung auf die Erhöhung der erzeugten Energie fast linear ist.

Der Parameter „Kollektordurchmesser“ kann benutzt werden, die Absorptionsfläche von Strahlungsenergie einzustellen. Daher wird die Lufttemperatur im Kollektor und folglich der Speichereffekt beeinflusst. Außer der Beschränkung der Gelände- bzw. Baukosten ist die Prolongation des Kollektors günstig für eine höhere Energieerzeugung.

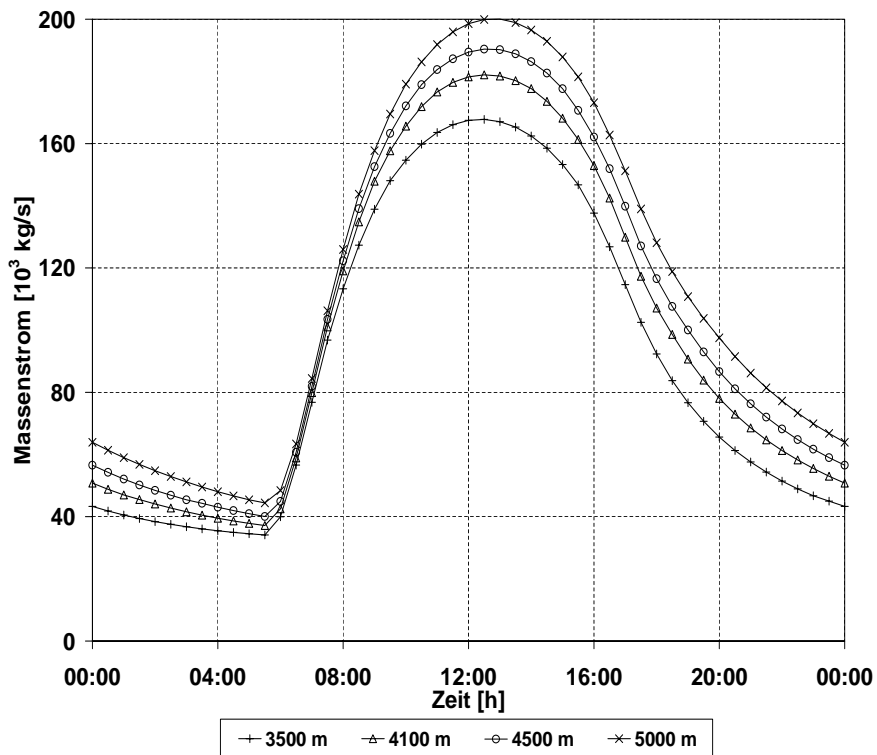


Abb. 5-56: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Kollektordurchmessern.

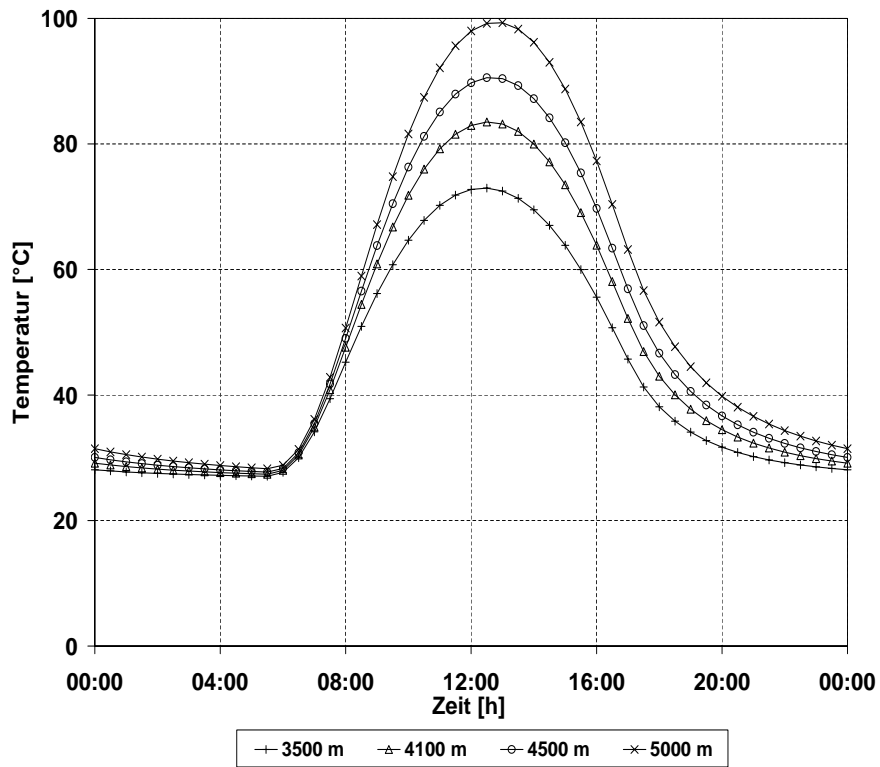


Abb. 5-57: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Kollektordurchmessern.

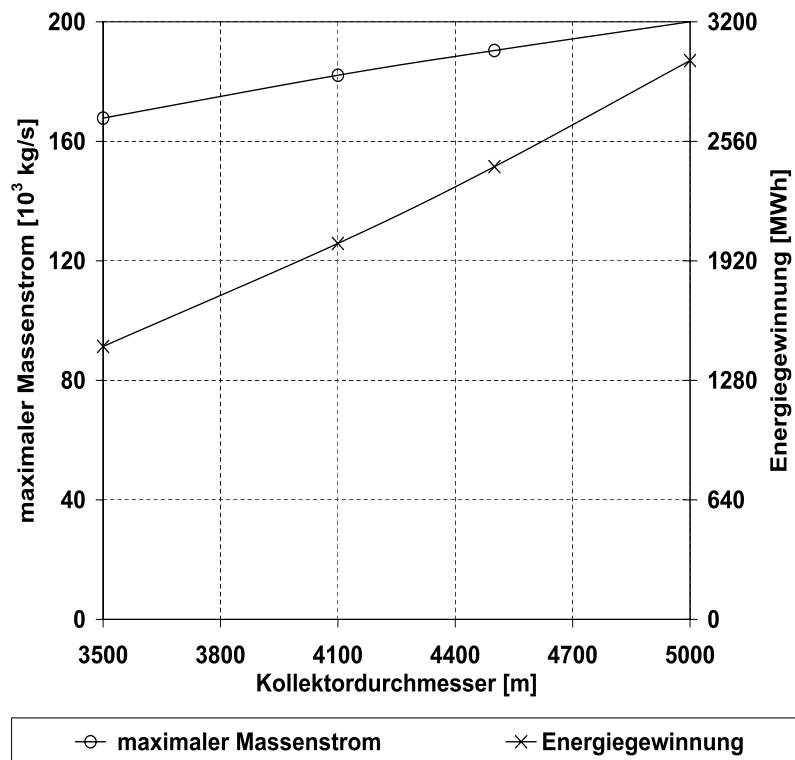


Abb. 5-58: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms vom Kollektordurchmesser.

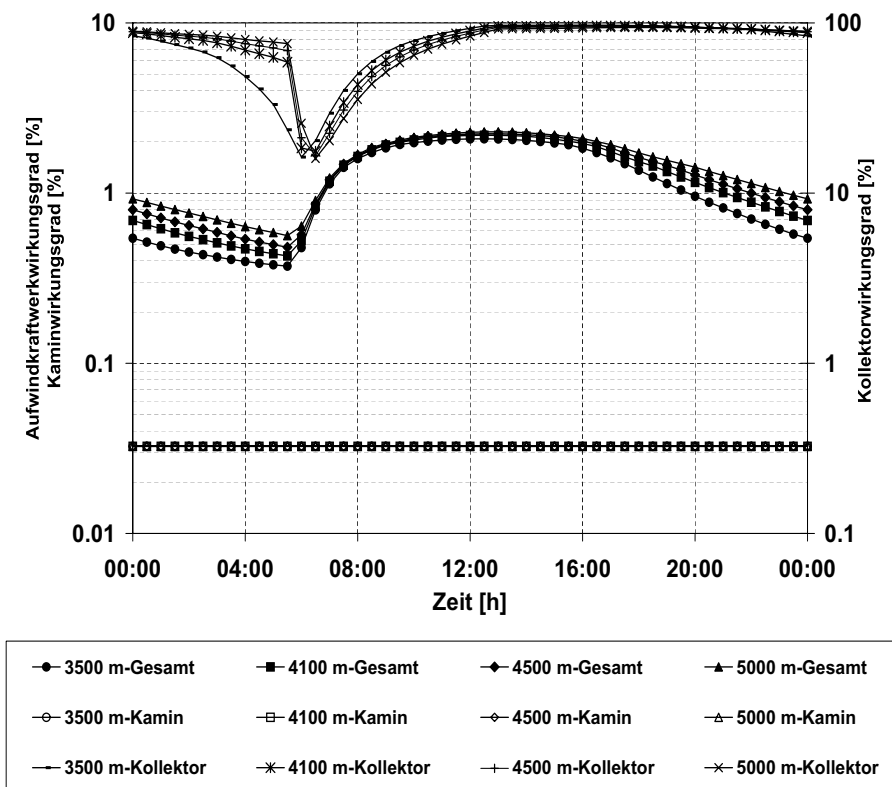


Abb. 5-59: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichen Kollektordurchmessern.

5.8.5 Variation der Oberfläche der Doppeltabdeckungen

Mit Hilfe des Parameters „Oberfläche der Doppeltabdeckungen“ kann festgelegt werden, welcher Anteil der Kollektorabdeckung doppelt abgedeckt ist (0% bis 100%). Beim Vergleich dieser Fälle wird deutlich, dass die doppelte Abdeckung den Wärmeverlust des Kollektors vermindert. Abb. 5-61 und Abb. 5-63 zeigen, dass im Falle einer komplett doppelten Abdeckung die Austrittstemperatur um 12:00 Uhr mittags der Luft ca. 2,1 K über der im Falle einer einfachen Abdeckung erreichten Temperatur liegt. Diese Erhöhung der Temperatur im Kollektor bewirkt eine Steigung des Massenstroms von 1,4% (s. Abb. 5-60 und Abb. 5-62), der erzeugten Energie von 5,6% (Abb. 5-62). Eine Differenz zwischen den verschiedenen Kurven des Wirkungsgrads des Kollektors, Kamins und des Aufwindkraftwerks ist kaum erkennbar.

Wegen des kleinen Einflusses von Doppeltabdeckungen auf die Energieerzeugung des Systems scheint ihre Anwendung nicht zweckmäßig.

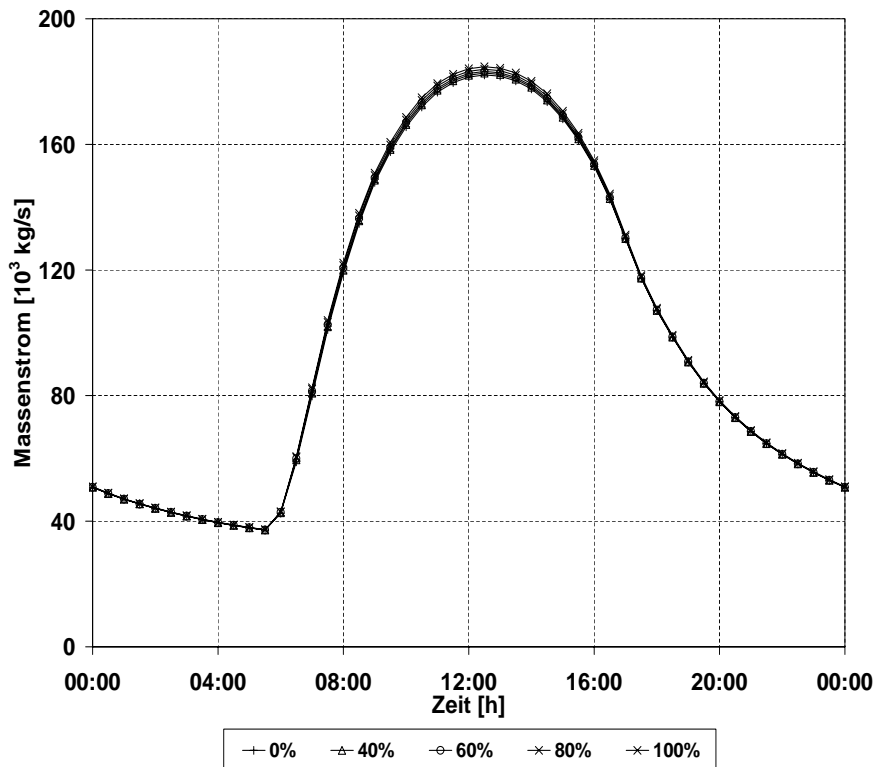


Abb. 5-60: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckungen (bei Werten kleiner als 100% wird die Doppeltabdeckung vom Kaminbereich begonnen).

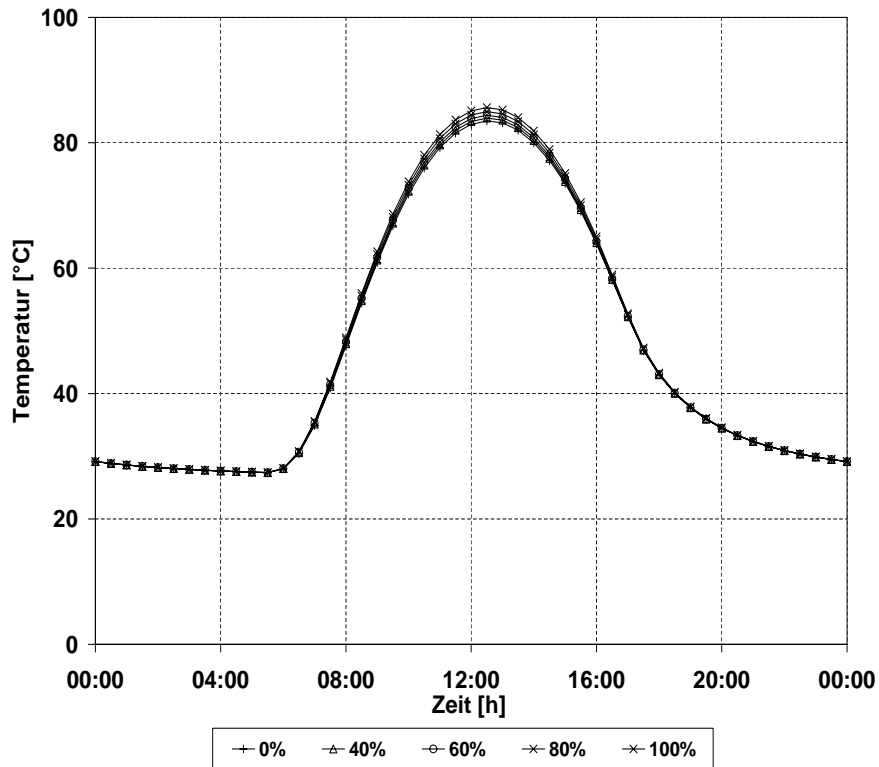


Abb. 5-61: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppelabdeckungen (bei Werten kleiner als 100% wird die Doppelabdeckung vom Kaminbereich begonnen).

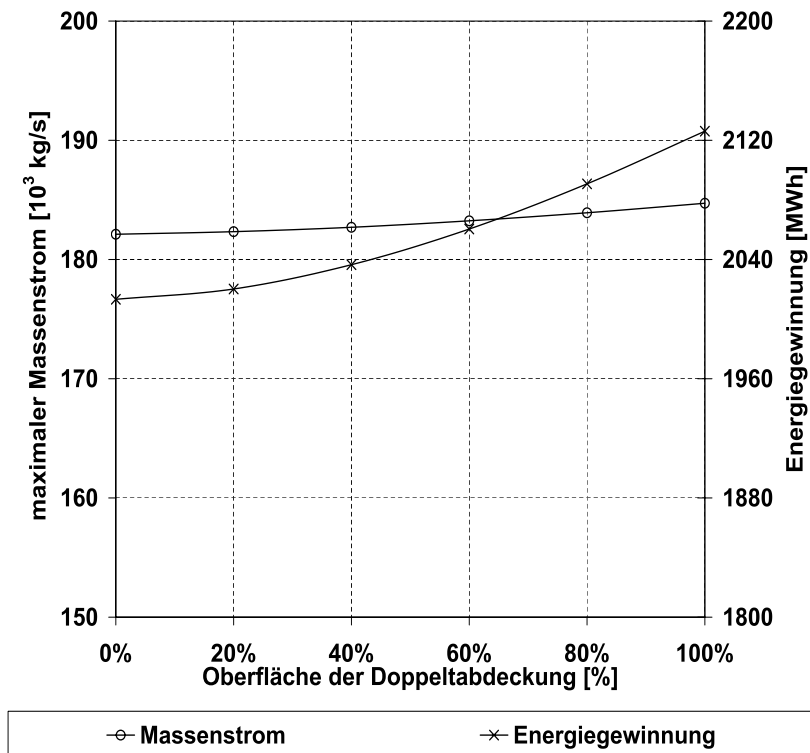


Abb. 5-62: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms vom Flächenanteil (%) der Doppelabdeckung.

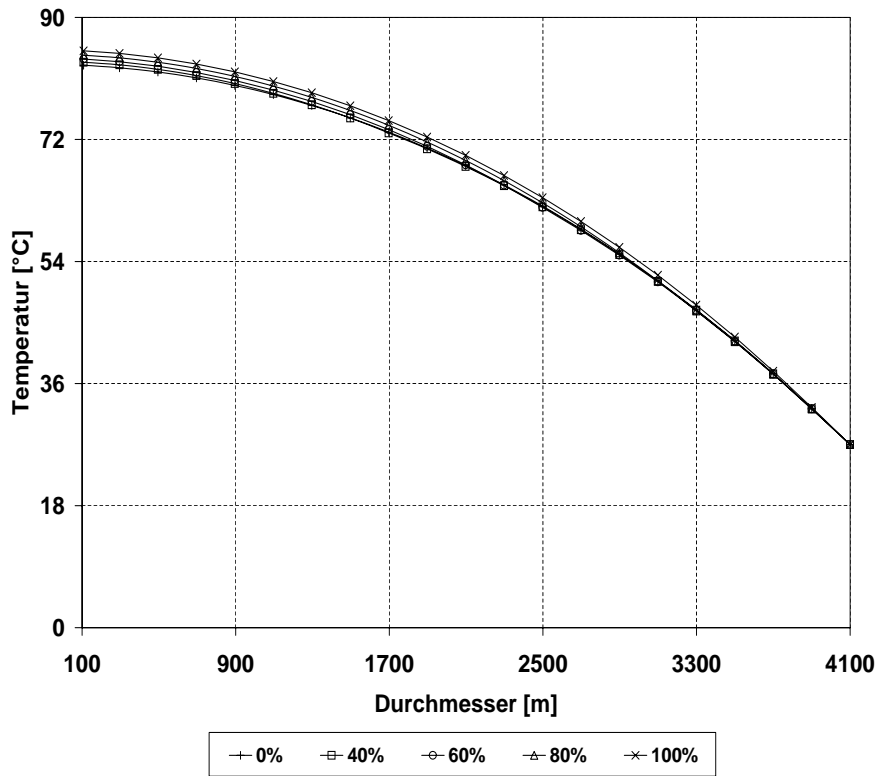


Abb. 5-63: Berechnete Lufttemperatur im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckungen (12:00 Uhr).

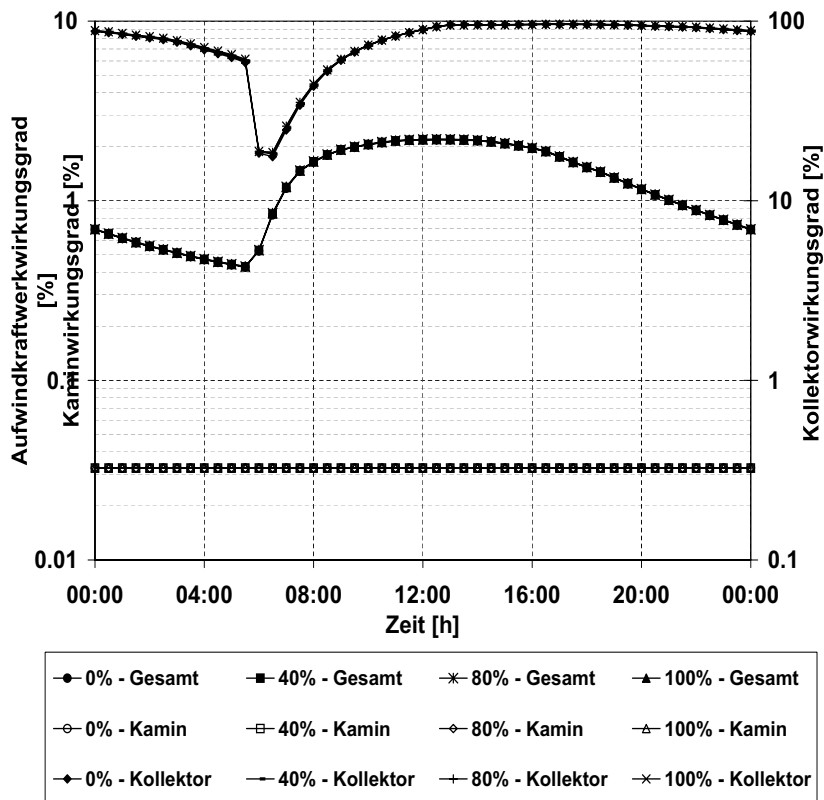


Abb. 5-64: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) der Doppeltabdeckungen.

5.8.6 Variation der Oberfläche und der Höhe des Wasserspeichers

Wie bei der „Oberfläche der Doppeltabdeckungen“ bedeutet „Oberfläche des Wasserspeichers“ welcher Anteil des Kollektors mit Wasserspeicher bedeckt ist (0% bis 100%). Der Einsatz des Wasserspeichers bewirkt eine Abnahme der Lufttemperatur am Tag im Kollektor. Beim Vergleich den Fall von 0% und 100% wurde eine Temperaturabnahme von 10,2 K erreicht (s. Abb. 5-66 und Abb. 5-68). Dieser Abnahme der Temperatur im Kollektor bewirkt eine Abnahme des Massenstroms von 7,8% (s. Abb. 5-65 und Abb. 5-67). Dank der Erhöhung des Speichereffektes wurde eine Steigerung der potenzielle Energiegewinnung (3,1%) und des Wirkungsgrads des Aufwindkraftwerks bei Nacht festgestellt (Abb. 5-69).

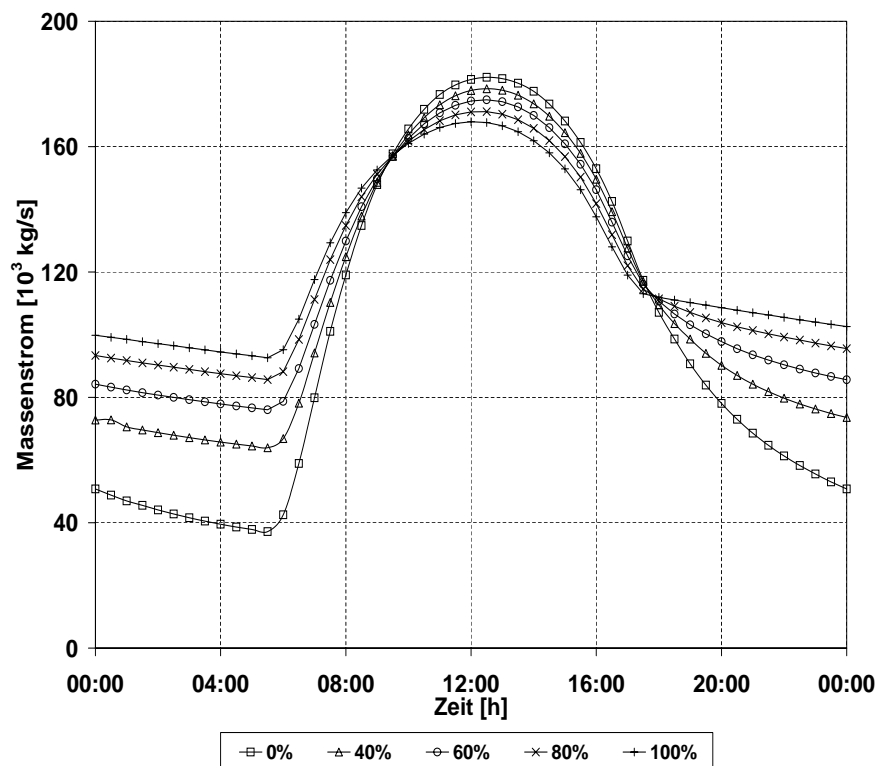


Abb. 5-65: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers.

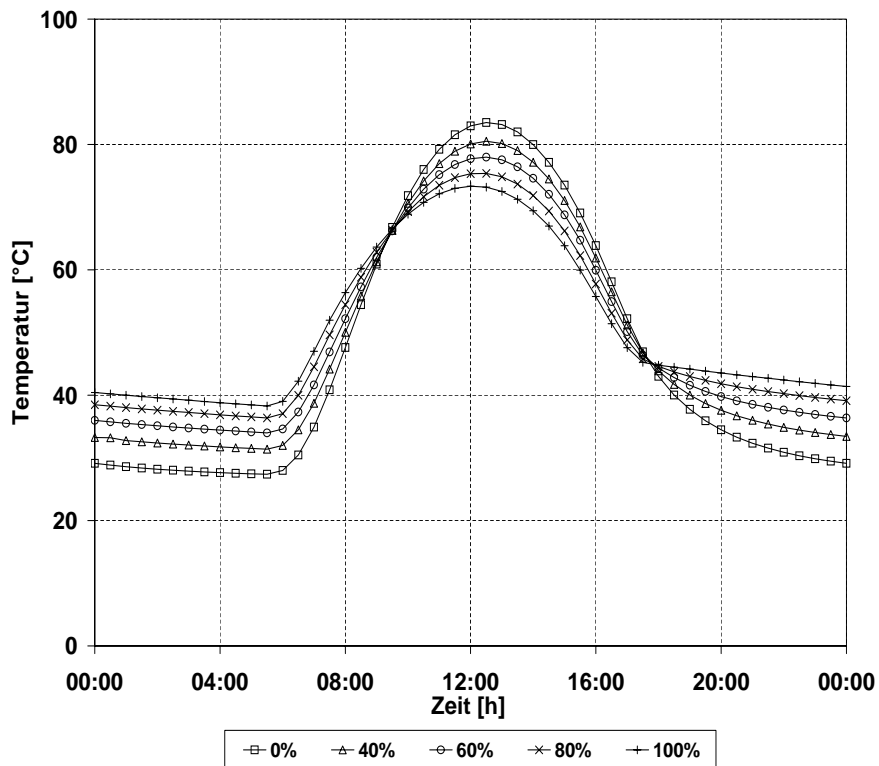


Abb. 5-66: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers (von Zentrum zum äußerstem Ende).

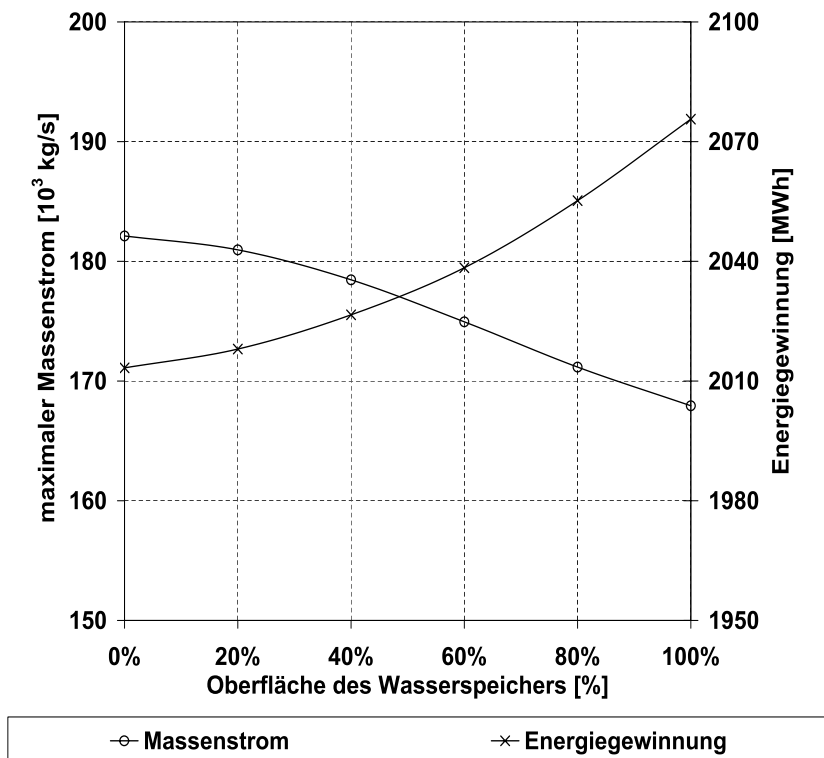


Abb. 5-67: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms vom Flächenanteil (%) des Wasserspeichers.

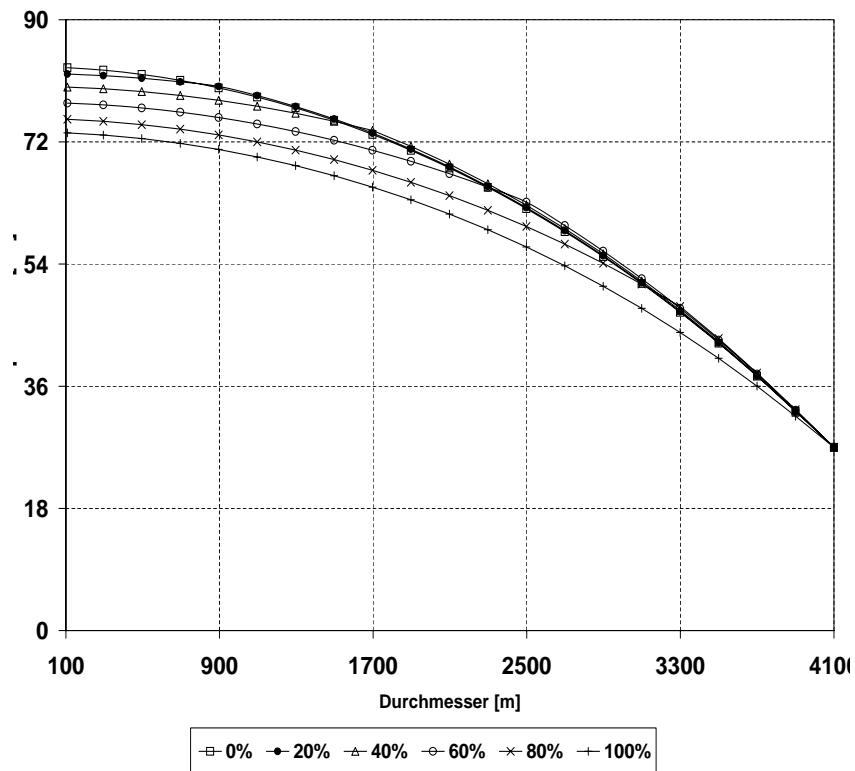


Abb. 5-68: Berechnete Lufttemperatur im Kollektor bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers (12:00 Uhr).

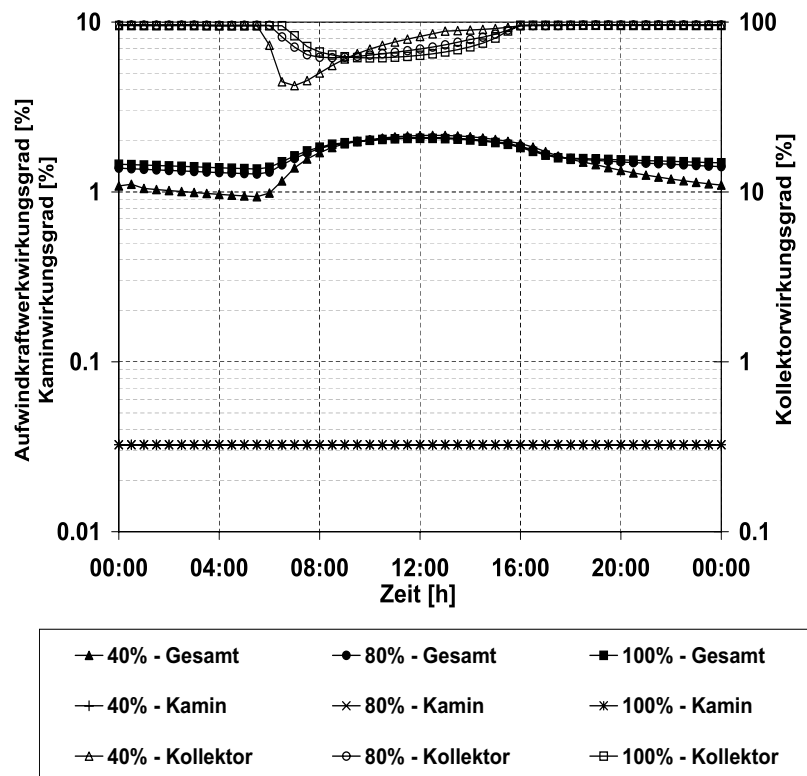


Abb. 5-69: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichem Flächenanteil (%) des Wasserspeichers

Abb. 5-70 bis Abb. 5-73 stellen das Verhalten des Aufwindkraftwerks bei unterschiedlicher Wasserspeicherröhe dar. Die Erhöhung der Höhe des Wasserspeichers führt zu einer Erhöhung des Massenstroms und der Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei Nacht. Durch den Speichereffekt wurde maximal 23% der gesamten Energie nachts erzeugt (s. Abb. 5-72). Bei einer Wasserspeicherröhe von 0,005 bis 0,0175 m wirkt ein Widerstandseffekt auf den Speichereffekt aus. Die Bilanz der Leistung im Kollektor in Abb. 5-73 zeigt, dass eine große Menge der absorbierten Leistung an die Luft abgegeben wurde. Aus diesem Grund konnte keine Vergleichmäßigung der Kollektorleistung im tageszeitlichen Verlauf erreicht werden.

Ein wesentlicher Vorteil der Anwendung von Wasserspeicher ist die Vergleichmäßigung des tageszeitlichen Verlaufes der Energieerzeugung. So kann sich der Strombedarf in den Morgenstunden und am Abend mit der tagsüber anfallende Solarstrahlung decken. Somit wird auch der tägliche Kapazitätsfaktor des Kraftwerkes verbessert. Als weiterer Vorteil wirkt sich finanziell die Dimensionierung von Turbine und Generatoren für eine niedrigere Spitzenlast aus.

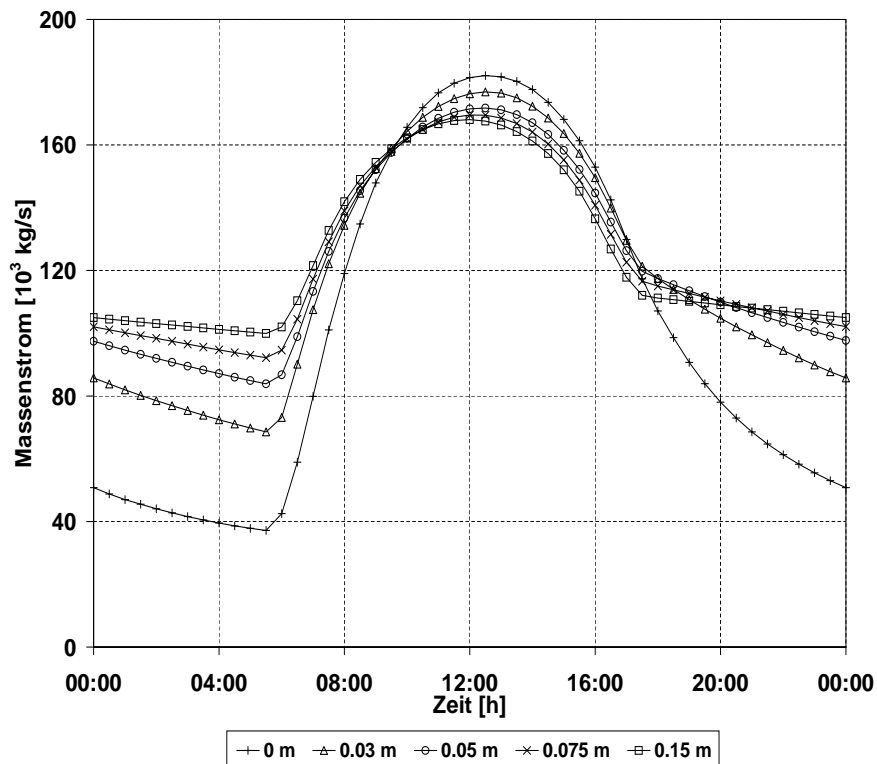


Abb. 5-70: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlicher Höhe des Wasserspeichers.

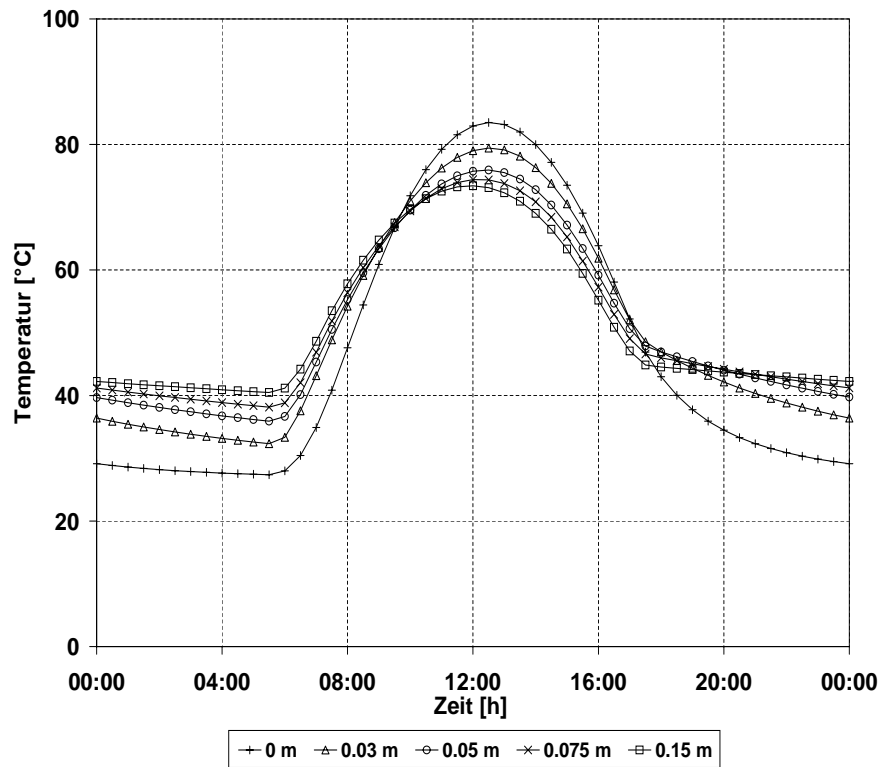


Abb. 5-71: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlicher Höhe des Wasserspeichers.

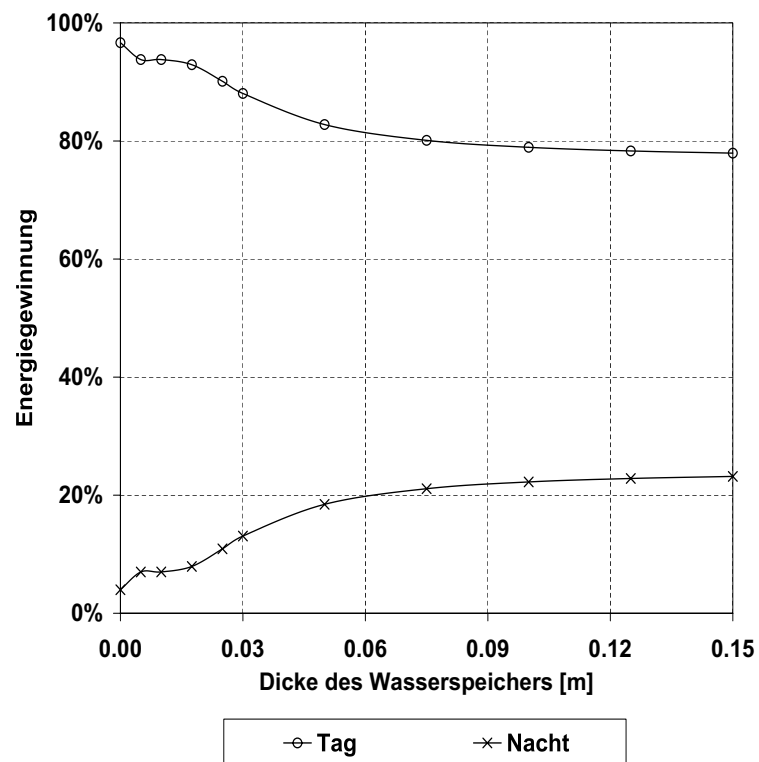


Abb. 5-72: Potenzielle Energiegewinnung bei Tag und Nacht bezüglich unterschiedlicher Höhe des Wasserspeichers.

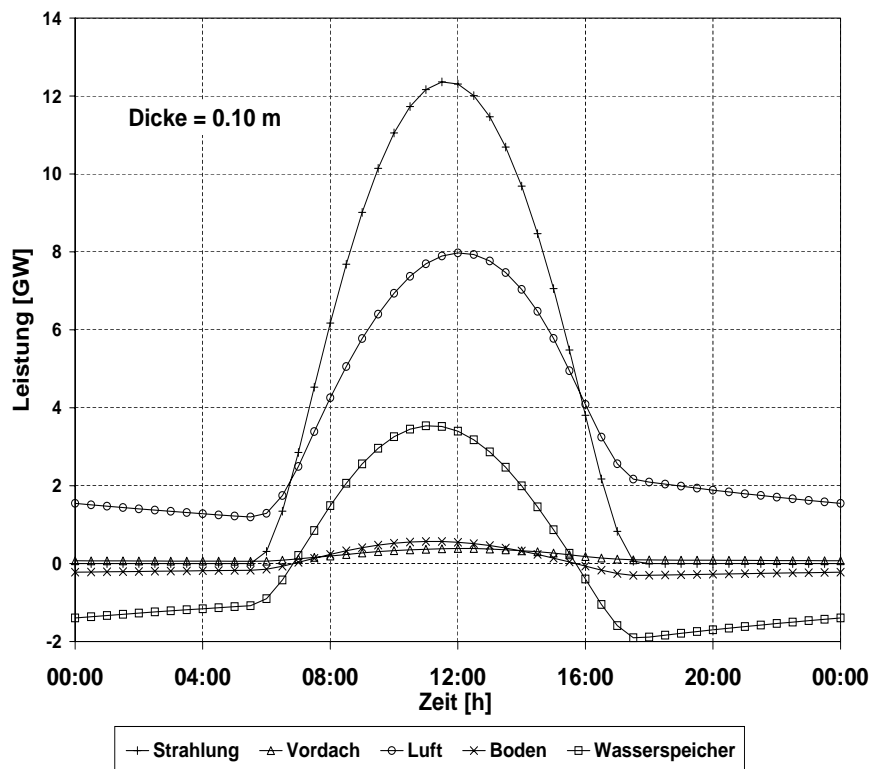


Abb. 5-73: Verlauf der Leistung im Kollektor bei einer Wasserspeicherhöhe von 0.10 m.

5.8.7 Variation des Transmissionsgrads der Abdeckung

Eine Erhöhung des Transmissionsgrads führt zu einer Steigerung der Lufttemperatur und des Wirkungsgrads des gesamten Systems. Erwartungsgemäß resultiert daraus eine Vergrößerung des Massenstroms und der erzeugten Energie. Die Abb. 5-74 bis Abb. 5-78 bestätigen dieses Verhalten. Als Beispiel sind in Tabelle 5-7 die Transmissionsgrade für unterschiedliche Materialien dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein niedrigerer Transmissionsgrad des Kollektorvordaches dessen Wirkung wesentlich vermindern kann. Daher scheint sinnvoll die Auswahl des Vordachmaterials mit höherem Transmissionsgrad und eine regelmäßige Wartung zur Vermeidung von Verstaubung und Sandablagerungen für eine bessere Kollektorleistung.

Tabelle 5-7: Transmissionsgrad für unterschiedliche Materialien (/Incropera und DeWitt 1992/)

Material	τ
Glas	0,79 ~ 0,88
Mylar (Dicke 0,13 mm)	0,87
Plexiglas (Dicke 3,2 mm)	0,90
Teflon (Dicke 0,13 mm)	0,92
Tedlar (Dicke 0,10 mm)	0,92

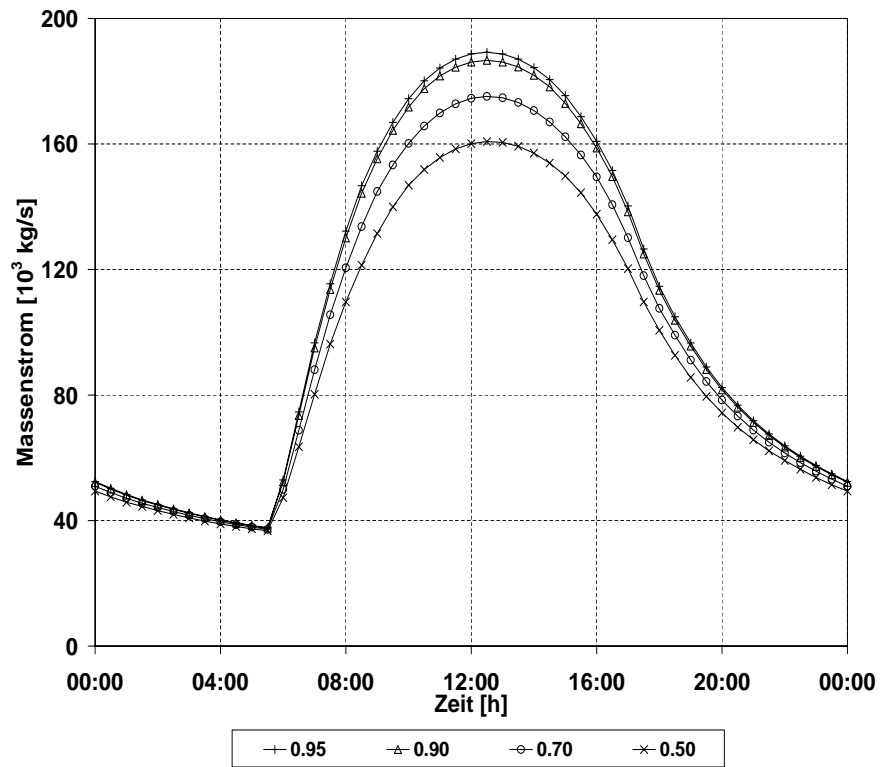


Abb. 5-74: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.

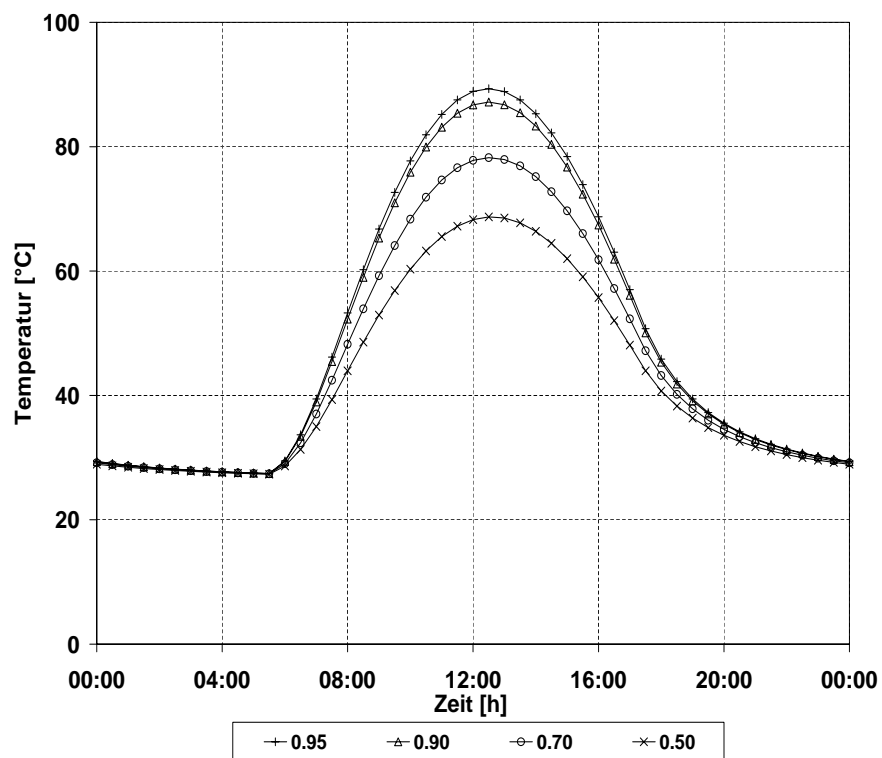


Abb. 5-75: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.

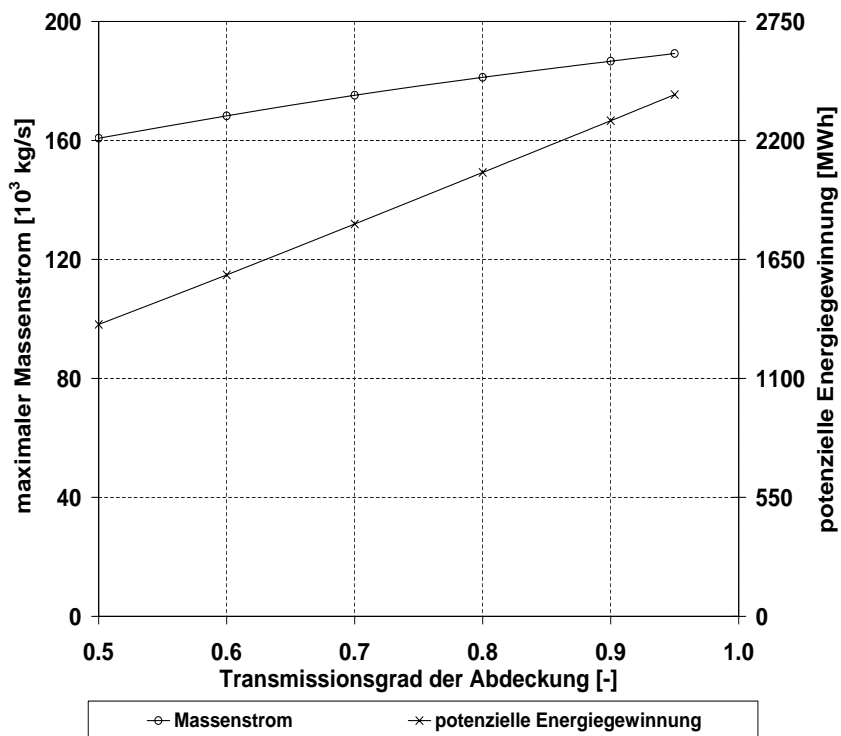


Abb. 5-76: Maximaler Massenstrom und erzeugte Energie bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.

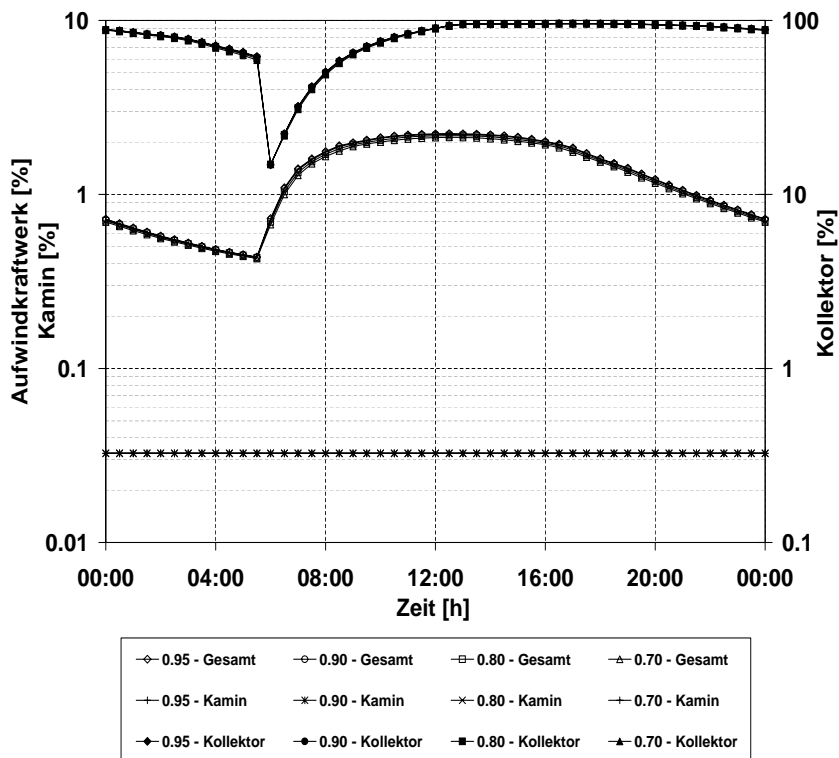


Abb. 5-77: Berechneter Wirkungsgrad des Aufwindkraftwerks, Kamins und Kollektors bei unterschiedlichen Transmissionsgraden.

5.8.8 Einfluss der Bodeneigenschaften

In diesem Abschnitt soll der Einfluss der Bodeneigenschaften auf das thermodynamische Verhalten von Anlagen analysiert werden, wobei der Parameter Wärmeeindringkoeffizient (s. Abschnitt 5.1.4, Gleichung (5-111)) variiert wird. Als Beispiel sind in die Tabelle 5-8 Wärmeeindringkoeffizienten für unterschiedliche Materialien dargestellt. Bei abnehmendem Wärmeeindringkoeffizienten ergibt sich am Morgen nach Sonnenaufgang eine Erhöhung der Lufttemperatur im Kollektor und des Massenstroms im System. Nach Sonnenuntergang kehrt sich die Richtung des Wärmestroms um, der stärkere Wärmetransport vom Boden an die Luft bei höherem Wärmeeindringkoeffizienten führt zu einer Erhöhung der Nutzleistung des Systems in der Nacht, woraus eine erhöhte Austrittstemperatur und ein erhöhter Massenstrom der Luft resultieren. Die Erhöhung des Wärmeeindringkoeffizienten von 1000 auf 2000 $\text{Ws}^{1/2}/\text{Km}^2$ verursacht keine wesentliche Änderung der potenziellen Energiegewinnung. Abb. 5-78 bis Abb. 5-80 verdeutlichen die angesprochenen Zusammenhänge.

Tabelle 5-8: Wärmeeindringkoeffizienten in $\text{Ws}^{1/2}/\text{Km}^2$

	ρ [kg/m^3]	c_p [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]	k [$\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}$]	b [$\text{Ws}^{1/2}/\text{Km}^2$]
Beton	2200	880	1,3	1590
Wasser	998	4183	0,598	1580
Sandboden	1450	879	1,28	1280
Holz	410	2700	0,14	390

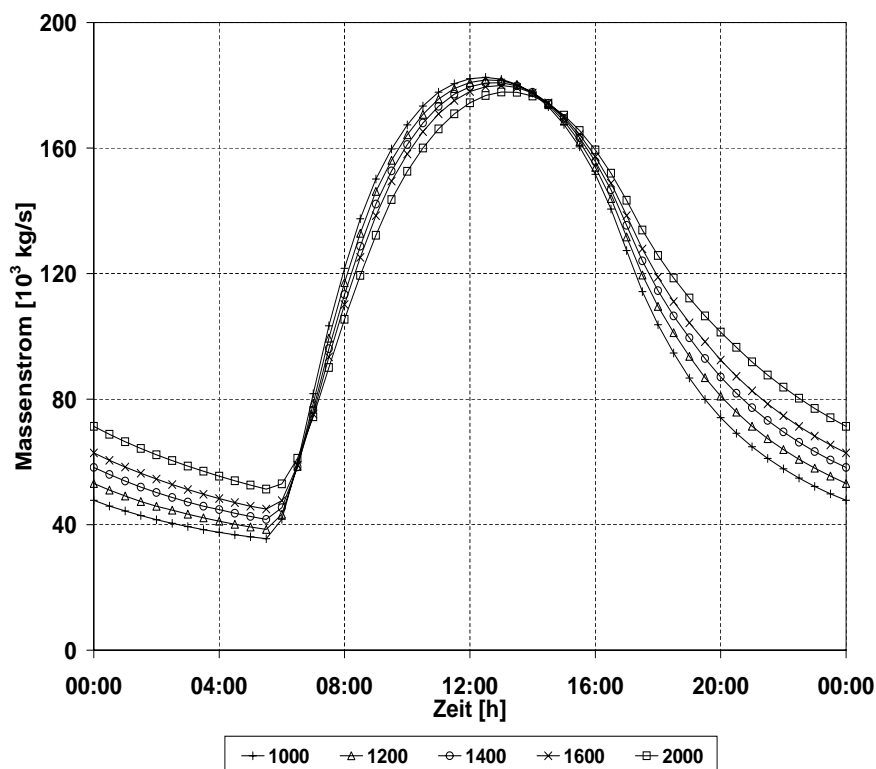


Abb. 5-78: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Wärmeeindringkoeffizienten des Bodens [$\text{W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{K}\cdot\text{m}^2$].

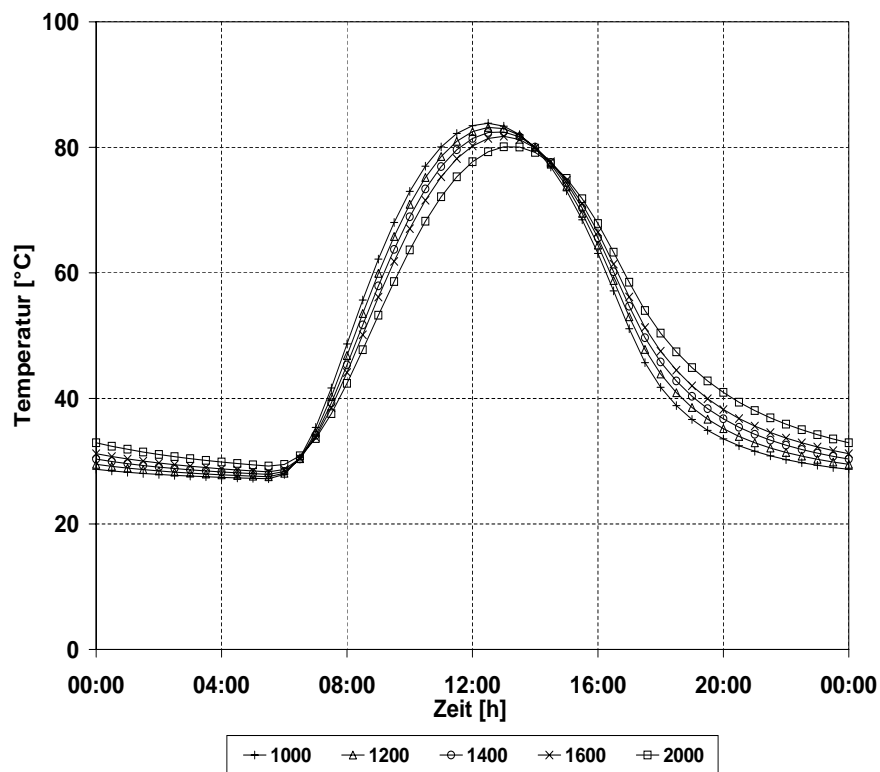


Abb. 5-79: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Wärmeeindringkoeffizienten des Bodens [$\text{W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{K}\cdot\text{m}^2$].

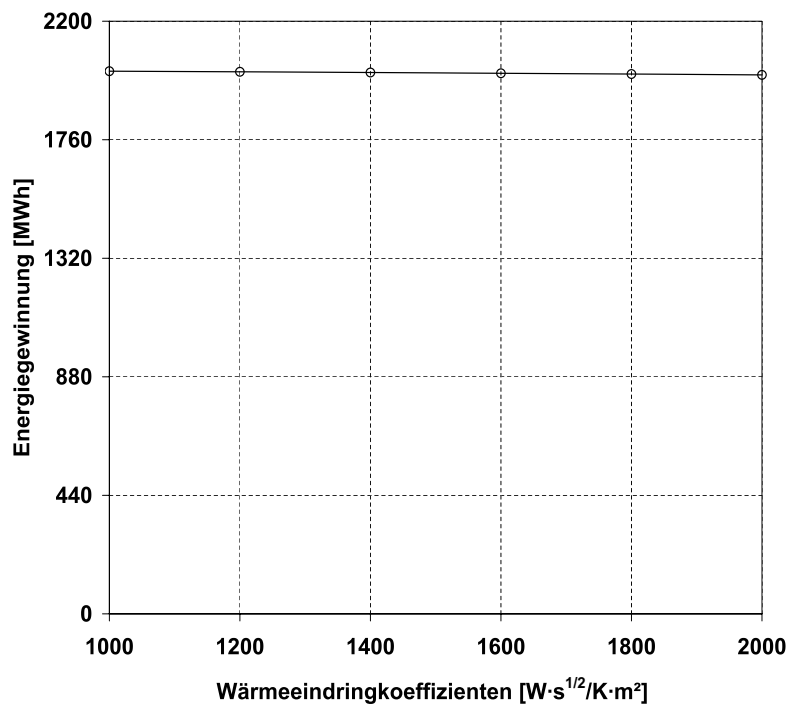


Abb. 5-80: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung vom Wärmeeindringkoeffizienten des Bodens [$\text{W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{K}\cdot\text{m}^2$].

5.8.9 Kontaktwiderstand zwischen Absorber und Boden

Die Bestimmung des Abstandes zwischen Absorberfolie und Boden ist dann schwierig, wenn die schwarze Folie über eine unebene Erdoberfläche. Bei direktem Kontakt zwischen Boden und Folie (Abstand $\rightarrow 0$) ergibt sich am Abend nach Sonnenuntergang durch den hohen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Boden und Folie eine Erwärmung des Absorbers. Daraus folgt auch eine Erwärmung der Luft im Kollektor, eine Fallströmung wird vermieden. Vor Sonnenaufgang kehrt sich die Richtung des Wärmestromes um, der Wärmetransport vom Absorber in den Boden führt zu einer Verringerung der Nutzleistung des Systems. Mit abnehmender Flussdichte der kurzwelligigen Strahlung und der zunehmenden Erwärmung des Bodens wird nachmittags dem System wieder Wärmeenergie aus dem Boden zugeführt, woraus eine erhöhte Austrittstemperatur und ein erhöhter Massenstrom der Luft resultieren. Eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Absorber und Boden führt zu einer Abschwächung des Einflusses des Bodens, die Vergrößerung des Abstandes von 7 cm auf 10 cm zieht allerdings keine wesentliche Veränderung des Verhaltens der Anlage nach sich. Die Abb. 5-81 bis Abb. 5-83 verdeutlichen die angesprochenen Zusammenhänge.

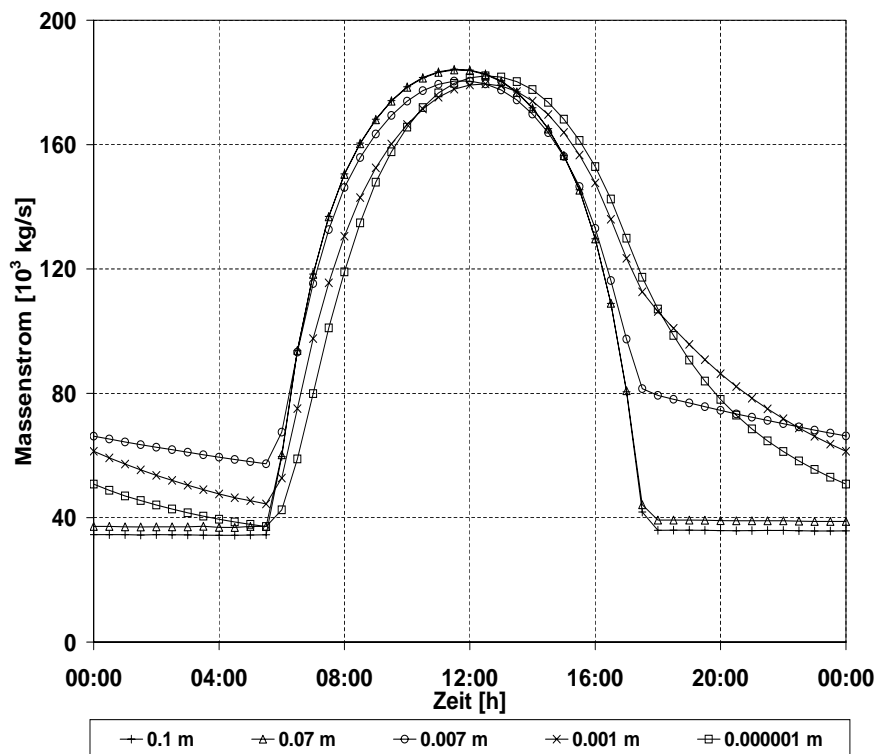


Abb. 5-81: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Abständen zwischen Absorber und Boden.

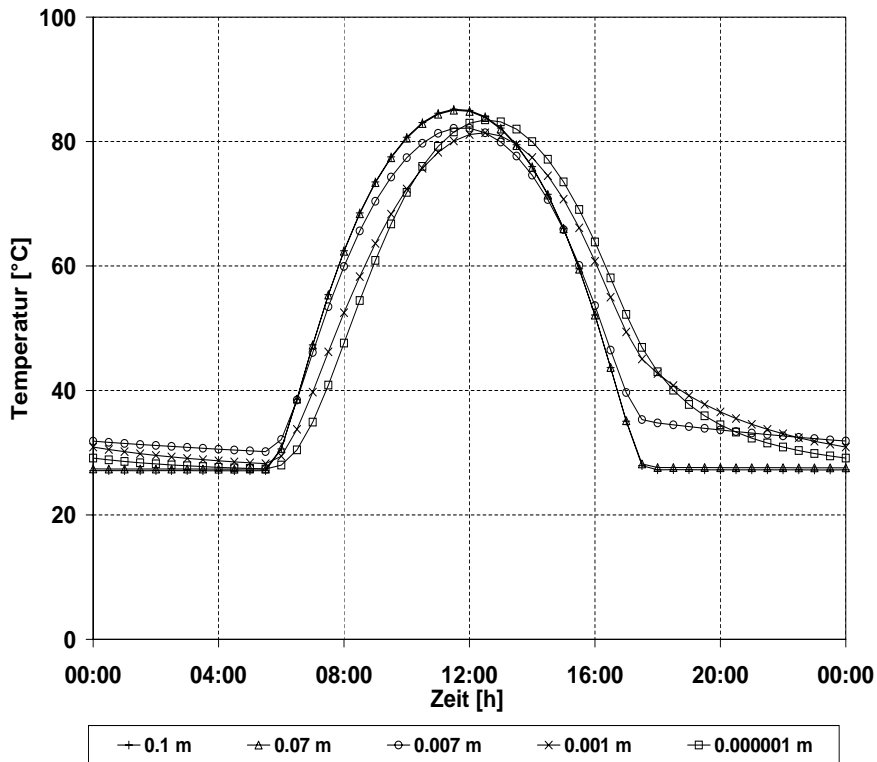


Abb. 5-82: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Abständen zwischen Absorber und Boden.

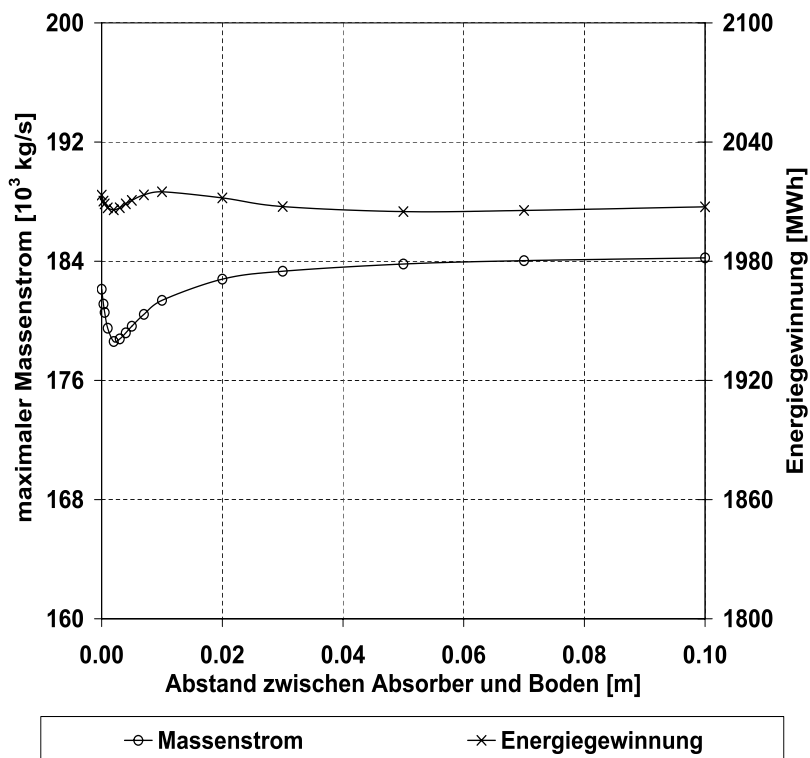


Abb. 5-83: Abhängigkeit der berechneten Energiegewinnung und des maximalen Massenstroms von Abständen zwischen Absorber und Boden.

5.8.10 Einfluss der Luftfeuchte

Abb. 5-84 und Abb. 5-85 geben den Einfluss der Luftfeuchte auf den Massenstrom sowie die Lufttemperatur in Abhängigkeit der Zeit wieder. Eine Abweichung zwischen den Kurven ist nicht erkennbar. Aus Abb. 5-86 geht der berechnete Verlauf der Luftfeuchte über der Länge des Kollektors und des Kamins um 12:00 Uhr mittags hervor. Mit der Temperaturerhöhung der Luft im Kollektor geht eine Verringerung der relativen Luftfeuchte einher. Wegen der Abkühlung der Luft im Kamin wird die relative Luftfeuchte erhöht.

Es wurde festgestellt, dass der Luftfeuchte keinen Einfluss auf den Systembetrieb hat. In diesem Zusammenhang kann man bemerken, dass ein Aufwindkraftwerk sich in ariden sowie in feuchten Zonen ohne größere Schwierigkeit einrichten lässt.

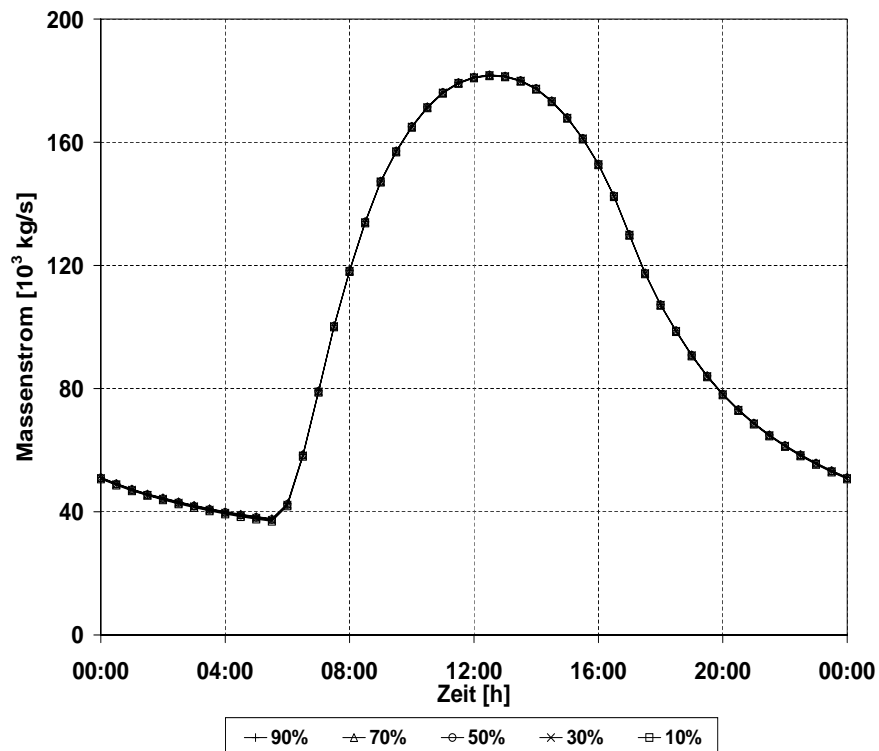


Abb. 5-84: Berechneter Massenstrom bei unterschiedlichen Luftfeuchten.

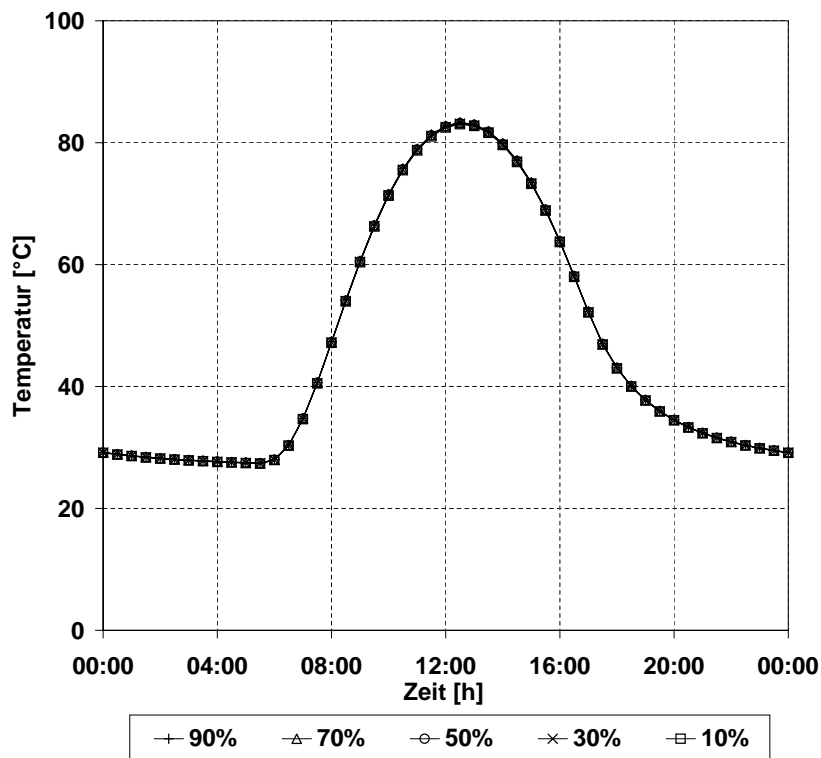


Abb. 5-85: Berechnete Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Luftfeuchten.

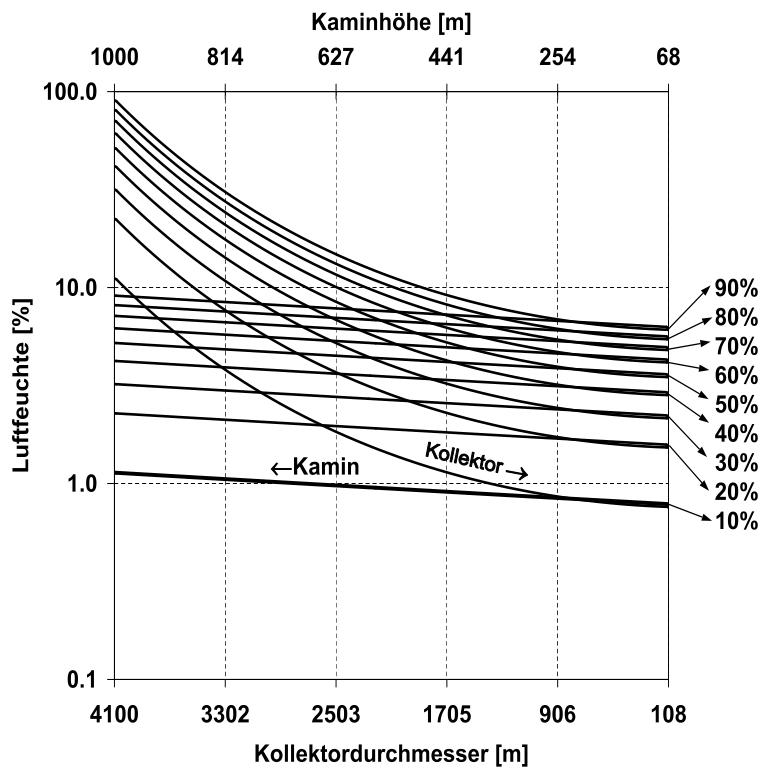


Abb. 5-86: Berechneter Verlauf der relativen Luftfeuchte als Funktion der Kollektordurchmesser und der Kaminhöhe.

5.8.11 Variation des Druckentnahmefaktors

Der Druckentnahmefaktor sollte so gewählt werden, dass die Leistung des Systems maximal wird. Nach der Gleichung (5-214) hängt die Leistung von

$$P = \Delta p_{ges} A w_{ges} \eta_t x \sqrt{1-x} \quad (5-217)$$

ab. Die Abb. 5-87 bestätigt, dass die maximale Leistung bei einem Druckentnahmefaktor $x \sim 0,97$ erzielt wird. Mit zunehmendem Druckentnahmefaktor erfolgt im System eine Verminderung des Massenstroms und gleichzeitig eine Erhöhung der Austrittstemperatur der Luft (s. Abb. 5-87 und Abb. 5-88) und damit eine Erhöhung des Druckunterschieds zwischen Kaminfuß und der Umgebung (Δp_{ges}). Diese gegensätzlich beeinflussenden Parameter zeigen die Komplexität des Aufwindkraftwerks.

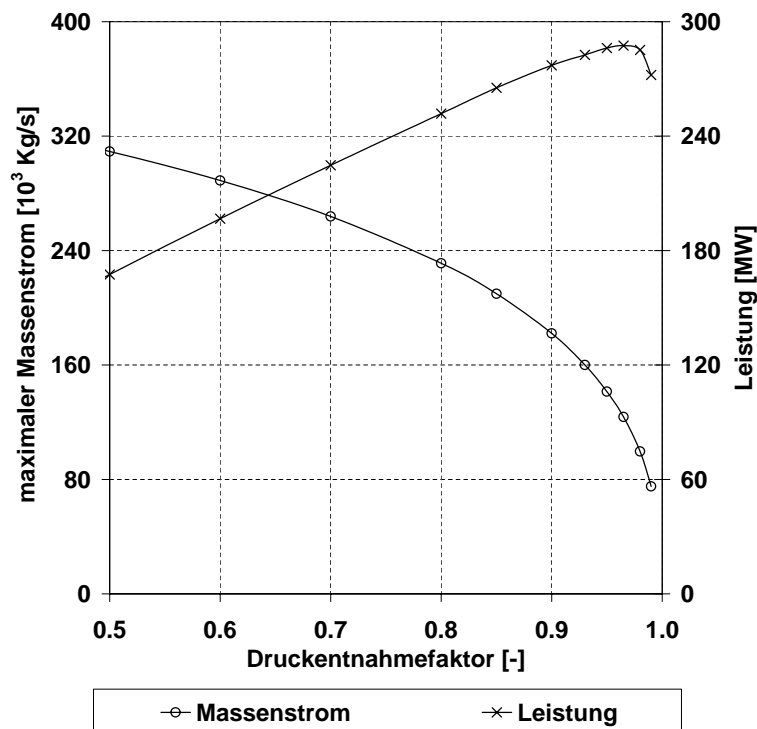


Abb. 5-87: Abhängigkeit des maximalen Massenstroms und der Leistung vom Druckentnahmefaktor.

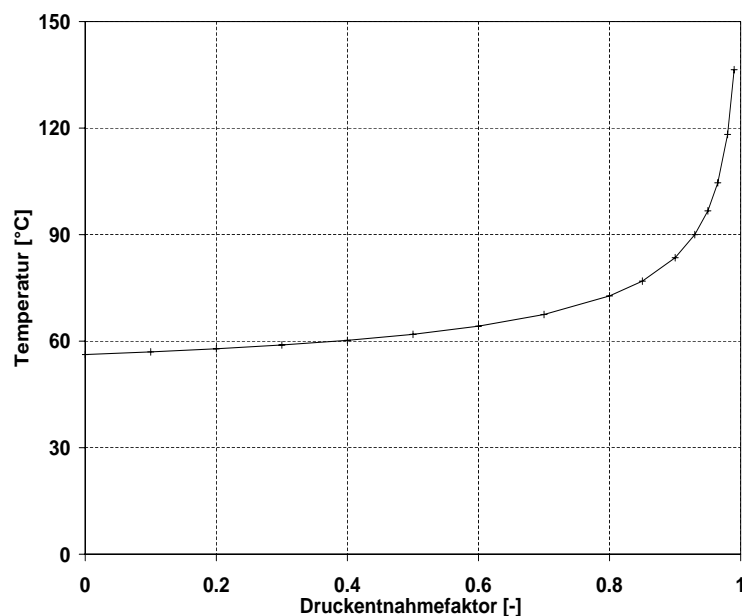


Abb. 5-88: Die Austrittstemperatur der Luft im Kollektor bei unterschiedlichen Druckentnahmefaktoren.

Die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalyse sind in Abb. 5-89 zusammengefasst und werden hier noch einmal dargestellt:

- Die Auswirkungen der Variation der geometrischen Parameter Kaminhöhe und Kollektorfläche und des Abdeckungsparameters auf den Betrieb eines Aufwindkraftwerks sind relativ groß. Einschränkungen für die Vergrößerung des Systems sind dann die Bau- und Geländekosten sowie die technische Realisierbarkeit des Kamins.
- Andererseits ist der Einfluss der Eigenschaften des Bodens bzw. die Luftfeuchte auf den Systembetrieb gering.
- Der Einsatz von Doppeltabdeckung wird nicht empfohlen, da die Erhöhung der Energiegewinnung sehr gering ist.
- Umwelteinwirkungen (Regen, Tau) sowie Dachreinigungsverfahren und -häufigkeit können die Strahlungsdurchlässigkeit des Kollektorsdachs verbessern.
- Wasserspeicher kann benutzt werden, der Speichereffekt des Kollektors zu erhöhen. Dadurch ändert sich auch der zeitliche Verlauf der Stromerzeugung und den Kapazitätsfaktor des Systems.

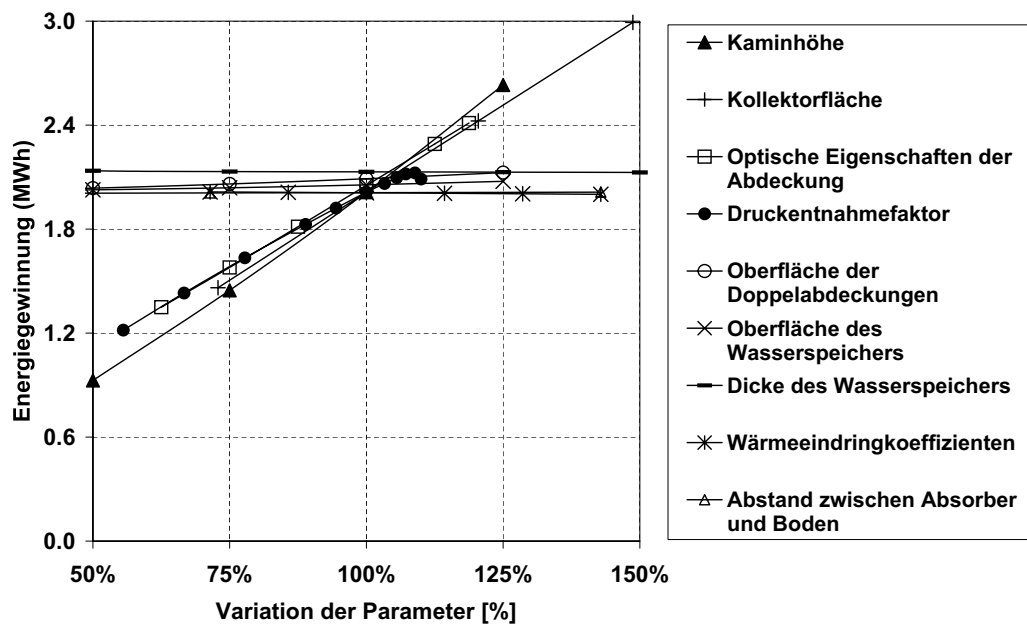


Abb. 5-89: Energiegewinnung am simulierten Referenztage bei Variation unterschiedlicher Parameter.

5.9 Energieproduktion einer fiktiven Anlage

Wurde im Abschnitt 5.7 das thermodynamische Verhalten von Aufwindkraftwerke untersucht und die gerechnete Ergebnisse mit Experimentalergebnissen des Prototyps von Manzanares validiert, so liegt die Bedeutung des Rechenprogramms doch vornehmlich in der Möglichkeit, Richtlinien zur Planung von solarthermischen Aufwindkraftwerken zu erstellen. Daher soll an dieser Stelle das energetische Verhalten einer geplanten Anlage mit Hilfe des vorgestellten Rechenprogramms untersucht werden.

Als Standort einer fiktiven Aufwindanlage wurde Petrolina in Nordost-Brasilien ausgewählt. Der Ort liegt im brasilianischen Bundesstaat Pernambuco (Breitengrad: -9,4 Süd; Längengrad: -40,5 West). Da das Klima semiarid, mit wenig Regen (7 bis 8 trockene Monate) und hohen Temperaturen ist, bestehen in Petrolina ausgezeichnete Verhältnisse zum Betrieb eines Aufwindkraftwerks.

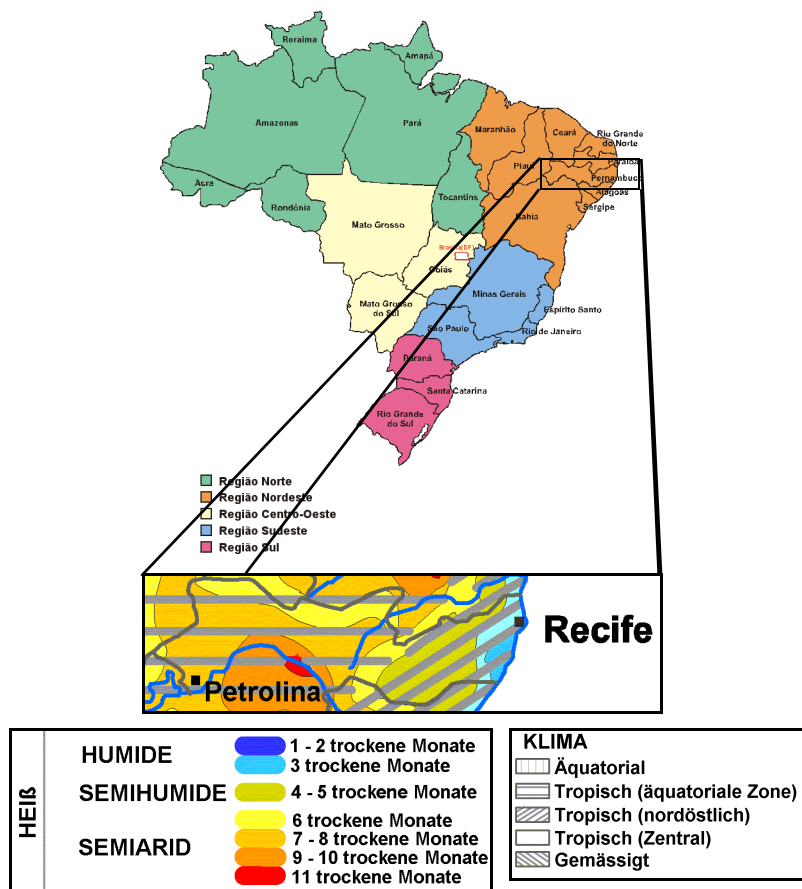


Abb. 5-90: Klima und Standort von Petrolina.

Es soll das energetische Verhalten einer 100 MW Anlage mit den in der Tabelle 5-9 dargestellten Daten untersucht werden. Als wesentliche Wetterdaten sind hier, wie in Abschnitt 5.7, folgende Größen anzusehen:

- Globalstrahlungsflussdichte
- Umgebungstemperatur
- Relative Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit

Sie wurden mit Hilfe der Software /Meteonorm 1999/ ermittelt. Als Beispiel sind die ersten 10 Tage des Referenzjahres in Abb. 5-91 gezeigt. Die gesamte Sonneneinstrahlung betrug im Jahr 2000 1946 kWh/m²a.

Tabelle 5-9: Eingabewerte für die Berechnung der Energieproduktion einer geplanten Aufwindanlage

Parameter	Werte	Einheit
Vordachhöhe am Eintritt des Kollektors	5	m
Vordachhöhe am Austritt des Kollektors	35	m
Kollektordurchmesser	4100	m
Einfache Abdeckung	Ja	-
Transmissionsgrad	0,90	-
Absorptionsgrad	0,10	-
Kamindurchmesser am Eintritt	120	m
Kamindurchmesser am Austritt	120	m
Kaminhöhe	1000	m
Absorptionsgrad des Absorbers	0,93	-
Emissionsgrad des Absorbers	0,90	-
Wasserspeicher	Nein	
Abstand zwischen dem Absorber und dem Boden	0,0001	m
Rauheitshöhe des Bodens	0,05	m
Wärmeleitfähigkeit des Bodens	0,6	W/m·K
Temperaturleitfähigkeit des Bodens	$2,91 \times 10^{-7}$	m ² /s
Breitengrad	-9,4 (Süd)	°
Längengrad	-40,5 (West)	°
Maximaler Fehler	0,1	%
Längenschrittzahl	300	-
Zeitschritte	3600	s
Druckentnahmefaktor	0,80	-
Wirkungsgrad des Turbogeneratorsatzes	76,9	%

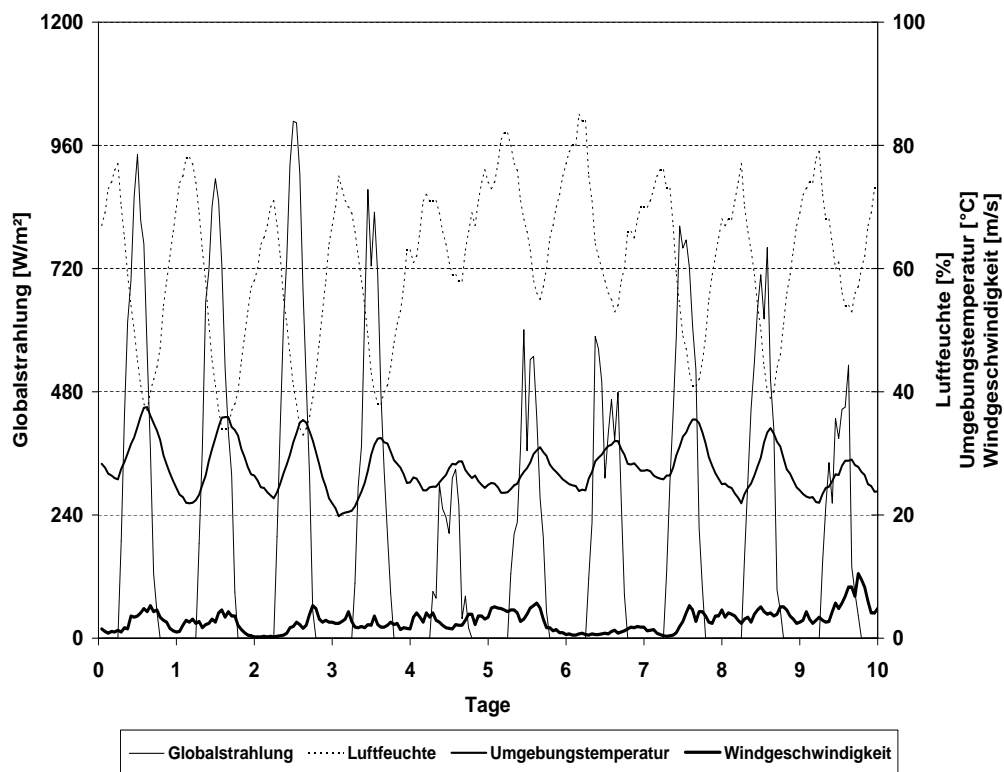


Abb. 5-91: Verlauf der Globalstrahlung, Luftfeuchte, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit in Petrolina in den ersten zehn Tagen des Jahres 2000.

In Tabelle 5-10 sind die Betriebsdaten eines geplanten 100 MW und 150 MW Aufwindkraftwerks in Petrolina zusammengefasst. Eine Anlage in Petrolina könnte theoretisch insgesamt 8329 Stunden laufen, was einer durchschnittlichen täglichen Betriebszeit von 22,8 Stunden entspricht. Wenn man die Nennleistung der geplanten Anlage auf 150 MW, dann nimmt die Jahressenergieerzeugung ca. 6% zu bzw. der Kapazitätsfaktor ca. 30% ab. Die Erhöhung der Nennleistung führt zu einer Erhöhung der erzeugten Energie im Laufe des Jahres. Tatsächlich kann nur eine ökonomische Betrachtung zeigen, ob diese Variation zu geringeren Stromgestehungskosten führt.

Tabelle 5-10: Betriebsdaten eines 100 MW Aufwindkraftwerks in Petrolina (Jahr 2000).

Betriebsdaten			
Nennleistung	MW	100	150
Jahressenergieerzeugung (gesamt)	GWh/a	231,3	244,5
pro m ² Kollektorfläche	kWh/m ² a	17,5	18,5
Jahresbetriebsstunden	h/a	8329	8329
Volllaststunden (mit Nennleistung am Netz)	h/a	2313	1630
Kapazitätsfaktor (Volllaststunden/8760)	%	26,4%	18,6%
Nachtenergieerzeugung	GWh/a	17,9	17,9
Nachtbetriebsstunden (18:00 ~ 6:00 Uhr)	h/a	4132	4132

Die Betriebsergebnisse des Aufwindkraftwerks sind auch von der Speicherfunktion des Kollektorbodens abhängig. Der Speichereffekt zeigt einen ausgeprägten Tagesgang und ist auch von der Jahreszeit abhängig. Die tagsüber im Boden gespeicherte Energie kann in der darauffolgenden Nacht, allerdings mit entsprechenden Verlusten, zurückerhalten werden. Auf diese Weise werden elektrische Nachtleistung bei Turbinenteillastbetrieb möglich. Diese Simulation zeigt, dass dieser Effekt signifikant ist, so dass der Nachtbetrieb einen Anteil von etwa 7,7% bei 100 MW an der Jahresenergie (mit 4132 Nachtbetriebstunden) erreicht hat.

5.10 Energieproduktion der Referenzanlagen

Mit Hilfe des dargestellten Simulationsprogramms kann die erzeugte Energie der im Kapitel 4 ermittelten Referenzanlagen im jahreszeitlichen Verlauf berechnet werden. Die in der Tabelle 5-11 dargestellte jährliche Stromerzeugung wurde mit den stündlich aufgenommenen meteorologischen Daten (Globalstrahlungsflussdichte, Umgebungstemperatur, Relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit) von Barstow/Kalifornien von 1990 berechnet und wird benutzt, die Stromgestehungskosten der Referenzanlagen zu ermitteln. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass diese Region einen geeigneten Standort zum Betrieb eines Aufwindkraftwerks darstellt.

Tabelle 5-11: Betriebsdaten der Referenzanlagen.

Betriebsdaten				
Nennleistung	MW	5	30	100
Jahressenergieerzeugung (gesamt)	GWh/a	12	75	281
pro m ² Kollektorfläche	kWh/m ² a	5,9	9,6	14,6
Jahresbetriebsstunden	h/a	4949	4972	4764
Volllaststunden (mit Nennleistung am Netz)	h/a	2400	2500	2810
Kapazitätsfaktor (Volllaststunden/8760)	%	27,4%	28,5%	32,1%
Nachtenergieerzeugung	GWh/a	0,01	0,07	0,28
Nachtbetriebsstunden (18:00 ~ 6:00 Uhr)	h/a	836	873	693

5.11 Zusammenfassung

Das primäre Ziel dieses Kapitels war die Entwicklung eines Simulationsmodells, welches das für solare Anlagen typische transiente Verhalten des Aufwindkraftwerkes simulieren kann. Für die Beurteilung des Modells wurde ein Vergleich der Ergebnisse der Simulationsrechnung mit experimentellen Ergebnissen von Manzanares durchgeführt, der eine gute Übereinstimmung gezeigt hat. Durch die Sensitivitätsanalyse sind große Einflüsse der geometrischen Parameter sowie des Abdeckungseingeschäften auf das thermodynamische Verhalten des Aufwindkraftwerkes zu bestätigen. Qualitative Aussagen zum Einfluss relevanter Parameter auf das energetische Verhalten von Aufwindkraftwerken wurden getroffen.

6 Ökonomische Analyse

Hier werden die „Levelized Electricity Costs“ für die untersuchten Aufwindkraftwerke berechnet. Die Berechnung der Stromgestehungskosten erfolgt entsprechend /VDI Richtlinien 1991/ mittels der Annuitätenmethode.

6.1 Grundlagen

Im Folgenden wird das methodische Vorgehen zur Berechnung der Stromgestehungskosten dargestellt. Kapitalgebundene Kostengruppen unter Angabe der Nutzungszeit der jeweiligen Komponente können neben betriebsgebundenen und sonstigen Kosten definiert werden. Die Berechnung erfolgt auf der Basis der Annuitätenmethode der VDI 2067/VDI Richtlinien 1991/.

Die Wirtschaftlichkeit von Energieerzeugungsanlagen wird bestimmt durch den für den Anlagenbau notwendigen Investitionsaufwand und die Betriebskosten, die sich aus den Personalkosten, den Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie den eventuellen notwendigen Brennstoffkosten zusammensetzen. Neben diesen rein wirtschaftlichen Größen sind noch die Komponenten, deren Wirkungsgrade sowie die Volllaststunden der Gesamtanlage von Bedeutung. Damit ist nicht die Wirkungsgradoptimierung Ziel einer solchen Analyse, sondern die Optimierung des Kostennutzenverhältnisses. Dieses führt dazu, dass nicht unbedingt das System mit dem höchsten Wirkungsgrad auch das wirtschaftlichste ist.

6.1.1 Kostenrechnung

Investitions- und Betriebskosten

Bei der Kostenrechnung wird zwischen kapitalgebundenen, betriebsgebundenen, verbrauchsgebundenen und sonstigen Kosten unterschieden (/Schneider 1998/).

Kapitalgebundene Kosten. Den größten Teil der kapitalgebundenen Kosten verursachen die Investitionsausgaben einer Anlage. Je nach Investitionsrechenverfahren werden diese als einmalige Ausgaben in der Anschaffungsperiode erfasst oder mit Abschreibung über die Nutzungsdauer verteilt in Rechnung gestellt. Zu den kapitalgebundenen Kosten I_{Ges} in € gehören die Investitionskosten I_{Inv} in € und die Verzinsung des eingesetzten Kapitals während der Bauzeit ZBZ in €.

$$I_{Ges} = I_{Inv} + ZBZ \quad (6-1)$$

Die gesamten Investitionskosten werden über die Abschreibungszeit linear abgeschrieben. Der jährlich konstante Abschreibungsbetrag AB in €/a berechnet sich aus der Abschreibungszeit n und den gesamten Investitionskosten:

$$AB = \frac{I_{Ges}}{n} \quad (6-2)$$

Die Zinszahlung ZZ eines Jahres in € richtet sich nach dem noch nicht abgeschriebenem Betrag. Hierbei ist zu beachten, dass in diesem Modell alle Zahlungen zum Ende eines Jahres erfolgen und somit im ersten Betriebsjahr die Zinsen auf den gesamten Investitionsbetrag ge-

zahlt werden müssen. Die erste Abschreibung erfolgt zeitgleich mit der ersten Zinszahlung.

$$ZZ_n = [I_{Ges} - (n-1)AB]i \quad (6-3)$$

Wobei i der reale kalkulatorische Zinssatz ist.

Die jährlichen kapitalgebundenen Kosten KK_n in € ergeben sich aus der Summe des Abschreibungsbetrages AB und der Zinszahlung ZZ_n in € des Jahres und werden in der jährlichen Kostenanalyse für jedes Jahr n bestimmt

$$KK_n = AB + ZZ_n \quad (6-4)$$

Betriebsgebundene Kosten. Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören die Kosten, die durch Bedienung, Reinigung, Wartung, Überwachung und Versicherungen entstehen.

Die Personalkosten werden aus dem geschätzten Personalbedarf und den spezifischen jährlichen Personalkosten berechnet. Die Instandhaltungs- und Wartungskosten ergeben sich aus den spezifischen Instandhaltungs- und Wartungskosten und der Nettoleistung.

$$BeK_n = PerK_n + spInWarK_n \cdot P_{Netto} + VersK \cdot I_{spez} \cdot P_{Netto} \quad (6-5)$$

wobei

BeK_n : Betriebskosten im Referenzjahr [€]

$PerK_n$: Personalkosten [€]

$spInWarK_n$: Spezifische Instandhaltungs- und Wartungskosten im Referenzjahr [€/kW_{el}]

P : Installierte Nettoleistung [kW_{el}]

$VersK$: Versicherungskosten im Referenzjahr als Prozentsatz der Investitionskosten [€/a]

I_{spez} : Spezifische Investitionskosten [€/kW_{el}]

Die Betriebskosten werden für das erste Betriebsjahr summiert und unterliegen in allen weiteren Betriebsjahren einer konstanten realen Kostensteigerungsrate. Damit ergeben sich die Betriebskosten im folgenden Jahr jeweils aus den Betriebskosten im Vorjahr:

$$BeK_{n+1} = BeK_n \cdot r_{Be} \quad (6-6)$$

wobei

BeK_{n+1} : Betriebskosten des $(n+1)$ -ten Betriebsjahres [€]

BeK_n : Betriebskosten des n -ten Betriebsjahres [€]

r_{Be} : Realer Kostensteigerungsfaktor für die Betriebskosten [%]

Verbrauchsgebundene Kosten. Die wichtigsten verbrauchsgebundenen Kosten sind die Energiekosten einschließlich der Hilfsenergiekosten. Die Höhe der Energiekosten hängt im wesentlichen vom Energiepreis der verbrauchten Energiemenge ab. Die verbrauchte Energiemenge wiederum ist vom Energiebedarf und dem Wirkungsgrad der Anlage abhängig.

Sonstige Kosten. Verpackung, Schaltanlagen, Steuerung/Regelung, Unterverteilungen, Verkabelung, Auslegung, Koordination, Bauleitung, usw.

Stromgestehungskosten

Die spezifischen Stromgestehungskosten lassen sich aus

- den Investitionskosten,
- der Finanzierungsart, den kalkulatorischen Zinssätzen, Abschreibungszeiten und der Kosteneskalation und
- den Betriebskosten

ermitteln.

Ein Modell wurde verwendet, dass für einen bestimmten Zeitraum die finanzmathematischen Durchschnittskosten der Stromerzeugung berechnet. Die Berechnungsmethode entspricht in den wesentlichen Zügen den Verfahren der Vereinigung deutscher Elektrizität (/VDEW 1987/). Grundsatz dieser Methode ist, dass während der gesamten Abschreibungsdauer die jährlichen Einnahmen die jährlichen Ausgaben decken sollen¹.

Die jährlichen Einnahmen errechnen sich aus dem Produkt der zu ermittelnden Stromgestehungskosten und der jährlichen Stromproduktion, die über den zu betrachtenden Zeitraum als konstant angesetzt wird. Die Ausgaben setzen sich aus den Kapitalkosten, den während der Abschreibungsdauer gleichbleibenden jährlichen Zahlungen für Zins und Tilgung - der sogenannten Annuität - und den mit der Eskalationsrate ansteigenden Betriebskosten zusammen.

Zur Ermittlung der Stromgestehungskosten ist ein dynamisches Investitionsrechnungsverfahren zur Anwendung gebracht worden, das alle zu erwartenden Zahlungen, die mit der Investition verbunden sind, berücksichtigt. Die unterschiedliche zeitliche Verteilung der Zahlungsvorgänge innerhalb des Betrachtungszeitraumes, der die Bau- und Abrüstungszeit umfasst, erfordert die Bewertung aller Zahlungen unter Berücksichtigung des Zeitpunktes ihrer Fälligkeit. Dies erfolgt durch ihre Auf- bzw. Abzinsung auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt (Inbetriebnahmezeitpunkt des Kraftwerks).

Zur besseren Interpretation der Ergebnisse und insbesondere um die Referenzanlagen mit unterschiedlicher Leistung vergleichbar zu machen, werden die Barwerte in spezifische Werte (Ct/kWh) umgerechnet.

Zunächst werden die Kosten aller Jahre mit dem realen kalkulatorischen Zinssatz auf das Jahr der Inbetriebnahme abdiskontiert und daraufhin zu einem Barwert aller jährlichen Kosten summiert. Kapitalgebundene Kosten und Betriebskosten werden einzeln summiert, um ihren jeweiligen Anteil zu bestimmen. Für den Barwert der kapitalgebundenen Kosten $BWKK$ gilt:

$$BWKK = \sum_{n=1}^n \frac{KK_n}{(1-i)^n} \quad (6-7)$$

wobei für den Barwert der Betriebskosten $BWBeK$ gilt:

¹ siehe Anhang C „Mathematische Herleitung der finanzmathematischen Durchschnittskosten“

$$BWBeK = \sum_{n=1}^n \frac{BeK_n}{(1-i_r)^n} \quad (6-8)$$

Der Barwert der gesamten Kosten $BWGK$ ergibt sich aus der Summe dieser Barwerte

$$BWGK = BWKK + BWBeK \quad (6-9)$$

Im folgenden Schritt wird der Barwert der gesamten Kosten zu jährlich konstanten Erzeugungskosten NGK gemittelt. Als Nivellierungszeitraum wird das Betriebsjahr verwendet.

$$NGK = BWGK \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6-10)$$

Um von den nivellierten jährlichen Gesamtkosten auf die Stromgestehungskosten K_{Strom} zu kommen, müssen die nivellierten jährlichen Gesamtkosten NGK durch die jährlich produzierte Strommenge SM geteilt werden. Die jährlich produzierte Strommenge ergibt sich dabei aus den Volllaststunden und der installierten Nettoleistung.

$$K_{Strom} = \frac{NGK}{SM} \quad (6-11)$$

Zur Berechnung der Stromgestehungskosten müssen eine Reihe von Annahmen getroffen werden und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen festgelegt werden. Die wichtigsten Annahmen sind hier kurz aufgeführt:

- *Preisbasis.* Als Preisbasis werden für alle Berechnungen € von 2002 verwendet. Die Stromgestehungskosten sind reale (nicht nominale) finanzmathematisch durchschnittliche Kosten während der Betriebszeit auf dieser Preisbasis.
- *Berücksichtigung von Steuern.* Alle Preise und Kosten verstehen sich ohne Mehrwertsteuer.
- *Allgemeine Inflationsrate.* Für alle Jahre wird von einer konstanten Inflationsrate von 2,5% ausgegangen.
- *Kalkulatorischer Zinssatz.* Der kalkulatorische Zinssatz beeinflusst die Stromgestehungskosten in weit größerem Maße als viele andere Rahmenbedingungen. Ausgehend von einem Referenzzinssatz wird deshalb in Sensitivitätsanalysen die Wirkung höherer und niedrigerer Zinssätze untersucht. Danach ergibt sich für den Referenzfall ein realer kalkulatorischer Zinssatz i von 8 %/a, für den hohen Zinssatz werden 12 %/a, für den niedrigen Zinssatz 4 %/a berechnet.
- *Abschreibung.* Nach /Schlaich 1995/ haben Aufwindkraftwerke eine sehr hohe Lebensdauer, diese kann bei kontinuierlicher Wartung ohne weiteres 60 Jahre und mehr betragen. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit die Nutzungsdauer des Aufwindkraftwerks zunächst mit 30 Jahren angesetzt.
- *Wirtschaftliches Szenario.* Für ein wirtschaftliches Szenario der Berechnung der Investitions-, Betriebs- und Stromgestehungskosten für die wirtschaftliche Beurteilung des Aufwindkraftwerks wird Westeuropa als Referenz gewählt. Durch die Erhebung von relevanten wirtschaftlichen Indikatoren lassen sich die Kosten beim Bau und Betrieb von Aufwindkraftwerken in Ländern mit niedrigerem Lohnniveau und geringeren Herstellungskosten reduzieren.

- *Versicherungskosten.* Die jährlichen Versicherungskosten werden auf 0,45 % der Investitionssumme geschätzt.
- *Realer Kostensteigerungsfaktor für die Betriebskosten.* Eine nominale Kostensteigerungsrate von 3,25 % wird angesetzt. Dieser Wert folgt Angaben der /VDEW 1987/: Darin wird für Instandhaltungskosten und Versicherungen ein Wert von 3,25 %, für die Lohnkostenverteuerung und 3,5 %, für die Materialkostenverteuerung 3 % eine Kostensteigerung von 3 % verwendet.
- *Bauzeit.* Die Bauzeit beträgt bei Aufwindkraftwerken etwa 2 Jahre.
- *Entsorgung.* Für die Entsorgung wird angenommen, dass mit dem Erlös aus dem Verkauf der zu entsorgenden Materialien, insbesondere der Metalle, die Kosten gedeckt werden können.

6.2 Investitionskosten

Um einen schnellen Überblick über die jeweils anteiligen Kosten der Anlagenteile an den Gesamtkosten zu ermöglichen, wurde bei den Investitionskosten zwischen vier Hauptgruppen (Kollektorkosten, Kaminkosten, Maschinenteil usw.) unterschieden. In Abhängigkeit des nutzbaren Strahlungsangebots und der Fahrweise der Gesamtanlage sowie der resultierenden Betriebskosten können daraus die berechneten spezifischen Stromgestehungskosten bestimmt werden.

Bei den ermittelten Kosten ist zu beachten, dass sie lediglich als Richtwerte dienen können, da die Daten auf Literaturangaben bzw. auf der Experimentieranlage Manzanares Pilotanlagen basieren. Gesicherte Angaben über die tatsächlich anfallenden Kosten im Zusammenhang mit Bau und Betrieb eines Aufwindkraftwerks werden erst durch realisierte kommerzielle Anlagen möglich.

6.2.1 Kollektorkosten

Dieser Kostenteil umfasst alle Kosten für Herstellung, Transport, Versicherung, Montage, Ersatzteile und Inbetriebnahme der Kollektorkomponenten. Wie im Abschnitt 3.2.3 erwähnt wurde, können die Investitionskosten nach der Gleichung (3-1) berechnet werden. Es ergeben sich demnach für den Kollektor Kosten, deren Werte in Tabelle 6-3 dargestellt sind.

6.2.2 Kaminkosten

Die Investitionskosten (Herstellung, Transport, Versicherung, Montage, Ersatzteile und Inbetriebnahme) der Kaminkomponente können nach der Gleichung (3-4) (Abschnitt 3.3.3) berechnet werden. In Tabelle 6-3 sind die Investitionskosten für den Kamin gezeigt.

6.2.3 Maschinenteil

Wie im Abschnitt 3.4.2 erwähnt wurde, belaufen sich die Maschinenkosten inklusive Rotorblatt, Nabe, Mechanik, Generator und Steuerung auf ca. 767,- € pro installiertes kW. Die Werte für die Maschinenteilkosten sind in Tabelle 6-3 dargestellt.

6.2.4 Gelände, Infrastruktur und Sonstiges

In diesem Posten wird das notwendige Grundstück sowie E-Leitung, Planung, Bauleitung, Straßen, Gebäude und Werkstätten berücksichtigt. Die entsprechenden Abmessungen und ermittelten Kosten für die einzelnen Anlagengrößen sind in Tabelle 6-1 bzw. Tabelle 6-2 zusammengefasst, die von /Schlaich et al. 1990/ entnommen wurden.

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Abmessungen für die Infrastrukturmaßnahmen und des Personalbedarfs für die Referenzsysteme.

		Referenzsysteme [MW _{e1}]		
		5	30	100
Grundstück	[10 ⁶ km ²]	1,410	5,350	13,20
Zaun	[km]	4,20	8,20	12,90
Zufahrstraße (Breite: 6 m)	[km]	1,5	3	3
E-Zuleitung	[km]	1,5	3	3
Wachgebäude		1	1	1
Verwaltungsgebäude, Höhe: 3 m	[m ²]	60	100	130
Werkstatt, Höhe: 4 m	[m ²]	100	150	200
Lagerhalle, Höhe: 4 m	[m ²]	500	1000	2000
Parkplätze	Stk. [10 m ²]	6	8	9
Straßen, Breite: 3 m	[km]	5	12	20
Projektleiter		1	1	1
Sekretariat		0,5	1	2
Bauingenieur		1	2	3
Maschinenbauingenieur		1	2	2
Jurist		0,5	1	1
Baustellenleiter		-	1	1
Assistent		-	1	3
Dauer	[a]	1,5	2	2

Tabelle 6-2: Abschätzung der Kosten für das Gelände und die Infrastruktur [10^3 €].

		Referenzsysteme [MW_{el}]		
		5	30	100
Gelände und Infrastruktur	Grundstück	504	1928	4821
	Zaun	50	99	156
	Zufahrstraße	216	443	433
	E-Zuleitung	451	902	902
	Wachgebäude	51	153	205
	Summe	1272	3525	6517
Gebäude und Einrichtungen	Verwaltungsgebäude, Höhe: 3 m	23	38,4	50
	Werkstatt, Höhe: 4 m	30	46	61,4
	Lagerhalle, Höhe: 4 m	256	511	1023
	Parkplätze	1,47	1,96	2,21
	Straßen, Breite: 3 m	368	883,5	1473
	Wasser bzw. Abwasser	41	71,6	102
Summe	719,47	1552,46	2711,61	
Auslegung, Koordination und Bauleitung		767	2301	2965

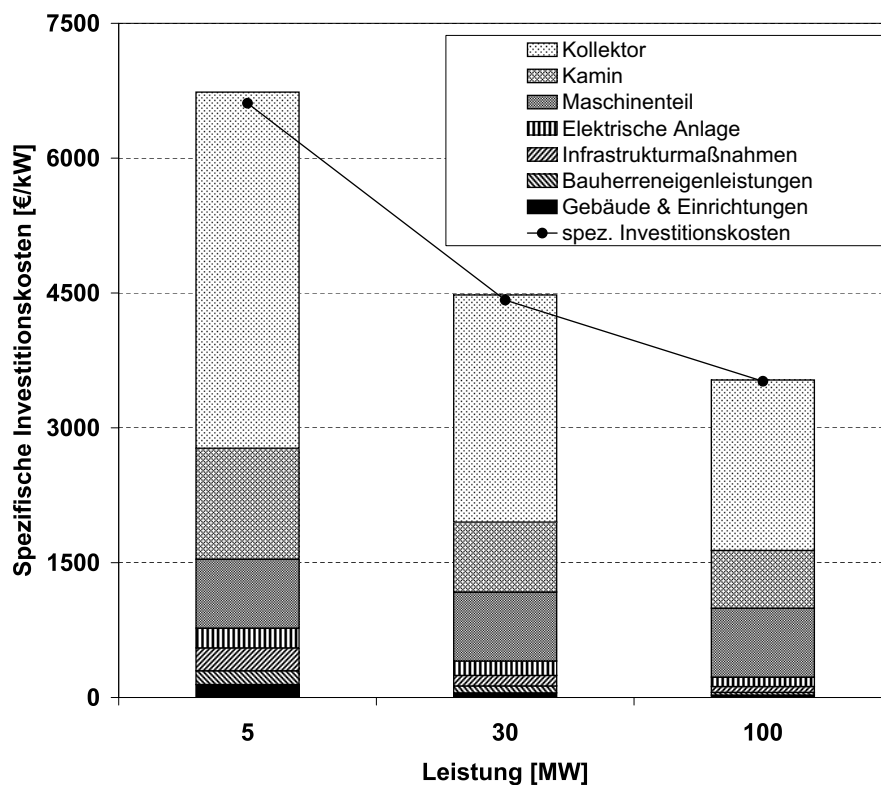
6.2.5 Gesamtsystem

In Tabelle 6-3 und Abb. 6-1 sind die Investitionskosten und spezifische Investitionskosten der Referenzsysteme dargestellt. Bei zunehmender Leistung sinken die spezifischen Investitionskosten, weil der Wirkungsgrad von Aufwindkraftwerken und ihre Jahresenergieproduktion in Abhängigkeit der Kaminhöhe aus physikalischen Gründen mit zunehmenden Abmessungen steigen.

Abb. 6-1 gibt einen Überblick über den Anteil aller Systemkomponenten an den Investitionskosten. Demnach stellen die Kosten für den Kollektor und Kamin durchschnittlich 57% bzw. 18% der gesamten Investitionskosten dar. Die Maschinenteilkosten liegen zwischen 11,6% und 21,8% der gesamten Investitionskosten. Der Anteil der Gebäude und Einrichtungen, Infrastrukturmaßnahmen, Auslegung, Bauherrneigenleistung, elektrische Anlage liegt unter 15%.

Tabelle 6-3: Abschätzung der Investitionskosten [10^6 €].

Bauteil	Referenzsysteme [MW_{el}]		
	5	30	100
Kollektor	19,8	75,8	190
Kamin	6,2	23,3	64,4
Maschinenteil	3,8	23,0	76,7
Gelände und Infrastruktur	1,3	3,5	6,5
elektrische Anlage	1,1	4,8	10,5
Gebäude und Einrichtungen	0,72	1,55	2,71
Versicherung	0,15	0,59	1,58
Gesamtkosten	33,1	132,5	325,4
spez. Investitionskosten [€/kW]	6611	4421	3518

**Abb. 6-1:** Spezifische Investitionskosten der Referenzsystemen verschiedenen Leistungsklasse.

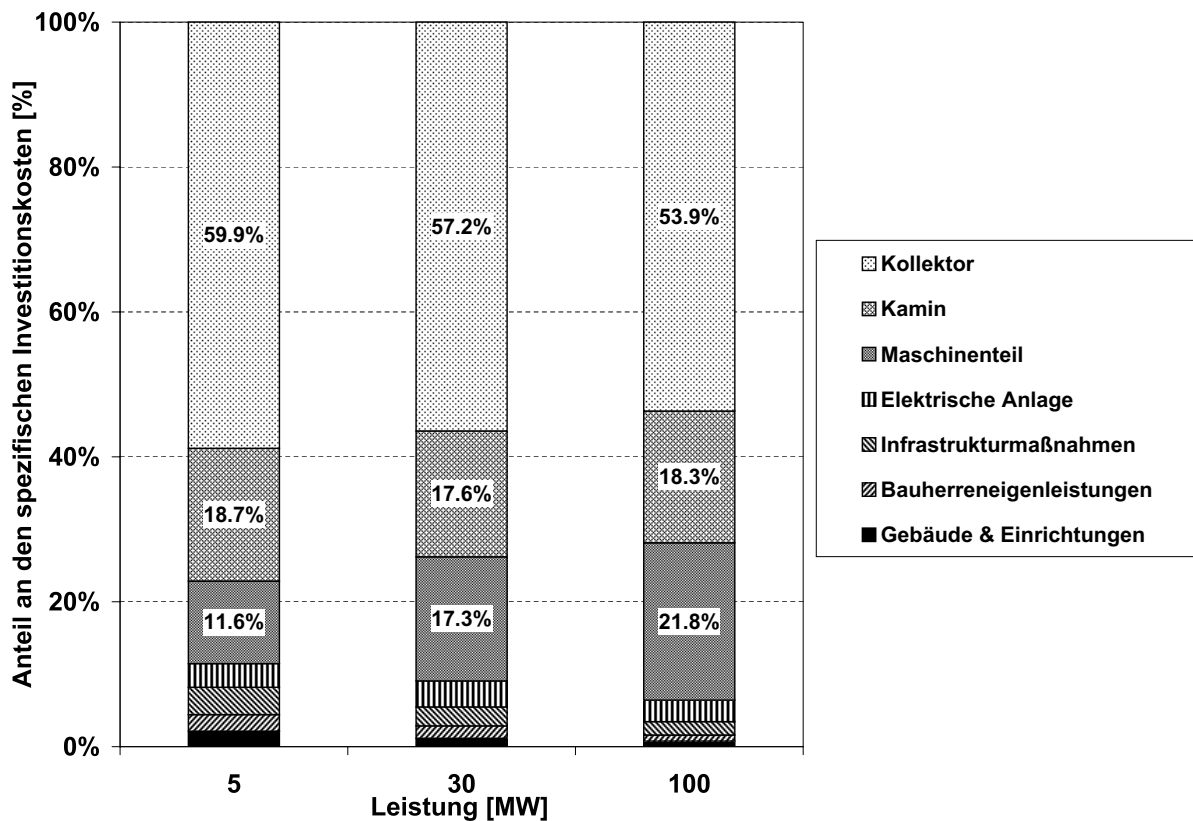


Abb. 6-2: Kostenbeiträge aller Systemkomponente zu den Gesamtsystemkosten.

6.3 Betriebskosten

Nach /Schlaich 1995/ setzen sich die Betriebskosten für Aufwindkraftwerke aus den Wartungs- und Reparaturkosten sowie den Personalkosten zusammen. Brennstoffkosten gibt es bei Aufwindkraftwerken nicht. Basierend auf der Erfahrung mit dem Prototyp in Manzanares und mit den technologisch vergleichbaren Wasserkraftwerken wurde eine Jahrespauschale für Wartung und Reparaturen und für das notwendige Betriebspersonal abgeschätzt. Die Personalkosten für den Betrieb können mit 50000,- €/a·Person angesetzt werden.

Tabelle 6-4: Abschätzung der Betriebskosten.

		Referenzsysteme [MW _{el}]		
		5	30	100
Wartung, Reparatur pro Jahr	[10 ³ €]	175	300	650
Personalkosten pro Jahr	[10 ³ €]	200	250	350
Betriebskosten im 1. Jahr	[10 ³ €]	375	550	1000
Barwert der Betriebskosten während des Betriebsjahres (<i>BWBeK</i>)	[10 ⁶ €]	19,5	28,7	52,1

6.4 Stromgestehungskosten

Basierend auf der in Kapitel 3 dargestellten technischen Auslegung der Gesamtanlage und den in Tabelle 6-3 dargestellten Anlagenkosten lassen sich Stromgestehungskosten für die einzelnen Anlagengrößen von 5 MW, 30 MW und 100 MW in Abhängigkeit von der jährlichen Energieproduktion ermitteln. Anschließend wird eine Variation ausgewählter Parameter durchgeführt und ihr Einfluss auf die Stromgestehungskosten diskutiert.

In Tabelle 6-5, Tabelle 6-6, Tabelle 6-7 sind die berechneten mittleren Stromgestehungskosten für eine Abschreibungszeit von 30 Jahren und reale Zinssätze von 4%, 8% bzw. 12% dargestellt. Die Stromgestehungskosten liegen z.B. zwischen etwa 8,6 Ct/kWh für die 5 MW_{el}-Anlage und etwa 3,7 Ct/kWh für die 100 MW_{el}-Anlage für einen realen Zinssatz von 8%. Allgemein kann gesagt werden, dass die spezifischen Stromgestehungskosten mit steigender Anlagengröße fallen und mit wachsendem Zinssatz zunehmen.

Tabelle 6-5: Stromgestehungskosten für einen realen Zinssatz von 4%.

		Referenzsysteme [MW _{el}]		
		5	30	100
Barwert der kapitalgebundenen Kosten während des Betriebsjahres (<i>BWKK</i>)	[10 ⁶ €]	100	438	1152
Barwert der Betriebskosten während des Betriebsjahres (<i>BWBeK</i>)	[10 ⁶ €]	20	29	52
Barwert der gesamten Kosten (<i>BWGK</i>)	[10 ⁶ €]	129	467	1205
Nivellierte jährliche Gesamtkosten (<i>NGK</i>)	[10 ⁶ €]	7,5	27	70
Energieerzeugung, kumuliert	[GWh]	360	2250	8430
Stromgestehungskosten	[Ct/kWh]	2,1	1,2	1,0

Tabelle 6-6: Stromgestehungskosten für einen realen Zinssatz von 8%.

		Referenzsysteme [MW _{el}]		
		5	30	100
Barwert der kapitalgebundenen Kosten während des Betriebsjahres (<i>BWKK</i>)	[10 ⁶ €]	328	1308	3444
Barwert der Betriebskosten während des Betriebsjahres (<i>BWBeK</i>)	[10 ⁶ €]	20	29	52
Barwert der gesamten Kosten (<i>BWGK</i>)	[10 ⁶ €]	347	1337	3497
Nivellierte jährliche Gesamtkosten (<i>NGK</i>)	[10 ⁶ €]	31	119	311
Energieerzeugung, kumuliert	[GWh]	360	2250	8430
Stromgestehungskosten	[Ct/kWh]	8,6	5,3	3,7

Tabelle 6-7: Stromgestehungskosten für einen realen Zinssatz von 12%.

		Referenzsysteme [MW_{el}]		
		5	30	100
Barwert der kapitalgebundenen Kosten während des Betriebsjahres (<i>BWKK</i>)	[10^6 €]	1020	4076	10735
Barwert der Betriebskosten während des Betriebsjahres (<i>BWBeK</i>)	[10^6 €]	20	29	52
Barwert der gesamten Kosten (<i>BWGK</i>)	[10^6 €]	1040	4105	10788
Nivellierte jährliche Gesamtkosten (<i>NGK</i>)	[10^6 €]	129	510	1339
Energieerzeugung, kumuliert	[GWh]	360	2250	8430
Stromgestehungskosten	[Ct/kWh]	36	23	16

6.4.1 Parametervariation

In Abb. 6-3 sind die ermittelten Stromgestehungskosten in Abhängigkeit von der Abschreibungszeit und den Zinssätzen gezeigt. Man erkennt die starke Abhängigkeit vom Zinssatz. Für Aufwindkraftwerke bedeuten größere Leistung und damit höhere Jahresenergien bei unterproportional steigenden Investitionskosten, dass die Stromerzeugungskosten tendenziell kleiner werden.

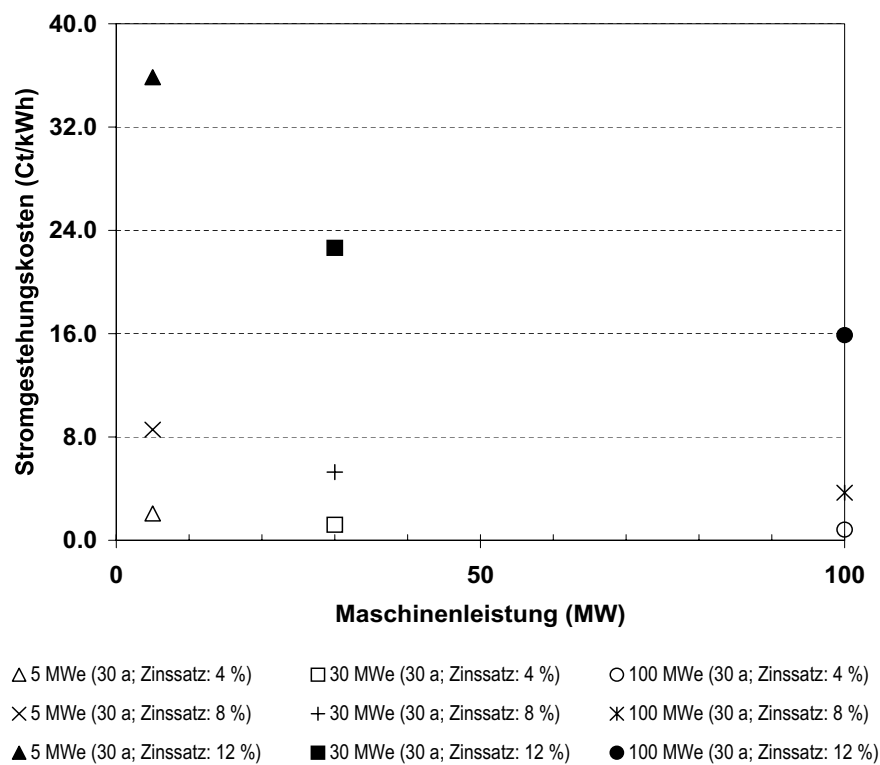


Abb. 6-3: Stromgestehungskosten in Abhängigkeit vom Zinssatz, der Abschreibungszeit und der Maschinenteilleistung.

6.5 Vergleich mit anderen Optionen zur Strombereitstellung

In Tabelle 6-8 sind die untersuchten Betriebsweisen und die Referenzanlagen unterschiedlicher Technologien aufgeführt, die aus der Literatur entnommen wurden /Schneider 1998/. Ziel dieser Arbeit war es, die Stromgestehungskosten verschiedener Kraftwerkstypen in Deutschland zu vergleichen und die Rolle wichtiger Einflussgrößen wie Brennstoffpreisen zu untersuchen. Wie bei der vorliegenden Arbeit entspricht die Berechnungsmethode von /Schneider 1998/ dem Verfahren der /VDEW 1987/.

In Tabelle 6-9 sind die Stromgestehungskosten von verschiedenen Kraftwerken dargestellt, sowie der Einfluss der Brennstoffpreise auf die Stromgestehungskosten (s./Schneider 1998/).

Tabelle 6-8: Kenngrößen ausgewählter Optionen zur Stromerzeugung.

Bezeichnung	Kraftwerkstypen	Nettoleistung [MW _{el}]	Abschreibungszeit [a]	Nettowirkungsgrad [%]	Volllaststunden [h]	Realer Zinssatz [%]
SK-1	Steinkohle, Staubfeuerung	900	30	47,0	6500	8,9
SK-2	Steinkohle, GuD-Prozess mit integr. Kohlevergasung	900	30	52,0	6500	8,9
BK-1	Braunkohle, Staubfeuerung	950	30	44,5	6500	8,9
BK-2	Braunkohle, Staubfeuerung, mit Vortrocknung, 950 MW _{el} (niedrige Kosten)	950	30	49,0	6500	8,9
BK-3	Braunkohle, Staubfeuerung, mit Vortrocknung, 950 MW _{el} (hohe Kosten)	950	30	49,0	6500	8,9
AKW-1	Atomkraftwerk, EPR-Reaktor (niedrige Kosten)	1530	35	36,0	6500	8,9
AKW-2	Atomkraftwerk, EPR-Reaktor (hohe Kosten)	1530	35	36,0	6500	8,9
GuD-1	Erdgas, GuD-Prozess	800	20	60,0	6500	8,9
GuD-2	Erdgas, GuD-Prozess	800	20	57,0	6500	8,9
AWK-1	Aufwindkraftwerk 5 MW _{el}	5	30	~ 1,0	2400	8,0
AWK-2	Aufwindkraftwerk 30 MW _{el}	30	30	~ 1,0	2500	8,0
AWK-3	Aufwindkraftwerk 100 MW _{el}	100	30	~ 1,0	2810	8,0

Tabelle 6-9: Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien.

Bezeichnung	Kraftwerkstypen	Hohe Preisentwicklung [Ct/kWh _{el}]	spezifische Invest. kosten [€/kW _{el}]	Niedrige Preisentwicklung [Ct/kWh _{el}]	Referenz- szenario [Ct/kWh _{el}]
SK-1	Steinkohle, Staubfeuerung	4,0	1100	3,2	3,6
SK-2	Steinkohle, GuD-Prozess mit integr. Kohlevergasung	4,6	1375	3,8	4,2
BK-1	Braunkohle, Staubfeuerung	4,2	1350	3,6	3,9
BK-2	Braunkohle, Staubfeuerung, mit Vortrocknung, 950 MW _{el} (niedrige Kosten)	4,3	1450	3,7	4,0
BK-3	Braunkohle, Staubfeuerung, mit Vortrocknung, 950 MW _{el} (hohe Kosten)	4,1	1250	3,6	3,9
AKW-1	Atomkraftwerk, EPR-Reak- tor (niedrige Kosten)	4,4	1400	3,3	3,7
AKW-2	Atomkraftwerk, EPR-Reak- tor (hohe Kosten)	5,9	2000	4,5	4,9
GuD-1	Erdgas, GuD-Prozess	4,0	425	2,2	3,1
GuD-2	Erdgas, GuD-Prozess	4,1	375	2,2	3,1
AWK-1	Aufwindkraftwerk 5 MW _{el}	-	6611	-	8,6
AWK-2	Aufwindkraftwerk 30 MW _{el}	-	4421	-	5,3
AWK-3	Aufwindkraftwerk 100 MW _{el}	-	3518	-	3,7

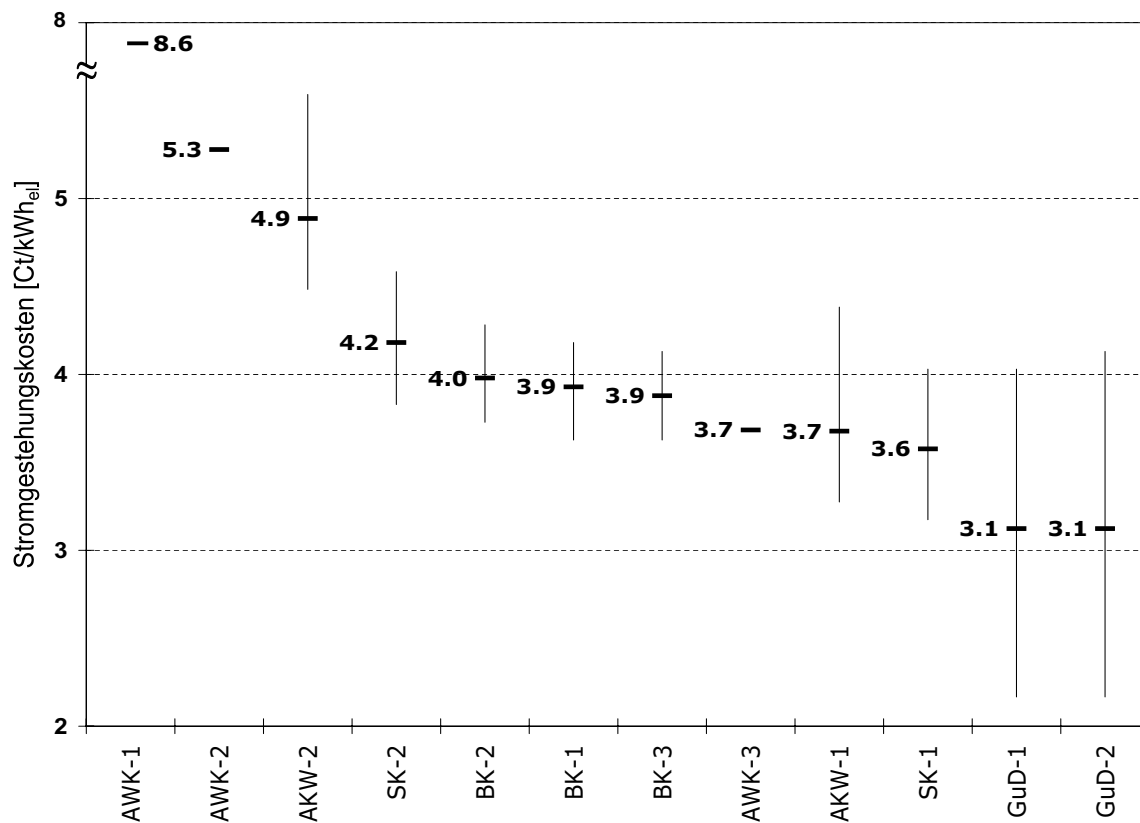


Abb. 6-4: Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien.

Folgende Aussagen lassen sich aus der ökonomischen Analyse herleiten:

- Erdgasgefeuerte GuD-Kraftwerke sind sowohl in der Grundlast als auch in der Mittellast gegenüber anderen Kraftwerkstypen deutlich günstiger. Im Referenzfall betragen die Stromgestehungskosten einer GuD-Anlage in der Grundlast 3,1 Ct/kWh. Demgegenüber liegen die Stromgestehungskosten von Steinkohlekraftwerken bei 3,6 Ct/kWh, die von Aufwindkraftwerken bei 3,7 Ct/kWh, die von Atomkraftwerken bei 3,7 Ct/kWh, die von Braunkohlekraftwerken bei 3,9 Ct/kWh.
- Die Stromgestehungskosten von Aufwindkraftwerken liegen mit 3,7 Ct/kWh in der Größenordnung von Atomkraftwerk-EPR (ATK-1; 3,7 Ct/kWh) und Steinkohle (SK-1; 3,6 Ct/kWh).
- Die berechneten spezifischen Investitionskosten großer Aufwindkraftwerke erscheinen mit ca. 3500 €/kW relativ hoch.
- Aufwindkraftwerke haben ein Potenzial zur Reduzierung der Stromgestehungskosten mit wachsender Leistung. Durch Steigerung der Leistungsgröße über 100 MW_{el} hinaus können Aufwindkraftwerke zu wirtschaftlich interessanten Kosten Strom erzeugen. Der entscheidende Schritt in Richtung Kommerzialisierung wäre der Bau und Betrieb einer 100 MW_{el} Anlage.

6.6 Zusammenfassung

Die Untersuchung der Kosten der Aufwindkraftwerke zeigt, dass die spezifischen Investitionskosten mit der steigenden Anlagengröße fallen und mit dem wachsenden Zinssatz zunehmen.

Die Stromgestehungskosten von Aufwindkraftwerken liegen zwischen etwa 8,6 Ct/kWh für die 5 MW_{el}-Anlage und etwa 3,7 Ct/kWh für die 100 MW_{el}-Anlage für einen realen Zinssatz von 8%. Durch Steigerung der Leistungsgröße (z.B. 100 MW) sind für Aufwindkraftwerke Stromgestehungskosten zu erwarten, die verglichen mit anderen Kraftwerkstypen (z.B. Atomkraftwerk mit EPR-Reaktor, Steinkohle mit Staubfeuerung) als günstig zu bewerten sein.

7 Ökologische Analyse

Im folgenden Abschnitt wird mit Hilfe einer Ökobilanz eine ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter ökologischer Auswirkungen durchgeführt. Sie dient zum Erstellen der Material-, Energie- und Emissionsbilanzen sowie resultierender potentieller Umweltwirkungen für das Errichten, den Betrieb und die Entsorgung eines solarthermischen Aufwindkraftwerks. Um einen Vergleich mit anderen Strombereitstellungsoptionen zu ermöglichen, werden diese Bilanzen der mit dem Referenzkraftwerk produzierten Elektrizität gegenübergestellt.

7.1 Grundlagen eine Ökobilanz

Beim strukturellen Aufbau einer Ökobilanz besteht inzwischen ein Konsens zugunsten eines Standardmodells, das nachfolgend dargestellt wird. Das Standardmodell umfasst die folgenden Teilschritte:

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens (Goal and Scope Definition)
2. Sachbilanz (Inventory Analysis)
3. Wirkungsabschätzung (Impact assessment)
4. Auswertung (Interpretation)

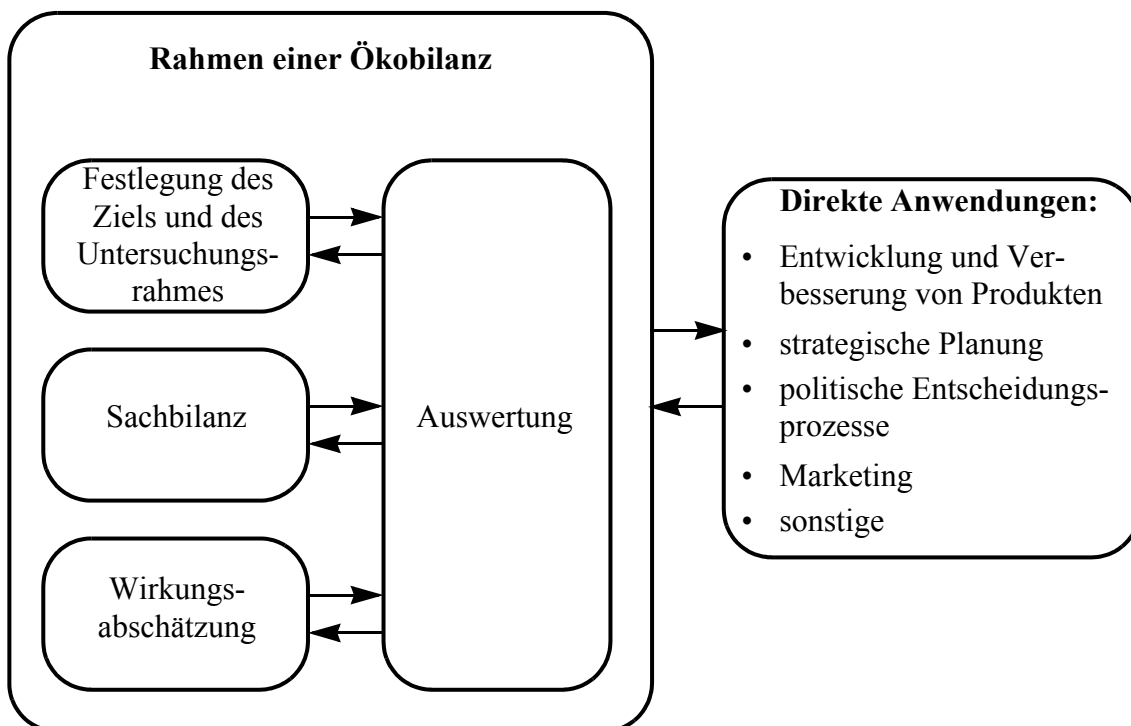


Abb. 7-1: Bestandteile einer Ökobilanz (/ISO14040 1997/)

Im Folgenden werden die Methodischen Grundlagen der einzelnen Komponenten einer Ökobilanz und die praktische Umsetzung im vorliegenden Fall erläutert.

7.1.1 Ziel- und Systemdefinition

Methodische Grundlagen

Im ersten Schritt erfolgt mit der Zieldefinition die Entscheidung für die untersuchte Fragestellung (Erkenntnisinteresse). Der beabsichtigte Anwendungszweck und die angesprochenen Zielgruppen werden aufgeführt. Die Absteckung des Untersuchungsrahmens umfasst die Berücksichtigung einer Vielzahl von Punkten. Zur Vermeidung von Missverständnissen und Widersprüchen erfolgt hier die Festlegung auf geographische und zeitliche Bilanzgrenzen, untersuchte Alternativen und notwendige Annahmen.

Unter Bilanzgrenzen versteht das Umweltbundesamt die Breite der Betrachtung, also die Festlegung des zeit- und raumbezogenen Erfassungsbereichs (/Arbeitsgruppe Ökobilanzen des Umweltbundesamt 1992/). Sowohl die Frage, wo und wann mit dem Betrachtungsobjekt in Verbindung stehende Veränderungen auftreten könnten, als auch die Entscheidung über deren Ein- bzw. Ausgrenzung sind komplexe Aufgaben, deren weitere Betrachtung hier zu weit führen würde.

Auch die Vielzahl der zu treffenden Annahmen und deren Relevanz kann nur angedeutet werden: Festzulegen sind etwa die funktionelle Einheit (hier: 1 kWh elektrische Energie), das Maß für Input- und Outputströme. Ausgesprochen entscheidend wirken sich die Systemgrenzen aus, die laut Umweltbundesamt die Tiefe der Betrachtung festlegen. Um nicht zwangsläufig zu einem „Weltmodell“ zu gelangen, ist hier die Bestimmung von einzubeziehenden Prozessen (vor- und nachgelagerte Produktionsstufen) und Indikatoren (welche umweltbeeinflussenden Größen, also Inputs und Outputs, sollen einfließen?) vorzunehmen.

Umsetzung

Ziel. Solarthermische Aufwindkraftwerke von 5, 30 und 100 MW_{el} werden in der vorliegenden Bilanz verglichen. Als Zeithorizont für Bau und Betrieb des Aufwindkraftwerks wurden dreißig Jahre zugrundegelegt. Der Zeithorizont für die Abschätzung des Treibhauseffekts beträgt 100 Jahre.

Rahmenannahmen und Systemgrenzen. Als geographischer Bilanzraum dienen die mit der Produktlinie und den Emissionen zusammenhängenden geographischen Räume. Die Dienstleistung eines Aufwindkraftwerks umfasst folgende Lebensphasen und Prozesse:

- Bau
- Betrieb
- Entsorgung,

die bei der Bilanzierung in drei entsprechende Abschnitte unterteilt werden. Für alle Abschnitte werden die Aufwendungen für die Produktion der Basismaterialien sowie die Transportaufwendungen berücksichtigt.

7.1.2 Sachbilanz

Die im nächsten Schritt zu erstellende Sachbilanz wird auch als „quantitative Herzstück einer Ökobilanz“ bezeichnet, weil aus ihr die Daten relevanter Input- und Outputflüsse zu entnehmen sind. Betrachtet wird die Prozesskette des zu untersuchenden Produktes über Gewinnung und Herstellung einzelner Rohstoffe, Herstellung des Produkts und Gebrauch bis zur Entsorgung. Die konkrete Dokumentation dieses Lebenswegs ist Voraussetzung für die anschließende Erfassung von qualitativen und quantitativen, spezifischen (auf das Produkt bezogenen) und allgemeinen (aus institutsexternen Quellen übernommenen) Daten. Nach der rechnerischen Aufbereitung gemäß den Annahmen des Untersuchungsrahmens kann das Gesamtsystem als eine Input-/Outputbilanz dargestellt werden.

Methodische Grundlagen

Als allgemeines methodisches Gerüst zur Erstellung einer Stoffstrombilanz sind die ISO-Standards DIN-EN-ISO-14.040 und 14.041 anzusehen, welche allgemeine Rahmenbedingungen einer LCA (Life Cycle Assessment, Ökobilanz; /ISO14040 1997/) und detailliertere Vorgaben für die Erstellung einer Sachbilanz (eines Ökoinventars; /ISO14041 1997/) enthalten. Als Instrumentarium wird in diesen ISO-Standards eine Kombination zwischen einer Prozesskettenanalyse auf Mikro- und Makroebene und einer – eher auf der Makroebene angesiedelten – Input-Output-Analyse angewendet.

Die Prozesskettenanalyse bietet sich als Instrument zur Betrachtung komplexer Produktionssysteme an. Dabei wird ein Produktionsverfahren in sinnvolle Teilprozesse zerlegt, die nacheinander geschaltet sind bzw. ineinander greifen. Wichtig ist, dass der Input in einen Teilprozess des Systems dem Output eines vorgelagerten Prozesses entspricht, damit keine Stoff- und Energieströme auf dem Lebensweg eines Produktionsmittels „verloren“ gehen. Diese Vorgehensweise entspricht den Notwendigkeiten einer Stoffstromanalyse (s. Abb. 7-2, /Hartmann et al. 1996/).

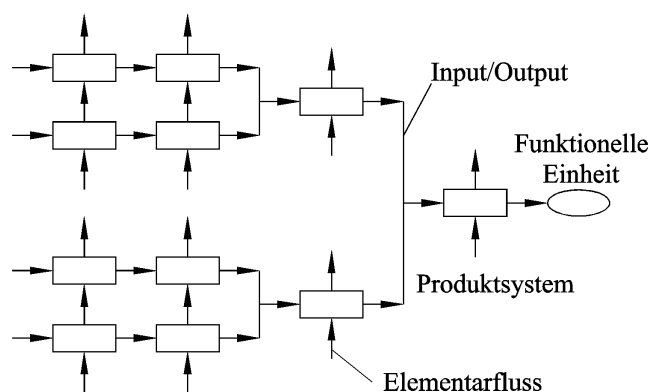


Abb. 7-2: Aufbau einer Prozesskettenanalyse (/Hartmann et al. 1996/)

Maßgeblich für die Auswahl einzelner Betrachtungsoptionen sind letztlich die im Vorfeld einer Stoffstromanalyse festgelegten Zielsetzungen und die damit verbundenen Beschreibungen der Rahmenbedingungen der Bilanzierung.

Umsetzung

Mit dem gesamten Herstellungsprozess, dem Bau, dem Betrieb und dem Abriss der Anlage ist eine Vielzahl von Stoffströmen verbunden. Neben den eingesetzten energetischen und mineralischen Ressourcen sind die Stoffströme bei deren Herstellung sowie Transporte, Emissionen in fester, flüssiger und gasförmiger Form und Abfälle, die entlang des Lebensweges des Aufwindkraftwerks auftreten zu betrachten und in ihren Mengen zu erfassen.

Als mineralische Ressourcen werden Bauxit, Kupfererz, Eisenerz und Kalkstein erhoben. Es werden die folgenden beim Bau und Betrieb solarthermischer Anlagen relevanten Stoffe ausgewiesen: stahlbewehrter Beton, Glas, Edelstahl, Stahl, Gusseisen, Elektroblech, Aluminium, Kupfer, Zink, Keramik, Lack und Kunststoffe. Anteile an recyceltem Material (z. B. bei Aluminium und Stahl) werden ebenfalls berücksichtigt. Von den freigesetzten luftgetragenen Emissionen werden

- Kohlenstoffdioxid (CO₂),
- Distickstoffoxid (N₂O),
- Methan (CH₄),
- Schwefeldioxid (SO₂),
- Stickstoffoxide (NO_x),
- Ammoniak (NH₃) und
- Chlorwasserstoff (HCl) bilanziert.

7.1.3 Wirkungsabschätzung

Methodische Grundlagen

Die Ergebnisse der Sachbilanz bilden die Grundlage der Wirkungsabschätzung, mit der die Bedeutung der Sachbilanz-Ergebnisse hinsichtlich möglicher Umweltwirkungen beurteilt wird. In der Norm /ISO14042 1998/ werden die Phasen der Wirkungsabschätzung in optionale und obligatorische Elemente untergliedert. Diese sind in der folgenden Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Obligatorische und optionale Elemente einer Wirkungsabschätzung

Obligatorische Elemente	Optionale Elemente
Auswahl der Wirkungskategorien	Normalisierung
Klassifizierung	Gruppierung
Charakterisierung	Gewichtung
	Analyse der Datenqualität

Mit der Auswahl der Wirkungskategorien beginnt die Wirkungsabschätzung. Dabei ori-

entiert sich die Auswahl an der Zieldefinition bzw. der Festlegung des Untersuchungsrahmens. Der zweite Schritt innerhalb der Wirkungsabschätzung ist die Klassifizierung. Hier werden die einzelnen Sachbilanzdaten entsprechend ihrer Wirkung den einzelnen Kategorien zugeordnet. Beim Beitrag eines Stoffes zu mehreren Kategorien ist dieser bei allen zu berücksichtigen. Im Rahmen der Charakterisierung wird jedem Stoff innerhalb der betrachteten Kategorie ein Potenzial zugeordnet und dieses der Wirkungskategorie angerechnet. Die potenzielle Wirkung eines Stoffes wird in Bezug zu einer maßgebenden Größe in der betrachteten Kategorie angegeben.

Im optionalen Schritt der Normalisierung wird der Beitrag einer Wirkungskategorie in Bezug zum Gesamtbeitrag einer Bezugseinheit (z.B. Land oder Kontinent) gesetzt. Auf diese Weise lässt sich die Relevanz der Beiträge einzelner Produktsysteme zu einer Wirkungskategorie darstellen. Es lässt sich daraus ableiten, zu welchem Umweltproblem das betrachtete Produktsystem relativ am meisten beiträgt. Man erhält jedoch keine Aussage darüber, welche Wirkungskategorie aus ökologischer Sicht wichtiger ist als eine andere. Innerhalb der Gruppierung ist es möglich, Wirkungskategorien in Gruppen (z.B. in lokale, regionale oder globale Wirkungskategorien) zu fassen oder entsprechend einer subjektiven Wertung eine Rangfolge festzulegen. Der Schritt der Gruppierung ist nicht als Aggregation zu verstehen. Ein weiterer optionaler Schritt ist die Gewichtung. Eine Gewichtung zielt auf die Aggregation von Wirkungskategorien ab, da mit der Entscheidung für oder gegen eine Maßnahme eine Gewichtung und somit eine Aggregation vom Entscheidungsträger durchgeführt werden muss. Die Methodik hierzu befindet sich bislang noch in der Phase der Entwicklung und ist somit bislang rein theoretischer Natur. Zulässig ist eine Aggregation nur in besonderen Fällen im Rahmen der Bewertung unter der Voraussetzung, dass die Transparenz und die Aussagekraft der Ergebnisse erhalten bleiben. Es ist weiterhin anzumerken, dass eine Vollaggregation zu einem Umweltindikator für vergleichende Studien nach /ISO14040 1997/ nicht zulässig ist. Ein ebenfalls optionaler Schritt ist die Analyse der Datenqualität. Dabei steht insbesondere die Überprüfung der Vollständigkeit und der Plausibilität im Vordergrund. Durch diesen Schritt soll die Aussagekraft der Bilanz unterstützt werden.

Auswahl der Wirkungskategorien

Die Norm /ISO14042 1998/ legt sich nicht auf bestimmte Wirkungskategorien fest. In /Kreißig et al. 1990/ werden die in Tabelle 7-2 dargestellten Wirkungskategorien aufgeführt.

Nach /Eyerer und Reinhardt 2000/ sind für die praktische Durchführung von Ökobilanzen folgende momentan im Wesentlichen international anerkannten Wirkungskategorien als sinnvoll zu erachten:

- Ressourcenverbrauch, Verbrauch erschöpflicher energetischer und mineralischer Ressourcen.
- Treibhauspotential, **Global Warming Potential (GWP)** in kg CO₂-Äquivalent
- Versauerungspotential, **Acidification Potential (AP)** in kg SO₂-Äquivalent.

Tabelle 7-2: Wirkungskategorien zur Abschätzung der Umweltwirkung

Wirkungskategorie/ Aggregationsgröße aus Sachbilanz	Kurzbeschreibung	Beispiele
Ressourcenverbrauch	Verbrauch bzw. Aufwand von Rohstoffen	Erdölförderung, Erzgewinnung
Treibhauspotenzial	Emissionen in Luft, die den Wärmehaushalt der Atmosphäre beeinflussen	CO ₂ , CH ₄
Ozonabbaupotenzial	Emissionen in Luft, welche die troposphärische Ozonschicht abbauen	FCKW
Versauerungspotenzial	Emissionen in Luft, die eine Regenwasserversauerung verursachen	NO _x , SO ₂ , HCl, HF
Eutrophierungspotenzial	Überdüngung von Gewässern und Böden	P- und N-Verbindungen
Photooxidantienbildungspotenzial	Emissionen in Luft, die als Ozonbildner in Bodennähe fungieren	Kohlenwasserstoffe
Freisetzung potenziell gesundheitsgefährdender Stoffe	Emissionen in Boden, Luft und Wasser mit gesundheits- oder erbgutschädigender Wirkung	Schwermetalle, Dioxine
Potenzielle Schädigung von Ökosystemen	Emissionen in Boden, Luft und Wasser, die Lebensgemeinschaften von Flora und Fauna störend beeinflussen	Schwermetalle, Säuren
Naturrauminanspruchnahme	Dauer und Art der Veränderung von Naturraum durch den Menschen	Abbauflächen, Werksflächen

Beschreibung der Wirkungskategorien

Ressourcenverbrauch. Nach /Eyerer und Reinhardt 2000/ lässt sich der Ressourcenverbrauch nur schwer in Wirkungskategorien fassen. Es wird daher eine Dokumentation der maßgebenden Ressourceninanspruchnahme auf Sachbilanzebene als sinnvoll erachtet, wobei zwischen energetisch und stofflich genutzten Ressourcen zu unterscheiden ist.

Für die energetisch genutzten Ressourcen wird die im Folgenden dargestellte Unterteilung vorgeschlagen:

- Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Quellen. Diese Größe enthält aggregiert die Energieäquivalenzwerte der Ressourcen Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran.
- Primärenergiebedarf aus nachwachsenden Rohstoffen. Die Ressource Holz dominiert diese Kategorie, in die auch Flachs, Hanf u.ä. fallen. Der Wert beschreibt den Heizwert der nachwachsenden Ressource nach der Ernte.
- Primärenergiebedarf aus Wasserkraft. Die Primärenergie aus Wasserkraft setzt sich ausschließlich aus der nötigen potenziellen Energie des Wassers zusammen.

Für die mineralisch genutzten Ressourcen wird der Verbrauch an Bauxit, Kupfererz, Eisenerz und Kalkstein ausgewertet. Als energetischer Ressourcenverbrauch wird der Verbrauch

an Rohsteinkohle, Rohbraunkohle, Rohöl, Erdgas, Holz, Wasser und Uranerz dargestellt. Bei der aggregierten Darstellung wird Uran mit einem „Heizwert“ von 0,46 TJ/kg bewertet /Ökoinventare 1996/.

Treibhauseffekt. Der Treibhauseffekt sorgt für die Sicherung einer für die meisten Ökosysteme überlebensnotwendigen Temperatur der Erde in Bodennähe durch das Vorhandensein bestimmter Spurengase. So lassen Substanzen wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Wolken einen Teil der kurzwelligen Sonnenstrahlung passieren, absorbieren aber die langwellige terrestrische Ausstrahlung und strahlen einen Teil davon wieder auf die Erdoberfläche zurück. Der Einfluss wird verstärkt durch eine relativ lange molekulare Verweilzeit der Gase in der Atmosphäre, die eine globale Verteilung und Wirkung ermöglicht.

Dieser notwendige natürliche Treibhauseffekt bewirkt eine bodennahe Weltmitteltemperatur von +15° C (gegenüber -18° C ohne diesen Effekt). Hinzu kommt jedoch die durch anthropogene Emissionen verursachte Konzentrationserhöhung der allgemein anerkannten Treibhausgase CO₂, Methan und Distickstoffmonoxid (Lachgas) und die einhergehende weltweite Erhöhung der bodennahen Temperatur. Das quantitativ bedeutendste Treibhausgas CO₂ etwa wird vor allem bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt. Aber auch bei der Verfeuerung von Holz und anderer Biomasse und der Verarbeitung von Pflanzen entsteht CO₂.

Methan (CH₄) als weiteres klimawirksames Gas stammt i. d. R. aus natürlichen Quellen wie Sümpfen, Marschen und Reisfeldern bzw. wird von Termiten und Wiederkäuern an die Umgebungsluft abgegeben.

Distickstoffmonoxid (N₂O) wird bei Verbrennung fossiler Energieträger, bei Ausbringung von stickstoffhaltigem Kunstdünger und durch Brandrodung freigesetzt. Die Klimawirksamkeit der Spurengase hängt sowohl von ihrer atmosphärischen Konzentration als auch von ihrem unterschiedlichen spezifischen Wirkungspotenzial ab, das durch das unterschiedliche Absorptionsvermögen der Treibhausgase für Wärmestrahlung bestimmt wird.

Generelle Probleme bei der Wirkungsbetrachtung verschiedener klimarelevanter Gase entstehen etwa durch unterschiedliche molekulare Verweilzeiten in der Atmosphäre und durch noch unzureichende Forschungsergebnisse bezüglich zusätzlich zum Treibhauseffekt beitragender Emissionen.

Die Ermittlung der sogenannten Äquivalenzziffer erfolgt über die Tabelle 7-3.

Tabelle 7-3: Relative Treibhauspotenziale (GWP-Werte) der betrachteten klimawirksamen Gase, bezogen auf ihre Masse und einen Zeithorizont von 100 Jahren (vgl./Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/, /Houghton et al. 1996/)

	Chemische Formel	GWP - Faktor
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	1
Distickstofffoxid	N ₂ O	310
Methan	CH ₄	21

Versauerung. Die Versauerung tritt ein durch Einsatz von sauren Düngemitteln und – der hier betrachtete Aspekt – durch saure Niederschläge in Böden und Gewässer, die infolge von Luftverschmutzung mit Schwefeldioxid und Stickoxiden beladen sind. Im Zusammenwirken mit

Wasser aus Regen oder Nebel bilden diese Schadstoffe Säuren. So sind Schwefeldioxid bzw. Stickoxide unter anderem verantwortlich für die Entstehung von Schwefelsäure bzw. Salpetersäure, die ihrerseits die schützende Wachsschicht der Baumblätter und -nadeln beschädigen. Besonders bei der Schneeschmelze kommt es zu einer schlagartigen Freisetzung von Säuren, die sich im Schnee angereichert hatten und damit zu einer Belastung für die Gewässer. Untersuchungen haben ergeben, dass Fische in sauren Gewässern Schädigungen an Kiemen und Haut aufweisen.

Zu den Folgen der Bodenversauerung gehört aber vor allem die Freisetzung und anschließende Auswaschung basisch wirkender Pflanzennährstoffe (vor allem Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium), die durch saure Elemente wie Wasserstoff- und Aluminiumionen ersetzt werden, wenn die Säuren nicht mehr ausreichend neutralisiert werden können. Der Nährstoffmangel macht sich in einer Schädigung des feinen Wurzelsystems und einer Vergilbung der Nadeln und Blätter bemerkbar. Die Anfälligkeit für Schädlings- und Krankheitsbefall und klimatische Extremsituationen wie Trockenperioden, Hitze, Früh- und Spätfröste, starke Temperaturschwankungen oder Stürme steigt. Ein zusätzliches Problem entsteht dadurch, dass der übersättigte Boden den überschüssigen Stickstoff in Form von Distickstoffmonoxid wieder an die Atmosphäre abgibt und somit der Treibhauseffekt begünstigt wird.

Die Versauerung kann sowohl durch die im System Boden selbst erzeugte Produktion von Protonen als auch durch den Eintrag von in Emissionen enthaltenen Säuren entstehen. Eine Möglichkeit, den Beitrag verschiedener Stoffe zur Wirkungskategorie Versauerung zu bemessen, ist die Berechnung ihres Versauerungspotenzials auf Basis des gewichtsbezogenen Protonenbildungspotenzials, d. h., ihrer Fähigkeit, Protonen abzuspalten.

Das Versauerungspotenzial wird durch die Tabelle 7-4 beschrieben.

Tabelle 7-4: SO₂-Äquivalente zur Bestimmung des Versauerungspotenzials, bezogen auf die Masse der jeweiligen Emissionen (vgl. /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/, /Houghton et al. 1996/)

	Chemische Formel	GWP - Faktor
Schwefeldioxid	SO ₂	1
Stickstoffmonoxid	NO	1,07
Stickstoffoxide	NO _x	0,7
Ammoniak	NO ₃	1,88
Chlorwasserstoff	HCl	0,88

7.1.4 Auswertung

Methodische Grundlage

Diese letzte Phase der Ökobilanz dient der Analyse und transparenten Darstellung der Ergebnisse. Daraus können Schlussfolgerungen abgeleitet und Empfehlungen ausgesprochen werden. In der Norm /ISO14043 1998/ wird die Phase der Auswertung bzw. Interpretation in drei Abschnitte untergliedert, nämlich:

- Ermittlung der Kernaussagen,
- Bewertung,
- Ergebnisdarstellung.

Umsetzung

Zur Ermittlung der Kernaussagen gilt es, die jeweiligen Hauptbeiträge innerhalb der einzelnen Wirkungskategorien zu identifizieren. Ziel ist es, zu ermitteln, welche Prozesse sowie welche Stoff- oder Energieströme die jeweilige Wirkungskategorie nachhaltig beeinflussen. Dabei sind auch Sachbilanzdaten, die über die Wirkungsanalyse nicht erfasst wurden und deren Bedeutung die Aussagen maßgeblich beeinflussen könnte, mit zu erfassen. Je nach Zieldefinition kann sich diese Analyse auf einzelne Prozessschritte, einzelne Lebensphasen oder den gesamten Lebenszyklus beziehen. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich Kernaussagen formulieren.

7.2 Sachbilanz

In diesem Abschnitt werden die Sachbilanzen für den Kollektor, den Kamin und die Turbine dargestellt, die in folgende Bilanzen unterteilt sind:

- Bilanzen der vorgelagerten Prozesse (Tabelle 7-5)
- Bilanzen für den Bau, Betrieb und Entsorgung

Tabelle 7-5: Vorgelagerte Prozesse, aus denen die Aufwindkraftwerke gefertigt sind.

Stahl	Unter Stahl wird ein Baustahl mit der Werkstoffnummer 1.0570 aus DIN 17100 angenommen. Stahl wird zu größten Teil für den Kollektor und den Kamin verwendet.
Kupfer	Kupfer wird bei Aufwindkraftwerken meist in der Verkabelung, innerhalb des Schaltschranks und im Generator eingesetzt.
Zink	Die Oberfläche der Stahlkonstruktionen sind zum Schutz vor Korrosion mit einer Zinkschicht überzogen.
Kunststoff	Kunststoffe sind künstliche organische Werkstoffe, für deren Herstellung petrochemische Prozesse auf der Basis von Erdgas und Erdöl eingesetzt werden. Verwendung finden Kunststoffe bei Aufwindkraftwerken in der Ummantelung von Kabeln, in oder an elektronische Bauteilen und beim Bau der Turbine.
Beton	Beton wird bei Aufwindkraftwerken im Kamin und im Fundament des Kollektors und der Turbine eingesetzt.
Glas	Im Kollektor wird Glas als transparente Abdeckung verwendet, die an einem Metallrahmen befestigt ist.

7.2.1 Kollektor

Die Bilanzierung des Kollektors umfasst alle Aufwendungen, um einen kompletten Kollektor betriebsfertig am Aufstellungsort zu errichten, 30 Jahre zu betreiben und anschließend zu entsorgen, sowie die anzurechnenden Transporte. Wie in Abschnitt 3.2.2 erwähnt wurde, besteht der Kollektor grundsätzlich aus den Betonfundamenten, dem Tragwerk der Abdeckung und dem Glasdach. Dabei lässt sich die Bilanz „Bau“ in die Module (in der üblichen Montagereihenfolge) Transport, Bau des Kollektors (Fundament, Tragwerk und Glasdach) und Betrieb unterteilen.

Bau

Nach einer Kombination von den spezifischen Mengen von Materialien (Tabelle 4-1) und den Kollektorgößen der Referenzsysteme mit 5, 30 und 100 MW (Tabelle 4-2) erhält man die gesamten Aufwendungen für den Bau eines Kollektors (Tabelle 7-6). Zur Umrechnung von der Beton-, Stahl- und Glasmasse in die entsprechenden Volumina wurde eine Dichte von 2100 kg/m³, 8000 kg/m³ bzw. 2500 kg/m³ angenommen.

Tabelle 7-6: Aufwendungen für den Bau des Kollektors

Referenzsysteme	[MWe]	5	30	100
Kollektordurchmesser	[m]	1600	3130	4950
Stahl	[t]	10380	39730	99370
Glas	[t]	26940	103100	257900
Beton	[t]	150	575	1440

Transport

Transporte können in Abhängigkeit vom Transportmittel und der Transportentfernung einen mehr oder weniger signifikanten Einfluss auf das Ergebnis einer Ökobilanz haben. Bei der Bereitstellung und Nutzung verbundener Transportaufwendungen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Für den Transport mit Lkw innerhalb des Aufstellungslandes wurde eine mittlere Entfernung von 50 km betrachtet.
- Da die für den Bau von Aufwindkraftwerken erforderlichen Materialien Beton, Glas und Stahl überall in ausreichenden Mengen vorhanden sind, werden Transporte außerhalb des Landes für importierte Kollektorkomponenten nicht berücksichtigt.
- Die Entfernungen zur nächsten Großstadt, in der eventuell Aufwindkraftwerksteile gefertigt werden können und zum nächsten Großhandelshafen, von dem gegebenenfalls importierte Teile transportiert werden müssen, werden auf 200 km festgelegt.
- Die zugrunde gelegte Transportentfernung von Baumaterialien wie z.B. Beton und Baustahl beträgt 50 km.

Die Transportentfernungen für Baumaterial sind in Tabelle 7-7 zusammengefasst.

Tabelle 7-7: Transportentfernungen für Baumaterial

	Entfernung [km]
Aufstellungsort - Großstadt	200
Aufstellungsort - Gewinnung/Lager Baumaterialien	50

Der Transport aller zum Bau des Aufwindkraftwerks benötigten Materialien ist in Tabelle 7-8 gruppiert.

Tabelle 7-8: Dem Bau des Aufwindkraftwerks zuzurechnende Transportprozesse

Referenzsysteme [MWe]	Einheit	5	30	100
40 t VL ^a	t·km	6352096	34925716	70859635

a.VL bedeutet Volllastfahrt hin und Leerfahrt zurück.

Ein Hydraulikbagger (HTB1) mit einer Leistung von 50 bis 100 kW wird angenommen (vgl. Tabelle 7-9), um die für die Montage des Kollektors vorgenommene Laufzeit der Baumaschine zu betrachten. Das Volumen des Aushubs für das Fundament des Kamins entspricht näherungsweise dem Volumen der Betonmasse (Tabelle 7-10).

Tabelle 7-9: Kenngrößen der berücksichtigten Baumaschinen (/BUWAL 1994/).

Typ	Kurzbeschreibung	Masse [t]	Leistung [kW]
Hydraulikbagger	HTB1	10 bis 23	50 bis 100
Mobil-Autokran 1	MK1	< 25	50 bis 100
Mobil-Autokran 2	MK2	25 bis 50	100 bis 200
Mobil-Autokran 3	MK3	> 50	> 200

Tabelle 7-10: Dem Bau des Kamins zuzurechnende Erdaushube

Referenzsysteme [MWe]	Einheit	5	30	100
Erdaushub	m ³	4100	24600	82000

Betrieb

Grundsätzlich erfordert der Betrieb eines Kollektors keine intensive Wartung. Bei auftretenden Schäden im Glasdach können die Reparaturen ohne Anlagenabschaltung durchgeführt werden. Nach /Schlaich 1995/ haben die Erfahrungen in Manzanares gezeigt, dass dieser Kollektor gegen Verstaubung recht unempfindlich ist und die seltenen Regengüsse in Wüsten für eine ausreichende Selbstreinigung genügen. In der Experimentalanlage von Manzanares hat man ein

starkes Pflanzenwachstum erlebt. Die Behandlung dieses Problems durch Einsatz von Herbiziden war jedoch erfolglos. Eine Lösung des Problems, die in dieser Arbeit nicht betrachtet wird, wurde erste durch permanentes Abweiden durch je eine Ziegen- und Scharfherde gefunden. In Tabelle 6-4 sind die Betriebskosten des gesamten Systems zusammengestellt.

7.2.2 Kamin

In diesem Abschnitt wird die Sachbilanz durchgeführt, um den gesamten Kamin betriebsfertig am Aufstellungsort zu errichten, zu betreiben und anschließend zu entsorgen, sowie die anzurechnenden Transporte. Obwohl die Lebensdauer eines Stahlbetonturmes in trockenem Klima mindestens 100 Jahre betragen kann (/Schlaich 1995/), wird für die Bilanzierung des Kamins hier von 30 Jahre ausgegangen.

Bau

Die meistangewendete Bauweise bei Kaminen ist die Betonweise. Dabei besteht die Kaminröhre aus einer dünnen Betonzylinderschale. Diese Röhre steht am Fuß auf Einzelwandscheiben, die radial angeordnet sind und wenig Widerstand für die Lufteinströmung bieten. Gegründet werden diese Einzelwandscheiben auf Flachfundamenten, die mit Fundamentbalken zu einem Ring zusammengefasst werden. In Tabelle 7-11 sind die Aufwendungen für den Bau eines solchen Kamins zusammengefasst.

Tabelle 7-11: Aufwendungen für den Bau des Kamins (/Büro Schlaich Bergermann und Partner 2002/)

Referenzsysteme	[MWe]	5	30	100
Kaminhöhe	[m]	370	600	850
Kamindurchmesser	[m]	46	75	110
Stahl	[t]	84	1780	3840
Beton	[t]	26740	70690	146900
Diesel	[t]	32	347	1245

Betrieb

Die Aufwendungen für den Betrieb des Kamins eines Aufwindkraftwerks werden vernachlässigt.

7.2.3 Turbine und sonstige Komponenten

Bau

Gewöhnlich werden für Rotorblätter gekreuzte Schichten von Glasfasermatten verwendet, die mit Kunststoffen wie Polyester imprägniert sind (GFK = Glasfaserverstärkter Kunststoff). Nach dem Imprägnieren der Glasfasern durch Polyester wird dieser gehärtet. Anstelle von Polyester kann auch Epoxy verwendet werden. Alternativ dazu kann die grundlegende Struktur

auch teilweise oder ganz aus Kohlefaser gefertigt werden. Kohlefaser ist ein leichteres, jedoch kostspieligeres Material mit höherer Festigkeit. Für große Rotorblätter werden auch Holz-Epoxy-Lamine eingesetzt.

Der Generator eines Aufwindkraftwerks verwandelt mechanische Energie in elektrische Energie. Generatoren für Windkraftanlagen sind im Vergleich zu herkömmlichen Kraftwerksgeneratoren im Netzverbund etwas ungewöhnlich. Ein Grund dafür ist, dass der Generator an eine Leistungsquelle (den Rotor) mit stark schwankender mechanischer Leistung (Drehmoment) angeschlossen ist. Dieses Problem wird bei der Turbine eines Aufwindkraftwerks vermindert, weil sie sehr gleichmäßig beaufschlagt wird und nur geringe Druckwechsel zu bewältigen hat.

In großen Generatoren wird ein 3-Phasen-Wechselstrom mit normalerweise 114 V Spannung erzeugt. Diese Spannung wird anschließend mit Hilfe eines Transformators, der sich in der Nähe der Turbine befindet, auf 10 000 bis 30 000 Volt hochtransformiert, in Abhängigkeit der lokalen Netzspannung.

Generatoren müssen während ihrer Arbeit gekühlt werden. Das geschieht bei den meisten Anlagen dadurch, dass man sie kapselt und einen großen Lüfter für die Luftkühlung einsetzt. Wassergekühlte Generatoren können auch verwendet werden.

Tabelle 7-12: Aufwendungen für den Bau und Montage der Turbine

Referenzsysteme	[MWe]	5	30	100
Stahl	[t]	78	470	1560
Beton	[t]	3150	18900	63000
Kunststoff	[t]	0,8	4,8	16

Betrieb

Die Erfahrung bei Windkraftanlagen (die für eine Lebensdauer von 120000 Betriebsstunden in 20 Jahren ausgelegt sind) zeigt, dass die Betriebskosten normalerweise sehr niedrig sind. Hier werden für das Aufwindkraftwerk die gleichen Aufwendungen wie für Windkraftanlagen ausgewiesen, die durch den Betrieb entstehen.

7.2.4 Entsorgung des Aufwindkraftwerks

Mit dem Erreichen des Nutzungsendes entstehen beim Abbruch eines Aufwindkraftwerks Kosten durch den eigentlichen Abbruch, den Transport, die Entsorgung und die Verwertung. Die wesentlichen Kostenfaktoren sind dabei zum einen Personal- und Gerätekosten, zum anderen Entsorgungskosten, die sich aus Transport- und Annahmekosten zusammensetzen. Bei den Annahmekosten ist zwischen Beseitigungs- und Verwertungskosten zu unterscheiden, da für eine Verwertung sowohl positive als auch negative Kosten zu verrechnen sind. In Abhängigkeit von der projektierten Detailtiefe spielen beim kontrollierten Rückbau auch Planungskosten eine Rolle. Nach /Marek 1997/ sind die folgenden Einflussfaktoren für die Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Abbruchmaßnahmen von Bedeutung: Planungsaufwand, Nachnutzung, Zeitbedarf, Personalbedarf, bauliche Situation, Materialmengen und -qualitäten, Entsorgungspreise, Geräteeinsatz, Ausbautechnik und logistische Randbedingungen.

Eine Grundanforderung für eine hochwertige Verwertung von mineralischen Baustoffen ist die Sortenreinheit. Um diesem Anspruch zu genügen, kann auf einen kontrollierten Rückbau in der Regel nicht verzichtet werden. Demzufolge sind für eine Bewertung von Recyclingmaßnahmen unter Kostenaspekten insbesondere die Unterschiede zwischen konventionellem Abbruch und kontrolliertem Rückbau von Interesse.

In dieser Bilanzierung wird die Entsorgung des Aufwindkraftwerks auf die Abrissarbeiten und den Transport der einzelnen Komponenten zur nächstgelegenen Deponie bzw. Recyclingstelle basiert. Grundsätzlich umfassen die Abrissarbeiten die gleichen Arbeiten wie beim Aufbau des Aufwindkraftwerks.

Der Kamin lässt sich durch Implosion niederreißen. Die Komponenten des Kollektors (Glas/Stahl) und der Turbine/Generator (Aluminium, Kupfer, Stahl, usw.) können mit der Verwendung von Handarbeit und mobilen Autokränen (MK3 und MK1) demontiert und zur nächsten Recyclingstelle transportiert werden. Die Transportentfernung wurde mit 200 km angenommen und die Betriebsstunden der Autokräne entsprechen denen des Aufbaus.

7.3 Wirkungsabschätzung

Um das ökologische Profil des Aufwindkraftwerks einordnen zu können, bietet sich eine Wirkungsabschätzung an, in welcher der Verbrauch energetischer und mineralischer Ressourcen sowie der anthropogene Treibhauseffekt und die Versauerung ausgewiesen werden.

7.3.1 Verbrauch erschöpflicher energetischer Ressourcen

Der mit dem Bau eines Aufwindkraftwerks verbundene Verbrauch energetischer Ressourcen ist in Tabelle 7-13 aggregiert dargestellt. Bei dem Bau, dem Betrieb und der Entsorgung eines Aufwindkraftwerks ist der Kollektor durch den höchsten Verbrauch an energetischen Rohstoffen gekennzeichnet (Abb. 7-3). Obwohl die größeren Anlagen größere Aufwendungen haben, hat der spezifische Verbrauch keine große Variation gezeigt.

Tabelle 7-13: Verbrauch erschöpflicher energetischer Ressourcen für Bau, Betrieb und Entsorgung eines Aufwindkraftwerks

Referenzsysteme	[MWe]	5	30	100
Kollektor	MJ/Stk	$6,67 \times 10^8$	$2,55 \times 10^9$	$6,39 \times 10^9$
Kamin	MJ/Stk	$4,54 \times 10^7$	$2,08 \times 10^8$	$5,39 \times 10^8$
Turbine	MJ/Stk	$2,42 \times 10^7$	$1,45 \times 10^8$	$4,83 \times 10^8$
Betrieb und sonstiges	MJ/Stk	$2,96 \times 10^7$	$1,05 \times 10^8$	$2,00 \times 10^8$
Summe	MJ/Stk	$7,66 \times 10^8$	$3,01 \times 10^9$	$7,61 \times 10^9$
Summe, flächenspezifisch	MJ/m ²	381	391	395

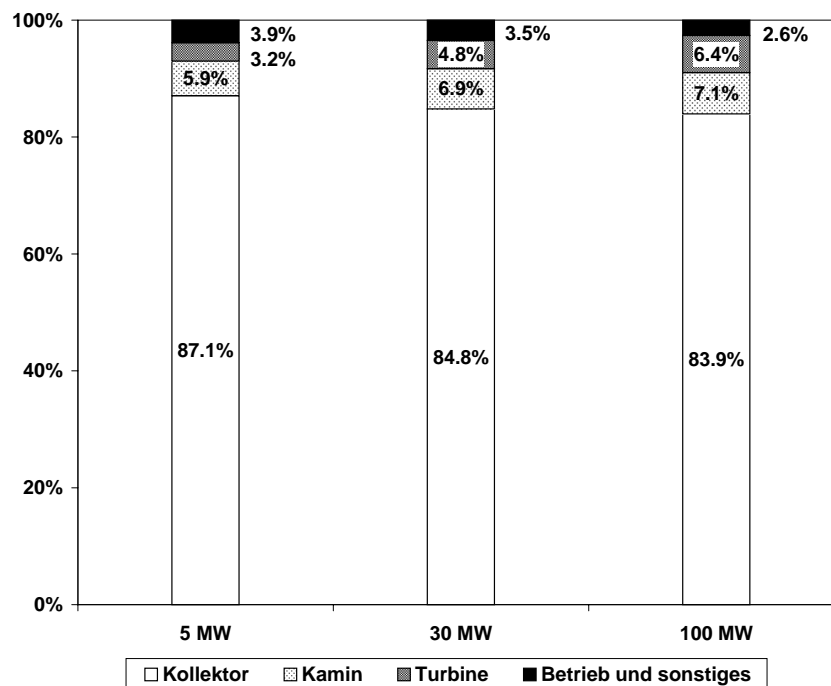


Abb. 7-3: Verteilung des Verbrauchs der erschöpflichen energetischen Ressourcen zur Bereitstellung eines Aufwindkraftwerks.

7.3.2 Bindung mineralischer Ressourcen

In diesem Abschnitt wird die berechnete Entnahme mineralischer Rohstoffe aus der Erde dargestellt. Indirekte Aufwendungen werden neben den direkten Materialaufwendungen für Bau, Betrieb und Entsorgung des Aufwindkraftwerks berücksichtigt.

In Tabelle 7-14 ist der auf die bereitgestellte elektrische Energie bezogene Verbrauch mineralischer Ressourcen für die Bereitstellung der betrachteten Aufwindkraftanlage dargestellt. Die größten Bindungen wurden für Eisen und Kalkstein ermittelt, die Werte liegen zwischen rund 17000 bis 40000 mg/kWh Kalkstein bzw. rund 21000 bis 53000 mg/kWh Eisen; dabei ergeben sich die niedrigeren Werte für die größeren Anlagen (Abb. 7-4). Eine deutlich niedrigere Ressourcenbindung ergibt sich für Bauxit, Kupfer und Zink.

Tabelle 7-14: Bindung mineralischer Ressourcen für die Bereitstellung der betrachteten Aufwindkraftwerke.

Referenzsysteme	[MWe]	5	30	100
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	896	572	380
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	6	4	3
Entnahme an Eisen	mg/kWh	40168	25594	17040
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	53305	31284	20636
Entnahme an Zink	mg/kWh	0,081	0,061	0,036

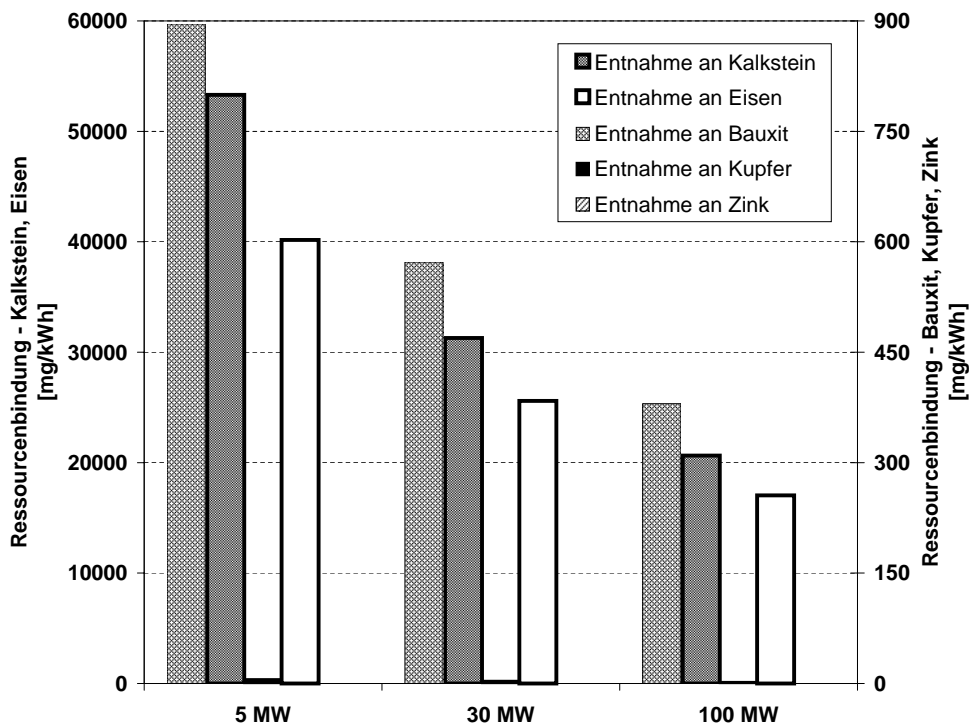


Abb. 7-4: Aufwand mineralischer Ressourcen für die Bereitstellung eines Aufwindkraftwerks

7.3.3 Anthropogener Treibhauseffekt

Im Folgenden werden die dem Bau, dem Betrieb und der Entsorgung des Aufwindkraftwerks zuzurechnenden Emissionen klimawirksamer Gase dargestellt.

In Tabelle 7-15 ist der dem Transport, Bau, Betrieb und der Entsorgung der bilanzierten Aufwindkraftwerke zuzurechnende anthropogene Treibhauseffekt in CO₂-Äquivalente dargestellt. Die Werte für die zu betrachtende Anlage liegen zwischen rund 62 t (5 MW) und 620 t (100 MW). Man kann erkennen, dass die dem Bau anzurechnenden Treibhausemissionen von dem Kollektor dominiert werden (Abb. 7-5). Die Werte der spezifischen (d.h. die auf die bereitgestellte Kilowattstunde bezogene Werte) CO₂-Äquivalente Emissionen nehmen ab, wenn die Anlageleistung zunimmt.

Tabelle 7-15: Treibhauspotenzial für den Bau, Betrieb und Entsorgung eines Aufwindkraftwerks

Referenzsysteme	[MWe]	5	30	100
Kollektor	t CO ₂ -Äq	51	195	488
Kamin	t CO ₂ -Äq	5,8	22,5	57,5
Turbine	t CO ₂ -Äq	2,8	16,8	56
Betrieb und sonstiges	t CO ₂ -Äq	2,41	7,86	14,6
Summe	t CO ₂ -Äq	62,01	242,16	616,1
spezifische	g/kWh	172	108	73

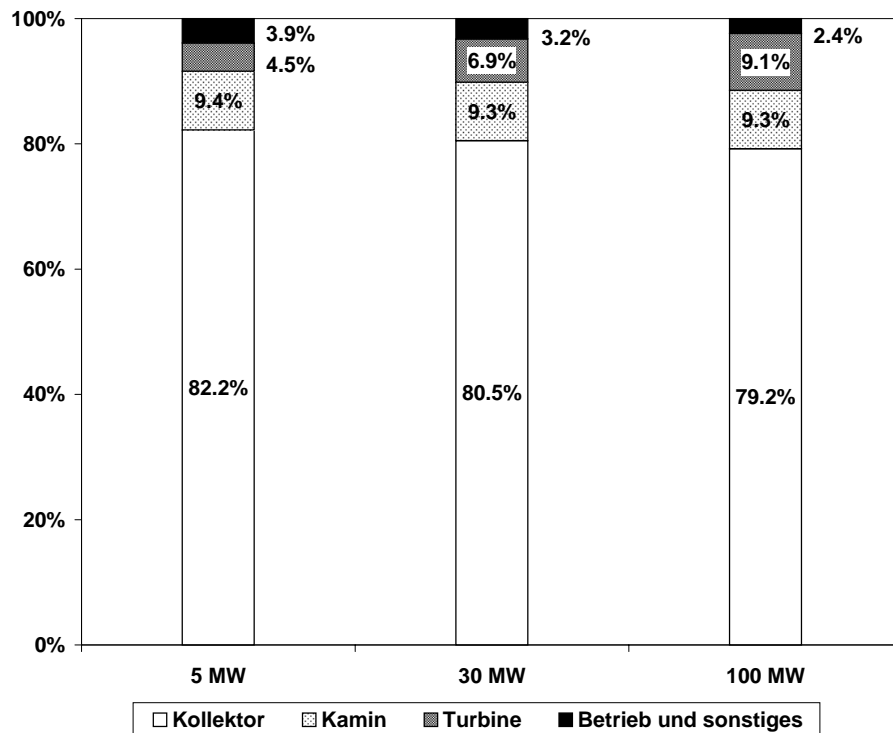


Abb. 7-5: Verteilung der CO₂-Äquivalente zur Bereitstellung eines Aufwindkraftwerks

7.3.4 Versauerungspotenzial

Hier werden die Emissionen der luftgetragenen Schadstoffe Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid, Stickstoffoxide, Chlorwasserstoff und Ammoniak unter Berücksichtigung der jeweiligen Säurebildungspotenziale (vgl. Tabelle 7-4) zu SO₂-Äquivalenten zusammengefasst.

In Tabelle 7-16 ist das Versauerungspotenzial in SO₂-Äquivalenten für Bau, Betrieb und Entsorgung der untersuchten Aufwindkraftwerke dargestellt. Demnach werden zwischen rund 200 t (5 MW) und 2000 t (100 MW) SO₂-Äquivalenten emittiert. Rund zwei Drittel der Emissionen sind dem Bau des Kollektors zurechnen.

Tabelle 7-16: Versauerungspotenzial für den Bau, Betrieb und Entsorgung eines Aufwindkraftwerks

Referenzsysteme	[MWe]	5	30	100
Kollektor	t SO ₂ -Äq	152	576	1441
Kamin	t SO ₂ -Äq	24	95	246
Turbine	t SO ₂ -Äq	13	76	250
Betrieb und sonstiges	t SO ₂ -Äq	16	59	110
Summe	t SO ₂ -Äq	205	806	2047
spezifische	mg/kWh	565	358	243

7.4 Auswertung

Ein Vergleich der ermittelten ökologischen Kenngrößen mit den entsprechenden Werten anderer Optionen zur Stromerzeugung wird im Folgenden durchgeführt, um die ökologische Auswertung des Aufwindkraftwerks zu ermitteln. Ergänzend zu den hier ermittelten Kennzahlen wurden entsprechende Werte für die anderen Optionen aus der Literatur entnommen /Voß, A., et al. 2002/. Obwohl die verwendeten Daten bezogen sind auf das Gebiet Baden-Württemberg, bilden sie ein Szenario zum Vergleich und zur Bewertung des Aufwindkraftwerks als eine Technologie zur Stromerzeugung.

Um eine Kilowattstunde bei der solarthermischen und windtechnischen Stromerzeugung bereitzustellen, müssen zwischen 0,018 und 1,1 kWh (Photovoltaik) erschöpflicher energetischer Ressourcen aufgewendet werden, während bei den rein fossil gefeuerten Kraftwerken rund 2,39 (Steinkohle - Kombikraftwerk mit integrierter Vergasung), 2,48 (Steinkohle - Dampfkraftwerk) bzw. 2,06 kWh (Erdgas - GuD) erforderlich sind. Bei einer Leistung von 30 MW ist der Energieaufwand bei den Aufwindkraftwerken höher als bei einer Windkraftanlage (5,5 m/s) aber bei 100 MW ist er niedriger als bei Wasserkraftwerken.

Wegen des niedrigen Wirkungsgrads des Aufwindkraftwerks, verursacht seine Bereitstellung im Vergleich zu anderen erneuerbaren und fossilen Strombereitstellungsoptionen insbesondere bei den Rohstoffe Eisen und Kalkstein eine hohe Rohstoffinanspruchnahme (Tabelle 7-17). Da die Werte der spezifischen (d.h. die auf die bereitgestellte Kilowattstunde bezogenen Werte) Rohstoffinanspruchnahme abnehmen, wenn die Anlagenleistung zunimmt, erscheint es ökologisch sinnvoll, große Aufwindkraftwerke zu bauen.

Tabelle 7-17: Verbrauch erschöpflicher und mineralischer Ressourcen für ausgewählte Optionen zur Stromerzeugung (/Voß, A., et al. 2002/).

Kraftwerkstypen		Ressourceninanspruchnahme				
		Primären- energie- träger [kWh _{Prim} / kWh _{el}]	Kupfererz [g/kWh]	Bauxit [g/kWh]	Eisenerz [g/kWh]	Kalkstein [g/kWh]
Aufwind- kraftwerk	5 MW	1,640	0,006	0,896	40,2	53,3
	30 MW	0,165	0,004	0,572	25,6	31,3
	100MW	0,030	0,003	0,380	17,0	20,3
Photovol- taik	multikristalli- nes Silizium	1,100	0,294	2,288	5,396	15,6 ^a
Turm- Solarkraft- werk ^b	ausschließli- cher Solarbetrieb	0,058	0,152	8,210	4,850	4,85 ^c
	Solaranteil 75%	1,033	0,125	6,890	3,920	3,92 ^a
Windkraft	4,5 m/s	0,110	0,075	0,051	4,471	2,62 ^a
	5,5 m/s	0,080	0,052	0,035	3,066	2,56 ^a
Wasserkraft	Laufwasser	0,050	0,005	0,007	2,057	6,11 ^a
Steinkohle	Kombikraft- werk mit integrierter Vergasung	2,390	0,008	0,030	1,742	4,79 ^a
	Dampfkraft- werk	2,480	0,008	0,030	1,700	11,9 ^a
Erdgas	GuD-Kraftwerk	2,060	0,001	0,002	1,240	6,39 ^a
Kernener- gie	Druckwasser Reaktoren	3,200	0,006	0,028	0,454	0,778 ^a

a./Marheineke, T. 2001/

b.PHOEBUS mit ASM 150-Feld

c./Weinrebe, G. 2000/

Abb. 7-6 veranschaulicht die für die ausgewählten Referenzkraftwerke ermittelten Versauerungs- und Treibhauspotenziale. Die Stromerzeugung auf Steinkohlebasis verursacht die bei weitem größten Treibhauspotenziale. Die CO₂-Emissionen je kWh sind bei einem steinkohle-gefeuerten Dampfkraftwerk mehr als vierzigfach so hoch wie bei einem Kern-, Laufwasser- oder Windkraftwerk bei höheren Windgeschwindigkeiten. Auch bezüglich des Versauerungs-
potenzials ist der Stromerzeugung auf Steinkohlebasis ein relativ hoher Beitrag anzulasten. Beim Kernkraftwerk sind die CO₂- und SO₂-Äquivalente Emissionen gering. Sie entstehen nicht durch den Prozess der nuklearen Stromerzeugung, sondern folgen aus den Vorleistungsketten für den Kraftwerksbau und die Brennstoffherstellung. Beim Aufwindkraftwerk fallen das Versauerungs- und Treibhauspotenzial deutlich geringer aus als für die Erdgas-GuD-

Steinkohlekraftwerke und die photovoltaische Stromerzeugung. Wegen des relativ geringen Wirkungsgrades von rund 1% sind die spezifischen Emissionen je kWh Strom beim Aufwindkraftwerk höher als bei Kern-, Wind-, Wasser- oder Turmkraftwerken.

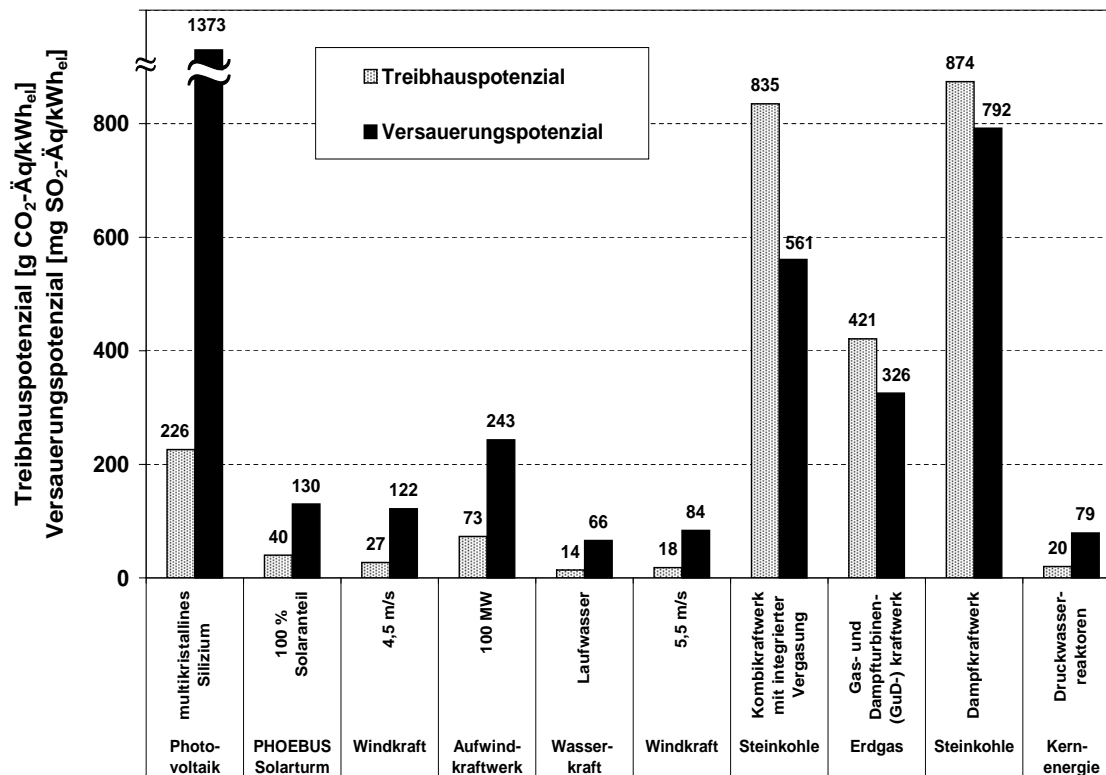


Abb. 7-6: Treibhaus- und Versauerungspotenzial je bereitgestellter Kilowattstunde für ausgewählte Optionen zur Stromerzeugung.

7.5 Weitere Umwelteffekte

Die Stromerzeugung eines Aufwindkraftwerks geht ohne eine direkte Freisetzung an toxischen Stoffen oder Partikeln einher. Allerdings müssen über die oben bereits diskutierten indirekten Umwelteinwirkungen noch weitere Umwelteffekte berücksichtigt werden. Neben den aus der Strömung der bewegten Luftmassen um die Rotorblätter resultierenden aerodynamischen Geräuschemissionen können im ordnungsgemäßen Betrieb von Aufwindkraftwerken Schattenwurf des Kamins und Lichtreflexe des Kollektordachs, die visuelle Beeinträchtigung der Landschaft sowie mögliche Effekte auf die Vogelwelt und das Mikroklima zu berücksichtigende umweltrelevante Aspekte darstellen. Bei großen Kraftwerken sind die Auswirkungen von Nebengeräusche sehr gering, da man ca. 2 km von der Turbine entfernt bleibt. Im Störfall sind keine negativen anlagenspezifischen Effekte zu erwarten. Da der Kollektorradius größer als die Kaminhöhe ist, werden sich bei einem Einsturz des Kamins Auswirkungen nur auf den Kollektorbereich beziehen. Unter Einhaltung der Sicherheitsmaßnahmen sind die Unfallsrisiken für den Menschen bei einem mechanischen Versagen als sehr gering zu bewerten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Auf der Kyoto-Konferenz im Jahr 1998 /Oberthür et al. 2000/ wurden verbindliche CO₂-Reduktionen vereinbart, darunter 6 % für Japan, 7 % für die USA und 8 % für Europa bis zum Jahr 2012 im Vergleich zum Jahr 1990. Unter diesen Randbedingungen werden eine zukünftig verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien und auch die Einsatzmöglichkeiten solar-thermischer Kraftwerke diskutiert. Aufwindkraftwerke wurden bisher ausschließlich als Pilotanlagen ausgeführt. Dennoch produzierte der Prototyp in Manzanares jahrelang Elektrizität und bewies so die Einfachheit und Zuverlässigkeit des Prinzips. Ziel der Arbeit ist es daher, mit Hilfe einer technischen, ökologischen und ökonomischen Analyse Aufwindkraftwerke umfassend zu untersuchen. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt dabei auf der technischen Analyse, wegen der Komplexität des thermo- und hydrodynamischen Verhaltens eines Aufwindkraftwerks.

Die technische Analyse soll die Grundlage bilden, um zuverlässige Aussagen über das technische Potenzial von Aufwindkraftwerken und das energetische Verhalten der Anlagen unter den verschiedensten meteorologischen Randbedingungen machen zu können.

Im Rahmen der technischen Analyse wurde die Erzeugung einer freien Konvektionsströmung in solaren Aufwindkraftwerken behandelt, die zur Stromerzeugung eingesetzt werden kann. Eine Literaturrecherche zur Erfassung des Wissensstandes ergab, dass solar induzierte, freie Konvektionsströmungen warmer Luft grundsätzlich zur Stromerzeugung herangezogen werden können. Ökologische Aspekte wurden noch nicht betrachtet.

Folgende Aufgaben stellten sich

- die Modellierung der solar induzierten, freien Konvektionsströmung unter Verwendung der grundlegenden physikalischen und thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten;
- die Entwicklung eines Computerprogramms, das die Abbildung des Verhaltens in solaren Aufwindanlagen in Abhängigkeit von allen relevanten Einflussgrößen erlaubt.

Um weitergehende Erkenntnisse über die Bedeutung der wichtigsten Einflussgrößen zu gewinnen, wurde der Schwerpunkt auf die theoretische/numerische Untersuchung des energetischen Verhaltens von solaren Aufwindkraftwerken gelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein detailliertes Modell der thermodynamischen Vorgänge entwickelt, das alle relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt. Im einzelnen beinhaltet das Modell:

- die grundlegenden Massen-, Impuls-, und Energiebilanzen der Luft und der relevanten Bauelemente;
- ein Verfahren zur Ermittlung der optischen Eigenschaften der Abdeckung;
- ein Verfahren zur Berechnung der relevanten Wärmeübergangskoeffizienten;
- Ansätze zur Berechnung der Wärmespeicherwirkung des Bodens und die Berücksichtigung des Nachtbetriebs;
- eine Prozedur zur Berechnung der Druckentnahme an der Turbine sowie der erzeugten Energie und des tageszeitlichen Verlaufs aller wesentlichen Anlagenparameter.

Ein aus diesem Modell entwickeltes Rechenprogramm ermöglicht die Berechnung der freien Konvektionsströmung in einem solaren Aufwindkraftwerk mit den angesprochenen Größen:

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchte,
- Luftgeschwindigkeit bzw. Massenstrom,

als maßgebliche Einflussfaktoren für die Konvektionsströmung. Insbesondere die Ergebnisse der theoretischen Arbeiten stellen eine bedeutende Wissensmehrung auf dem Gebiet der Entwicklung von solaren Aufwindkraftwerken dar, da mit Hilfe des Rechenprogramms der Einfluss verschiedener Randbedingungen wie

- Anlagendimensionen,
- Baumaterialien,
- Standort,
- Wetterbedingungen

erfasst werden kann.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fallen in einigen Fällen beträchtliche Abweichungen von den gemessenen Resultaten auf. Für diesen Umstand sind weniger die zahlreichen idealisierenden Annahmen verantwortlich, beispielweise die Annahme einer idealen Form des Kollektors oder die Vernachlässigung der Veränderung der optischen Eigenschaften der Abdeckung durch Verschmutzung oder Alterung. Zwar können aus der Vielzahl der Literaturstellen sinnvolle Lösungsansätze zur Berechnung der angesprochenen Vorgänge hergeleitet werden, letztlich sind jedoch vom Benutzer Parameter wie der Druckverlustbeiwert im System oder die Vordacheigenschaft abzuschätzen, bei denen schon geringe Änderungen relativ große Differenzen in den Ergebnissen bewirken. Aus diesem Grunde sind quantitativ befriedigende Ergebnisse nur dann zu erwarten, wenn derartige Parameter, wie im vorliegenden Fall, durch den Vergleich von berechneten Daten und Messergebnissen abgeschätzt werden können. Ansonsten erlaubt das Rechenprogramm qualitative Aussagen zum Einfluss relevanter Größen auf das energetische Verhalten von solaren Aufwindkraftwerken. Resümierend kann festgestellt werden, dass im Rahmen der Untersuchungen ein detailliertes Modell und Programm zur Simulation von solar induzierten, freien Konvektionsströmungen geschaffen wurde. Bei der Anwendung in der Ingenieurpraxis ist jedoch Vorsicht bei der Beurteilung quantitativer Resultate angebracht.

Die technische Analyse hat gezeigt, dass es klare Orientierungswerte für die Planung eines Aufwindkraftwerkes gibt. Die Anlagendimension, die optische Eigenschaft des Kollektors und der Druckentnahmefaktor (Anteil der gesamten Druckdifferenz, der an der Turbine abfällt) sind die wichtigsten Parameter im Rahmen des Projekts eines Aufwindkraftwerks. Außerdem liefert die dargestellte Analyse auch wertvolle Informationen für den Betrieb eines solchen Systems wie z.B. Massenstrom, Einstrahlung, Leistung, Wirkungsgrad, Transmissionsgrad, Ab-

sorptionsgrad oder Umgebungstemperatur in Abhängigkeit der Größenparameter und im tageszeitlichen Verlauf.

Mittels der ökologischen und ökonomischen Analyse sollen ausgewählte ökologische Kennzahlen und die Stromgestehungskosten auf Basis allgemein anerkannter Verfahren bestimmt werden, so dass ein Vergleich mit anderen erneuerbaren und fossilen Strombereitstellungsoptionen möglich ist. Die ökologische Analyse mittels einer Ökobilanz erfolgt ebenfalls für die drei untersuchten Anlagen. Zur Quantifizierung von Energie- und Stoffströmen über den gesamten Lebensweg wird im Allgemeinen die Prozesskettenanalyse verwendet, die eine detaillierte Beschreibung der Prozessstufen des betrachteten Energiesystems ermöglicht. Um alle Vorleistungen erfassen zu können, wird die Prozesskettenanalyse durch eine sektorale Analyse (Input-Output-Analyse) ergänzt.

Zur Bestimmung der Stromgestehungskosten werden die Kosten für Bau, Betrieb und Entsorgung ermittelt und annuitätisch über die technische Lebensdauer des Kraftwerks verteilt. Aus diesen jährlich zu tragenden Kosten und der bereitgestellten elektrischen Energie werden dann die Kosten (Levelized Electricity Costs) je Kilowattstunde berechnet. Damit ist auch hier ein Vergleich mit anderen Optionen zur Stromerzeugung möglich.

Die wesentlichen Ergebnisse der Teilanalysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Um das Modell zu validieren, wurde ein Vergleich der Ergebnisse der Simulationsrechnung mit experimentellen Ergebnissen von Manzanares durchgeführt, der eine gute Übereinstimmung gezeigt hat. Allgemein können durch die Sensitivitätsanalyse große Einflüsse der Größenparameter sowie des Abdeckungseigenschaftsparameters auf das Verhalten des Aufwindkraftwerks festgestellt werden.

Die ökonomische Analyse des Aufwindkraftwerks ergibt Stromgestehungskosten zwischen etwa 8,6 Ct/kWh für die 5 MW-Anlage und etwa 3,7 Ct/kWh für die 100 MW-Anlage für einen realen Zinssatz von 8 %. Die spezifischen Investitionskosten fallen mit steigender Anlagengröße und nehmen mit wachsendem Zinssatz zu. Durch Steigerung der Leistungsgröße (z.B. 100 MW) können Stromgestehungskosten erwartet werden, die im Bereich der Stromgestehungskosten konventioneller Kraftwerke (z.B. Atomkraftwerk mit EPR-Reaktor, Steinkohle mit Staubfeuerung) liegen.

Die ökologische Analyse ergibt folgende, auf die bereitgestellte elektrische Energie bezogenen Kenngrößen: Beim Transport, Bau, Betrieb und der Entsorgung eines Aufwindkraftwerks betragen die anzurechnenden Treibhausgasemissionen (in CO₂-Äquivalenten) rund 170 g/kWh (5 MW) bzw. rund 70 g/kWh (100 MW). An SO₂-Äquivalenten werden zwischen rund 570 mg/kWh (5 MW) und 240 mg/kWh (100 MW) emittiert. Wegen des niedrigen Wirkungsgrads ist der auf die Energieerzeugung bezogene Verbrauch an Eisen und Kalkstein für den Bau des Aufwindkraftwerkes vergleichsweise hoch. Der Großteil der Emissionen und der Rohstoffinanspruchnahme ist dabei dem Kollektor anzurechnen. Man erkennt, dass der Verbrauch erschöpflicher energetischer und mineralischer Ressourcen sowie die spezifischer CO₂- und spezifischer SO₂-Emissionen bei größeren Aufwindkraftwerken abnehmen.

Für die Weiterentwicklung von Aufwindkraftwerken sollten aus ökonomischer/ökologischer Sicht zukünftig Anstrengungen insbesondere bei der Kollektorentwicklung unternommen werden. Durch den Serienbau können die Produktionskosten stark gesenkt werden. Der entscheidende Schritt in Richtung Kommerzialisierung wäre der Bau und der Betrieb einer 100 MW-Anlage. Dies ist die Grundvoraussetzung, um eine Markteinführung im Sonnengürtel der Erde auf breiter Basis zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- /Arbeitsgruppe „Aufwindkraftwerke“ 1997/
Arbeitsgruppe „Aufwindkraftwerke“: Technische und wirtschaftliche Aspekte zur Beurteilung der Chancen von Aufwindkraftwerken, Badenwerke AG, Energie-Versorgung Schwaben AG, Schlaich Bergemann und Partner, Karlsruhe/Stuttgart, 1997
- /Arbeitsgruppe Ökobilanzen des Umweltbundesamt 1992/
Arbeitsgruppe Ökobilanzen des Umweltbundesamt, Ökobilanzen für Produkte, Bedeutung - Sachstand - Perspektiven, UBA Texte 38/92, Berlin, 1992
- /Baehr und Stephan 1996/
Baehr, H. D., Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, Springer-Verlag, Berlin, 1996
- /Baehr 2002/
Baehr, H. D., Thermodynamik, Springer, Berlin, 2002
- /Berdahl und Martin 1984/
Berdahl, P., Martin, M.: Emissivity of Clear Skies Solar Energy, 32(5), 663-664, 1984
- /Bernardes 1996/
Bernardes, M. A. d. S., Valle, R. M., Cortez, M. F.: Numerical Analysis of Natural Laminar Convection in a Radial Solar Heater Int. J. Therm. Sci., 38, 42-50, 1999
- /Bird und Hulstrom 1979/
Bird, R. E., Hulstrom, R. L.: Applications of Monte Carlo Technique to Insolation Characterization and Prediction Technical Report SERI/RR-36-306, Solar Energy Research Institute, 1979
- /Büro Schlaich Bergemann und Partner 2002/
Weinrebe, G.: persönliche Mitteilung, Stuttgart, 2002
- /BUWAL 1994/
Leutert, G.; Sommer, H., Egli, H.: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch von Baumaschinen, Synthesebericht, Umweltmaterialien Nr. 23, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 1994
- /Byrne et al. 1969-70/
Byrne, J., Hatton, A. P., Marriot, P. G.: Turbulent Flow and Heat Transfer in the Entrance Region of a Parallel Wall Passage. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 184, Pt. 1(39), 1969-70
- /Castillo, M. A. 1984/
Castillo, M. A.: A New Solar Chimney Design to Harness Energy from the Atmosphere Spirit of Enterprise: The 1984 Rolex Awards, 58-59, 1984
- /Chen 1973/
Chen, R. Y.: Flow in The Entrance Region at Low Reynolds Numbers Journal of Fluids Engineering, 95, 153-158, 1973
- /Chilton 1934/
Chilton, T. H.: Mass Transfer (Absorption) Coefficients, Industrial and Engineering Chemistry, 1138-1187, 1934

/Churchill 1977/

Churchill, S. W.: A comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and free convection, *AIChE Journal*, 23(No. 1), 10-16, 1977

/Churchill und Chu 1975/

Churchill, S. W., Chu, Humbert. H. S.: Correlating Equations for Laminar and Turbulent free Convection from a Vertical Plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329, 1975

/Colburn 1933/

Colburn, A. P.: A Method of Correlating Forced Convection, Heat Transfer Data and a Comparison with Fluid Friction. *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, 29, 174-210, 1933

/Colebrook 1939/

Colebrook, C. F.: Turbulent Flow in Pipes with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipes Law, *Journal Institution Civil Engineering*, 11, 133-156, 1939

/Duffie und Beckman 1991/

Duffie, J. A., Beckman, W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley-Interscience, New York, 1991

/Eck 1991/

Eck, B.: *Technische Strömungslehre*, Springer-Verlag, Berlin, 1991

/Eyerer und Reinhardt 2000/

Eyerer, P.; Reinhardt, H.W. (Hrsg.): *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung*. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 2000.

/Giegrich, et al. 1995/

Giegrich, J., et al.: Bilanzbewertung in produktbezogenen Ökobilanzen. Evaluation von Bewertungsmethoden, Perspektiven. Endbericht des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) an das Umweltbundesamt, Berlin, 1995

/Gnielinski 1975/

Gnielinski, V.: Berechnung mittlerer Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten an laminar und turbulent überströmten Einzelkörpern mit Hilfe einer einheitlichen Gleichung *Forschung im Ingenieurwesen*, 41, 145-153, 1975

/Gnielinski 1976/

Gnielinski, V.: New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow *International Chemical Engineering*, 16, 359-368, 1976

/Grigull und Sandner 1990/

Grigull, U., Sandner H.: *Wärmeleitung*, Springer, Berlin, 1990

/Haaf 1984/

Haaf, W.: Solar Chimneys, Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant. *International Journal of Solar Energy*, 2, 141-161, 1984

/Haaf et al. 1983/

Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, Günter, Schlaich, Jörg: Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy*, 2, 3-20, 1983

/Haaf et al. 1986/

Haaf, W., Mayr, G., Schlaich, J.: Atmosphärenthermisches Aufwindkraftwerk, BMFT FB T 81-113, Schlaich + Partner, Stuttgart, 1986

/Hartmann et al. 1996/

Hartmann, D.; Marheineke, T.; Stelzer, T.: internes Arbeitspapier zum Projekt „Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken“, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

/Heijungs et al. 1992/

Heijungs, R. et al.: Environmental Life Cycle Assessment of Products, Guide (Part 1) and Background (Part 2), CML, INO and B&G; Leiden, 1992

/Hornbeck 1964/

Hornbeck, R. W.: Laminar Flow in the Entrance Region of a Pipe, Applied Scientific Research, A13, 224-232, 1964

/Houghton et al. 1996/

Houghton, J. T. et al.: Climate Change 1995 - The Science of Climatic Change; Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996

/Incropera und DeWitt 1992/

Incropera, F. P., et al.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons., 1992

/ISO14040 1997/

ISO14040: Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Deutsche Fassung EN ISO 14040, , 1997

/ISO14041 1997/

ISO14041: Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Deutsche Fassung EN ISO 14041, Oktober 1997

/ISO14042 1998/

ISO14042: Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment, 1998.

/ISO14043 1998/

ISO14043 1998: Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation, 1998.

/Kakaç et al. 1987/

Kakaç, S., Ramesh K. S., Win A.: Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, Wiley-Interscience, New York, 1987

/Kasten und Yonug 1989/

Kasten, F., Yonug, A. T.: Revised Optical Air Mass Tables: an Approximation Formula. Applied Optics, 28, 4735-4738, 1989

/Kiera 1988/

Kiera, M.: Elektrische Leistungserzeugung nach dem Aufwindprinzip, 32.07360.1, Interatom, Köln, 1988

/Kreetz 1997/

Kreetz, H.: Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk, Diplomarbeit, TU Berlin, Berlin, 1997

/Kreißig et al. 1990/

Kreißig, J.; Baitz, M.; Betz, M.; Eyerer, P.; Kümmel, J.; Reinhardt, H.-W.: Leitfaden zur Erstellung von Sachbilanzen in Betrieben der Steine-Erden-Industrie. Bundesverband Steine und Erden, Frankfurt, 1997.

/Mahr 1991/

Mahr, M.: Numerische und Experimentelle Untersuchung des Thermodynamischen Verhaltens von Solaren Aufwindanlagen, Technische Universität München, München, 1991

/Marek 1997/

Marek, K.A.; Baron, M.: Kostenfalle Rückbau, Teilentkernung oder Abbruch. Teil 1 und 2, Baustoffrecycling 10 (1997) H. 10, S. 12-14.

/Marheineke, T. 2001/

Marheineke, T.: Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2001

/Merker 1987/

Merker, G. P.: Konvektive Wärmeübertragung, Springer-Verlag, Berlin, 1987

/Meteonorm 1999/

Remund J., Kunz S., and Lang R., Global meteorological database for solar energy and applied climatology, Bern, 1999

/Mullet 1987/

Mullet, L. B.: The Solar Chimney Overall Efficiency, Design and Performance, Int. J. of Ambient Energy, 8(1), 35-40, 1987

/Murphy 1978/

Murphy, H. D., Coxon, M., McElicot, D. M.: Symmetric Sink Flow between Parallel Plates Journal of Fluids Engineering, 100, 477-484, 1978

/Na und Lu 1973/

Na, T. Y., Lu, Y. P.: Turbulent Flow Developing Characteristics in Channel Inlets Applied Scientific Research, 27, 425-439, 1973

/Oberthür et al. 2000/

Oberthür, S., et al.: Das Kyoto Protokoll. Internationale Klimapolitik für das 21. Jahrhundert, Leske & Budrich, 2000

/Ökoinventare 1996/

Ökoinventare von Energiesystemen; Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich; 1996

/Ong 1995/

Ong, K. S.: Thermal Performance of Solar Air Heaters: Mathematical Model and Solution Procedure, Solar Energy, 55(2), 93-109, 1995

/Pasumarthi und Sherif 1997/

Pasumarthi, N., Sherif, S. A.: Performance of a Demonstration Solar Chimney Model for Power Generation Proceedings of the 35th Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, 1997

/Petukhov und Popov 1963/

Petukhov, B. J., Popov, N. V.: Theoretical Calculation of Heat Transfer and Frictional Resistance in Turbulent Flow in Tubes of an Incompressible Fluid with Variable Physical Properties High Temperature, 1, 69-83, 1963

/Prandtl 1927/

Prandtl, L.: Über den Reibungswiderstand strömender Luft. Erg. Aero. Vers-Anst. Göttingen; 3 Liefg. S. 1-5; 4 Liefg. S. 18-29. München: Oldenbourg 1927. Nachdruck: Ges. Abh., S. 620-626, 632-648. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1961. Prandtl, L.: Schlichting, H.: Werft, Reederei, Hafen 15 (1934) 1-4. Nachdruck: Ges. Abh. S. 649-662. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1961. Schlutz-Grunow, F.: Luftfahrtforsch. 17 (1940) 239-246; Jb. Schiffbautechn. Ges. Bd. 39, 1938, S. 176-199. Truckenbrodt, E.: Z. Flugwiss. 24 (1976) 177-187. Wieghardt, K.: z. angew. Math. Mech. 24 (1944) 294-296.

/Press et al. 1992/

Press, W. H., Teukolsky, Saul A., Vetterling, William T., Flannery, Brian P.: Numerical Recipes in Fortran: the Art of Scientific Computing, Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, 1992

/Rolex Awards for Enterprise 1996/

Secretariat of the Rolex Awards for Enterprise: Solar-wind Power System. The best of the Rolex Awards for Enterprise 1976 to 1996, Geneva : Montres Rolex, 147.

/Schiel und Schlaich 1988/

Schiel, W., Schlaich, J.: Solarthermisches Aufwindkraftwerk BWK, 40(11), 444-449, 1988

/Schlaich 1995/

Schlaich, J.: The Solar Chimney, Edition Axel Menges, Stuttgart, 1995

/Schlaich et al. 1990/

Schlaich, J., Schiel W., Friedrich, K., Schwarz, G., Wehowsky, P., Meinecke, W., Kiera, M.: Abschlußbericht Aufwindkraftwerk, Übertragbarkeit der Ergebnisse von Manzanares auf größere Anlagen, BMFT-Förderkennzeichen 0324249D, Stuttgart, 1990

/Schlichting 1965/

Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie, Braun, Karlsruhe, 1965

/Schlichting 1982/

Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie, Braun, Karlsruhe, 1982

/Schmetz 1986/

Schmetz, J.: Tellus, 36 A, 417-166, 1986

/Schneider 1998/

Schneider, L.: Stromgestehungskosten von Großkraftwerken, Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie, Freiburg., 1998

/Serghides 1984/

Serghides, T. K.: Estimate Friction Factor Accurately Chem. Eng., 91, 63-64, 1984

/Shah und London 1978/

Shah, R. K., London, A. L.: Laminar Flow Forced Convection in Ducts, New York, 1978

/Stephan 1959/

Stephan, K.: Wärmeübertragung und Druckabfall bei nicht ausgebildeter Laminarströmung in Rohren und ebenen Spalten. *Chemie-Ingenieur -Technik*, 31, 773-778, 1959

/Stephan und Mayinger 1986/

Stephan, K., Mayinger, F.: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*, Springer-Verlag, 1986

/Swinbank 1963/

Swinbank, W. C.: Long-wave radiation from clear skies *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, 89, 339-348, 1963

/Tuller 1986/

Tuller, S. E.: World Distribution of Mean Monthly and Annual Precipitable. *Month. Weath. Rev.*, 96, 786-797, 1986

/UBA 1995/

UBA Texte 23/95: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen, Wirkungsbilanz und Bewertung, Umweltbundesamt, Texte 23/95, C.A.U. GmbH -Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich, ifeu -Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Berlin 1995

/Unger, J. 1988/

Unger, J.: *Konvektionsströmungen*, B. G. Teubner Stuttgart, Stuttgart, 1988

/VDI Richtlinien 1991/

VDI Richtlinien.: VDI 2067 Blatt 1: Betriebstechnische und Wirtschaftliche Grundlagen. VDI Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Dusseldorf, 1991

/VDEW 1987/

VDEW.: *Stromerzeugungskostenvergleich 1990 in Betrieb gehender großer Kern- und Steinkohle-Kraftwerksblöcke*, Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, Frankfurt, 1987

/Voß, A., et al. 2002/

Voß, A., Santos Bernardes, M. A. dos S., Briem, S., Krewitt, W., Nill, M., Rath-Nagel, S.: *Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg*, BWR 99002, IER - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2002

/Wagner und Pruss 1993/

Wagner, W., Pruss, A.: International Equations for the Saturation Properties of Water *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 22(3), 785-787, 1993

/Wärmeatlas 1997/

Wärmeatlas, VDI - Wärmeatlas, Springer Verlag, Berlin, 1997

/WCP/IAMAP 1986/

WCP/IAMAP Radiation Commission: *A Preliminary Cloudless Standard Atmosphere for Radiation Computation*, WCP, Geneva, 1986

/Weinrebe, G. 2000/

Weinrebe, G.: *Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken*, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2000

/Whillier, A. 1977/

Whillier, A. (1977). „Prediction of Performance of Solar Collectors.“ Applications of solar energy for heating and cooling of buildings, R. C. Jordan, ed., ASHRAE, New York, VIII-1 - VIII-14.

/White 1974/

White, F. M.: Viscous Fluid Flow. Mc-Graw-Hill, New York, 1974

/Winter 1990/

Winter, C.-J., Sizmann, R. L., Vant-Hul, L. L., Solar Power Plants, Springer Verlag, München, 1990

/Yan et al. 1991/

Yan, M.-Q., Sherif, S. A., Kridli, G. T., Lee, S. S., Padki, M. M. : Thermo-fluids analysis of Solar Chimneys Industrial Applications of Fluid Mechanics ASME, FED-2, 125-130, 1991

/Zdunkowski et al. 1980/

Zdunkowski, W. G., Welsch, R. M., Korb, G.: An Investigation of the Structure of Typical Two-Stream-Methods for the Calculation of Solar Fluxes and Heating Rates in Clouds Contributions to Atmospheric Physics, 53, 147-166, 1980

/Zhi-qing 1982/

Zhi-qing, W.: Study on Correction Coefficients of Laminar and Turbulent Entrance Region Effect in Round Pipe Applied Mathematics and Mechanics, 3(3), 433-446, 1982

Anhang

A Solarstrahlung

Beim Eintritt der Sonnenstrahlen in die Atmosphäre werden durch Luft, Staub, Wasserdampf und andere Bestandteile die Sonnenstrahlen zum Teil absorbiert und reflektiert. Den Anteil, der ohne Reflexion und Streuung auf die Erdoberfläche auftritt, bezeichnet man mit direkter Strahlung G_b . Den Anteil der Sonnenstrahlung, der durch Wasserdampf gestreut wird, erreicht die Erdoberfläche als diffuse Himmelsstrahlung G_d . Das Verhältnis der beiden Anteile hängt von der geographischen Lage, der Tages- und Jahreszeit und den meteorologischen Bedingungen ab. Beide Anteil zusammen bezeichnet man als die Globalstrahlung (/Winter 1990/)

$$G = G_b + G_d \quad (\text{A-1})$$

A.1 Direkte Strahlung

Die auf eine horizontale Ebene auftretende direkte Strahlung kann wie folgt ermittelt werden

$$G_b = G_{\perp} \sin \alpha_S \quad (\text{A-1})$$

wobei α_S der Sonnenhöhenwinkel ist, der wie folgt berechnet werden kann.

$$\sin \alpha_S = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (\text{A-2})$$

Dabei ist der Deklinationswinkel δ der Winkel, der von der Äquatorialebene der Erde und der Richtung der direkten Sonnenstrahlen eingeschlossen wird. Dabei kann dieser Deklinationswinkel nach Gleichung (A-2) berechnet werden.

$$\delta = 23,44 \sin \{ P[N - 82,3 + 1,93 \sin(P(N - 2,4))] \} \quad (\text{A-3})$$

Hierhin bedeutet $P = 2\pi/365,25$ die Periode. N ist die Tageszahl eines Schaltjahres.

Der Stundenwinkels ω ist der Winkel, den die Erddrehung in einer bestimmten Zeit beschreibt. Er kann auf 10 Sekunden genau nach (A-4) berechnet werden, wenn er täglich auf Solarmittag $t_s = 0$ angepasst wird (in Grad)

$$\omega = t_s 360 / 24 \quad (\text{A-4})$$

Dabei ist t_s die sogenannte tatsächliche lokale Sonnenzeit (local solar time) in Stunden. Ihr Verhältnis zur lokalen Standardzeit LST (local standard time) in Stunden ist

$$t_s = LST - 12 + \frac{24}{360}(L_o - L) - EOT \quad (\text{A-5})$$

wobei L die lokale geographische Länge (West) und L_o die geographische Länge ist, die sich auf die lokale Standardzeit (LST) bezieht. L_o für verschiedene Zonenzeiten wird in Tabelle A-1 angegeben.

Tabelle A-1: Lokale Standardzeit LST

Standardzonenzeiten	LST
Alaska-Hawaii Standard Time	150
Atlantic Standard Time	60
Central European Time	-15
Central Standard Time	90
Eastern Standard Time	75
Mountain Standard Time	105
Pacific Standard Time	120
South Atlantic Standard Time	45
Universal Time Coordinate (UTC)	0
Yukon Standard Time	135

Die Zeitgleichung EOT (**E**quation **O**f **T**ime) kann wie folgt ermittelt werden (in Stunden)

$$EOT = 0,1276 \sin 0,9856(N - 3) + 0,1644 \sin 1,9713(N - 81) \quad (\text{A-6})$$

A.2 Diffuse Strahlung

Um solarthermischen Anlagen sinnvoll konzipieren zu können, müssen für den betreffenden Aufstellungsort die über das Jahr möglichen maximalen Globalstrahlungs-Werte bei wolkenlosem Himmel, wie auch die Einstrahlungen an bewölkten Tagen bekannt sein. Die mittlere Tages-Einstrahlung beispielweise an wolkenlosen Tagen hängt neben der Jahreszeit vom Breitengrad und vom Trübungsfaktor ab. Der Trübungsfaktor ist ein Maß für die Schwächung der Intensität der Sonnenstrahlung durch die in die Atmosphäre enthaltenen natürlichen und künstlichen Bestandteile. Beim Eintritt der Sonnenstrahlung in die Atmosphäre werden durch Luft, Wasserdampf und andere Bestandteile die Sonnenstrahlen zum Teil absorbiert und reflektiert.

$$G_{\perp} = G_{sc} \tau_{Ra} \tau_{O3} \tau_{Ga} \tau_{Wa} \tau_{Ae} \tau_{rmCi} \quad (\text{A-1})$$

G_{\perp} ist die Strahlung, die senkrecht zu einer horizontale Ebene ankommt.

Hierin bedeutet

Ra: Rayleighstreuung durch Luftmoleküle

O3: Absorption durch Ozon

Ga: Absorption durch gleichmäßig Mischgase (insbesondere CO₂ und O₂)

Wa: Absorption durch Wasserdampf

Ae: Auslöschung durch Aerosolpartikel

Ci: Auslöschung durch hohe Zirruswolken.

Der auf die Rayleighstreuung bezogene Transmissionsgrad ist

$$\tau_{Ra} = \exp[-0,0903(1,0 + AM_* - AM_*^{1,01})AM_*^{0,84}] \quad (\text{A-2})$$

Die relative Luftmasse AM_* bezieht sich auf den lokalen atmosphärischen Druck p , wobei AM sich auf $p_o = 1,013$ hPa bezieht

$$AM_* = \frac{p}{p_o} AM \quad (\text{A-3})$$

Die relative Luftmasse errechnet sich nach (/Kasten und Yonug 1989/)

$$AM = \frac{1}{\sin \alpha_s + 0,50572(6,07995^\circ + \alpha_s)^{-1,6364}} \quad (\text{A-4})$$

Die Absorption durch Ozon kann durch den folgenden Transmissionsgrad ermittelt werden

$$\tau_{O_3} = 1 - \frac{0,1611 U_{O_3}}{(1,0 + 139,48 U_{O_3})^{0,3035}} \quad (\text{A-5})$$

Der Parameter U_{O_3} bezieht sich auf die vertikale Dicke der Ozonschicht d_{O_3} (in cm mit normaler Temperatur und Druck)

$$U_{O_3} = d_{O_3} AM \quad (\text{A-6})$$

Ein typischer Wert für die Atmosphäre ist $d_{O_3} = 0,32$ cm Ozon.

Die Mischgase (CO_2 , O_2 , N_2) der Atmosphäre reduziert die Übertragung der Solarstrahlung durch

$$\tau_{Ga} = \exp[-(0,0127 AM_*^{0,26})] \quad (\text{A-7})$$

Wasserdampf vermindert die Strahlungsübertragung durch

$$\tau_{Wa} = 1 - \frac{2,496 U_{Wa}}{6,385 U_{Wa} + (1,0 + 79,03 U_{Wa})^{0,683}} \quad (\text{A-8})$$

Der Parameter $U_{Wa} = d_{Wa} AM_*$ wird für die Menge des Wasserdampfes in einer vertikalen Säule am Standort des Empfängers angesehen. d_{Wa} hat als Maßeinheit g/cm^2 . Nach /Tuller 1986/ wurden die folgenden angenäherten Werte vorgeschlagen: im Winter $d_{Wa} = 1,3$ g/cm^2 ; in Sommer $d_{Wa} = 3,0$ g/cm^2 .

Die lokale Horizontalsicht VIS (in km) kann verwendet werden, um den auf diesen Parameter bezogenen Aerosoltransmissionsgrad auszuwerten

$$\tau_{Ae} = \exp \left[AM_*^{0,9} \ln \left(0,97 + \frac{1,265}{VIS^{0,66}} \right) \right] \quad (\text{A-9})$$

Der Transmissionsgrad berücksichtigt auch die Auslöschung durch Zirrus. Benutzt man eine optische Dicke d_{Ci} , so erhält man ($0,01 \leq d_{Ci} \leq 1,0$)

$$\tau_{Ci} = \exp(-AM \cdot d_{Ci}) \quad (\text{A-10})$$

/Bird und Hulstrom 1979/ behandelten die diffuse Strahlung als eine Summe den Beiträge der Streuung durch Moleküle, Aerosole und Zirrus. Die Quelle für den Zerstreuenprozess ist

die horizontale Bestrahlungsstärke der Solarstrahlung, die nicht auf ihren Weg durch die Atmosphäre absorbiert wird

$$G_{NA} = 0,786 G_{sc} \cos \theta_z \tau_{O3} \tau_{Ga} \tau_{Wa} \tau_{AAe} \quad (\text{A-11})$$

τ_{AAe} ist der Transmissionsgrad nur wegen der Aerosolabsorption

$$\tau_{AAe} = 1 - (1 - \omega_o)(1 - \tau_{Ae})(1 - AM_* + AM_*^{1,06}) \quad (\text{A-12})$$

Die einzelne Streualbedo des durchschnittlichen kontinentalen Aerosoles ist $\omega_o = 0,88$ /WCP/IAMAP 1986/; andere Aerosolenarten haben Werte zwischen 0,6 und 1,0.

$$G_d^{Ra} = G_{NA}(1 - \tau_{Ra})/2(1 - AM_* + AM_*^{1,02}) \quad (\text{A-13})$$

$$G_d^{Ae} = G_{NA}(1 - \tau_{Ae}/\tau_{AAe})F_{Ae} \quad (\text{A-14})$$

$$G_d^{Ci} = G_{NA}(1 - \tau_{Ci})F_{Ci} \quad (\text{A-15})$$

Der Anteil der Strahlung, der in Richtung zur Oberfläche gestreut wird, wird durch einen Faktor angegeben, der von der Streusymmetrie der jeweiligen Streuung abhängt /Schmetz 1986/.

$$F_{Ae} = 0,5 + 0,375 \cos \theta_z g_{Ae} \quad (\text{A-16})$$

$$F_{Ci} = 0,5 + 0,375 \cos \theta_z g_{Ci} \quad (\text{A-17})$$

$g_{Ae} = 0,63$ für durchschnittliches kontinentales Aerosol /WCP/IAMAP 1986/ und $g_{Ci} = 0,986$ /Bird und Hulstrom 1979/.

Typische Werte der Oberflächenalbedo sind in die Tabelle A-2 angegeben. Für die sogenannte atmosphärische Albedo ρ_{At} wird die für einen örtlichen bestimmten Zenithwinkel von $\theta_z = 60^\circ$ berechnete Rückstreuung $(1 - F_{Ae,Ci})$ verwendet, die für ein verbreitetes rückwärtiges Streuen typisch ist (/Zdunkowski et al. 1980/).

$$\rho_{At} = 0,0685 + (0,5 - 0,189 g_{Ae})(1 - \tau_{Ae}/\tau_{AAe}) + (0,5 - 0,189 g_{Ci})(1 - \tau_{Ci}) \quad (\text{A-18})$$

Die globale Strahlung erhält man durch

$$G = (G_b + G_d^{Ra} + G_d^{Ae} + G_d^{Ci}) \frac{1}{1 - \rho_s \rho_{At}} \quad (\text{A-19})$$

Tabelle A-2: Ausgewählte Werte für die Oberflächenalbedo.

Oberflächen	Werte für die Oberflächenalbedo
Asphalt	0,1-0,2
Beton	0,25-0,35
Kiefer	0,1-0,15
Wüstensand	0,3-0,4
Gras	0,2-0,3
grüner Wald	0,1-0,2
frischer Schnee	0,75-0,95
alter Schnee	0,4-0,6
trockener Boden	0,15-0,13
nasser Boden	0,1-0,2

B Strahlungsbilanzen im langwelligen Bereich

Kollektor mit einfacher Abdeckung - langwellige Strahlung

Das thermischen Netzwerk für einer langwellige Strahlung durchlässigen Abdeckung ohne Wasserspeicher ist in Abb. B-1 dargestellt.

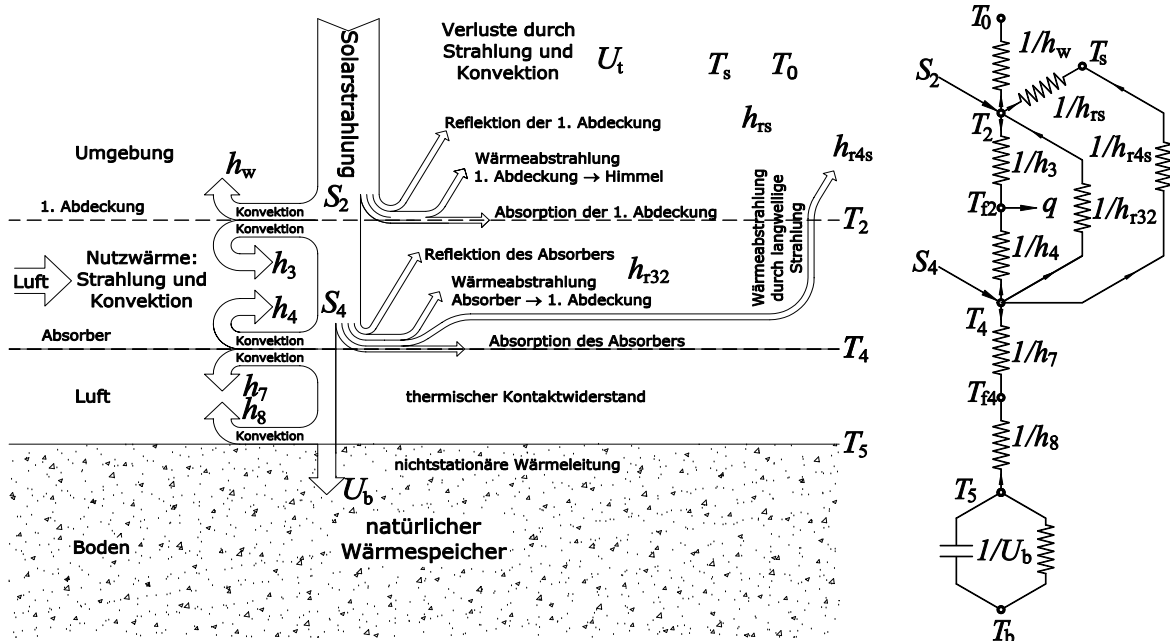


Abb. B-1: Physikalische Vorgänge und thermisches Netzwerk für langwellige Strahlung durchlässige Abdeckung (ohne Wasserspeicher).

Die Wärmebilanz für die Punkte des thermischen Netzwerks für einen Kollektor mit einfacher Abdeckung ohne Wasserspeicher kann wie folgt ermittelt werden:

$$T_2: S_2 + h_{r32}(T_4 - T_2) + h_3(T_{f2} - T_2) = h_w(T_2 - T_0) + h_{rs}(T_2 - T_s) + \tau \varepsilon_4 h_{r4s}(T_4 - T_s) \quad (\text{B-1})$$

$$T_{f2}: h_4(T_4 - T_{f2}) = h_3(T_{f2} - T_2) + q \quad (\text{B-2})$$

$$T_4: S_3 = h_4(T_4 - T_{f2}) + h_{r32}(T_4 - T_2) + h_7(T_4 - T_{f4}) + \tau \varepsilon_4 h_{r4s}(T_4 - T_s) \quad (\text{B-3})$$

$$T_{f4}: h_7(T_4 - T_{f4}) = h_8(T_{f4} - T_5) \quad (\text{B-4})$$

$$T_5: h_8(T_{f4} - T_5) = U_b(T_5 - T_{5,0}) \quad (\text{B-5})$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5-24) in die Gleichung (B-2) und Umordnen der Terme folgt

$$\begin{aligned} (h_3 + h_{r32} + h_{rs} + h_w)T_2 - h_3T_{f2} - (h_{r32} + \tau \varepsilon_4 h_{r4s})T_4 \\ = S_2 + h_w T_0 + (h_{rs} + \tau \varepsilon_4 h_{r4s})T_s \end{aligned} \quad (\text{B-6})$$

$$h_3T_2 - (h_3 + h_4 + \Gamma)T_{f2} + h_4T_4 = -\Gamma T_{f2,i} \quad (\text{B-7})$$

$$-h_{r32}T_2 - h_4T_{f2} + (h_4 + h_{r32} + h_7 + \tau \varepsilon_4 h_{r4s})T_4 - h_7T_{f4} = S_3 + \tau \varepsilon_4 h_{r4s}T_s \quad (\text{B-8})$$

$$h_7T_4 - (h_7 + h_8)T_{f4} + h_8T_5 = 0 \quad (\text{B-9})$$

$$-h_8T_{f4} + (h_8 + U_b)T_5 = U_b T_{5,0} \quad (\text{B-10})$$

Die Gleichungen (B-6) bis (B-10) können in einer 5×5 Matrixform (B-11) geschrieben werden.

$$\begin{bmatrix}
 \begin{pmatrix} h_3 \\ +h_{r32} \\ +h_{rs} \\ +h_w \end{pmatrix} & -h_3 & -\begin{pmatrix} h_{r32} \\ +\tau\varepsilon_4 h_{r4s} \end{pmatrix} & 0 & 0 & T_2 & S_2 + h_w T_0 \\
 & & & & & & +(h_{rs} + \tau\varepsilon_4 h_{r4s}) T_s \\
 h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +\Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & T_{f2} & -\Gamma T_{f2,i} \\
 -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_7 \\ +\tau\varepsilon_4 h_{r4s} \end{pmatrix} & -h_7 & 0 & T_4 & S_3 + \tau\varepsilon_4 h_{r4s} T_s \\
 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 & T_{f4} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} & T_5 & U_b T_{5,0}
 \end{bmatrix} = \quad (B-11)$$

wobei

ε : Emissionsgrad,

τ : Transmissionsgrad für langwellige Strahlung und

χ : Teil der langwelligen Strahlung, der vollständig von der ersten Abdeckung absorbiert wird.

Abb. B-2 und Abb. B-3 geben einen Überblick über die unterschiedlichen thermischen Netzwerken für einen Kollektor mit einfacher und doppelter Abdeckung jeweils mit und ohne Wasserspeicher.

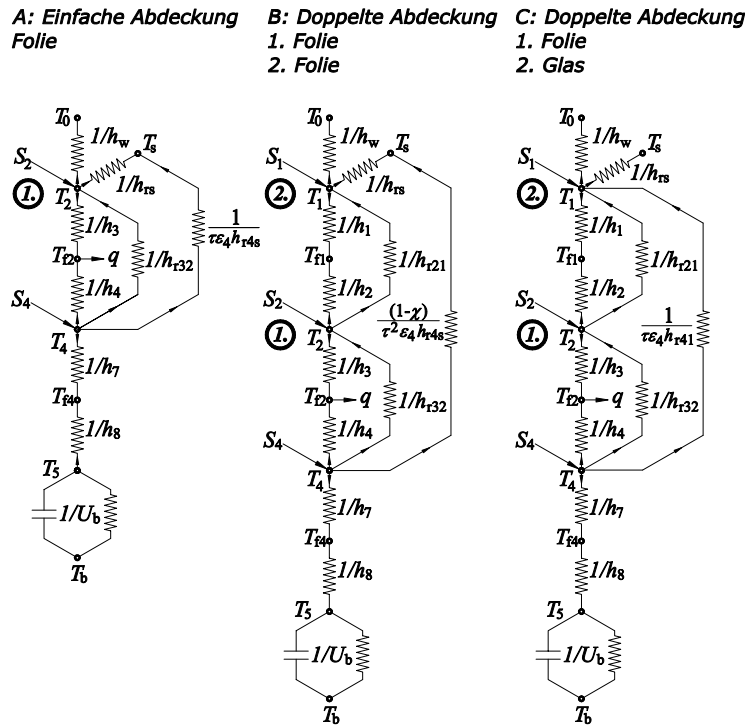


Abb. B-2: Thermische Netzwerke für unterschiedliche, langwellige Strahlung durchlässige Abdeckungen (ohne Wasserspeicher).

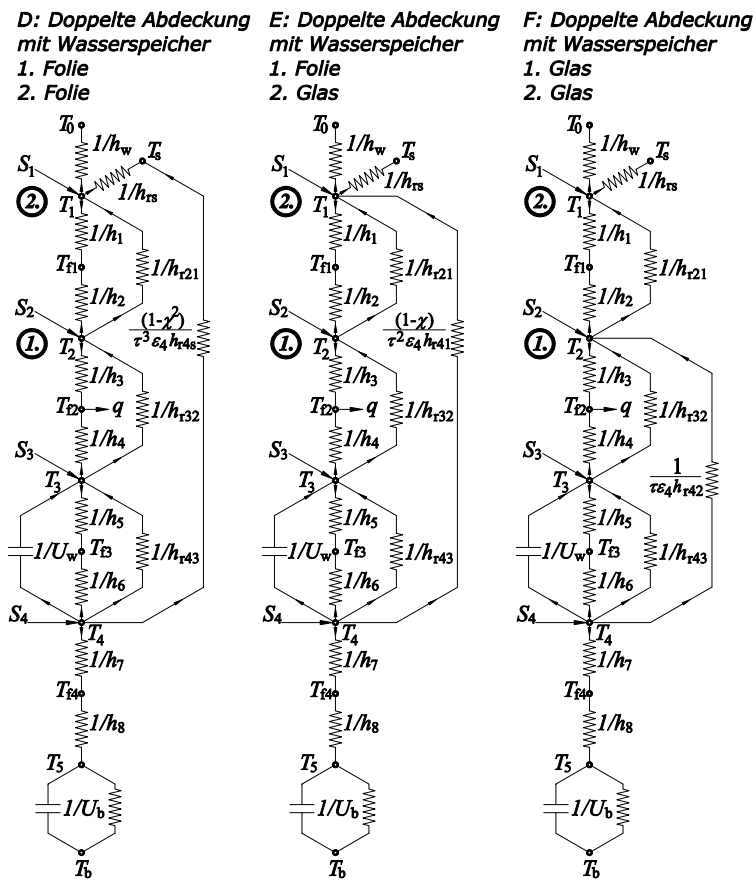


Abb. B-3: Thermische Netzwerke für unterschiedliche, langwellige Strahlung durchlässige Abdeckungen (mit Wasserspeicher).

C Luftfeuchte

Bei Zustandsänderungen von Dampf-Luftgemischen bleibt die beteiligte Luftmenge dieselbe, es ändert sich nur die zugemischte Dampfmenge durch Kondensieren oder Verdunsten (/Baehr 2002/). Alle Zustandsänderungen sollen bei konstantem Druck, der der Atmosphärendruck ist, erfolgen. Es sei

- p_0 : Der Gesamtdruck des Gemisches (in der Regel der atmosphärische),
- p : Teildruck des Dampfes,
- $p_0 - p$: Teildruck der Luft des Gemisches,
- p_S : Der Sättigungsdruck des Dampfes bei der gegebenen Temperatur,
- x : Der Wassergehalt des Gemisches in kg Wasser je kg trockener Luft,
- x_S : Der Dampfgehalt des Gemisches bei Sättigung,
- M_d : 18,015 kg/kmol die Molmasse des Dampfes,
- M_l : 28,95 kg/kmol die Molmasse der Luft,
- R_d : 0,4615 kJ/kg·K die Gaskonstante des Dampfes,
- R_l : 0,2872 kJ/kg·K die Gaskonstante der Luft,
- c_{pd} : 1,861 kJ/kg·K die spezifische Wärmekapazität des Dampfes im idealen Gaszustand bei 0 °C,
- c_{pl} : 1,006 kJ/kg·K die spezifische Wärmekapazität der Luft im idealen Gaszustand bei 0 °C,
- r : 2500,0 kJ/kg die Verdampfungsenthalpie des Wasser bei 0 °C.

Als relatives Maß für den Dampfgehalt benutzt man den Feuchtegrad $\psi = x/x_S$ und die relative Feuchte $\varphi = p(T)/p_S(T)$. Zwischen beiden Größen besteht der Zusammenhang

$$x = \frac{m_d}{m_l} = \frac{R_l p}{R_d (p_0 - p)} \quad (\text{C-1})$$

Daraus erhalten wir

$$x = 0,622 \frac{p}{p_0 - p} = 0,622 \frac{p_S(T)}{(p_0/\varphi) - p_S(T)} \quad (\text{C-2})$$

Für die Enthalpie h_{1+x} des Gemisches aus 1 kg trockener Luft und x kg Dampf gilt

$$i_{1+x} = c_{pl}(T - 273,15) + x(c_{pd}(T - 273,15) + r) \quad (\text{C-3})$$

und im besonderen für Wasserdampf-Luftgemische

$$i_{1+x} = 1,006(T - 273,15) + x(1,861(T - 273,15) + 2500) \quad (\text{C-4})$$

Das spezifische Volumen von feuchter Luft ergibt sich zu

$$v_{1+x} = \frac{1+x}{\rho} = 0,4615(x + 0,622) \frac{T}{p_0} \quad (\text{C-5})$$

Der Sättigungsdruck des Dampfes p_S bei der gegebenen Temperatur zwischen $273,16 \leq T$

$\leq 647,096$ wird durch die folgende Gleichung berechnet (/Wagner und Pruss 1993/)

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \frac{T}{T_c} [a_1 \tau + a_2 \tau^{1,5} + a_3 \tau^3 + a_4 \tau^{3,5} + a_5 \tau^4 + a_6 \tau^{7,5}] \quad (\text{C-6})$$

mit

$$\tau = 1 - \theta, \quad (\text{C-7})$$

$$\theta = \frac{T}{T_c}, \quad (\text{C-8})$$

$$p_c = 22,064 \text{ MPa,}$$

$$T_c = 647,096 \text{ K,}$$

$$a_1 = -7,85951783,$$

$$a_2 = 1,84408259,$$

$$a_3 = -11,7866497,$$

$$a_4 = 22,6807411,$$

$$a_5 = -15,9618719$$

und $a_6 = 1,80122502.$

D Mathematische Herleitung der finanzmathematischen Durchschnittskosten

Es gilt allgemein

$$\text{Barwert}_{\text{Einnahmen}} - \text{Barwert}_{\text{Ausgaben}} = \text{Kapitalwert} \quad (\text{D-1})$$

Bei einem Kapitalwert von Null gilt

$$\text{Barwert}_{\text{Einnahmen}} = \text{Barwert}_{\text{Ausgaben}} \quad (\text{D-2})$$

$$\sum_{t=1}^n \frac{e_t x_t}{z^t} = \sum_{t=1}^n \frac{a_t x_t}{z^t} \quad (\text{D-3})$$

wobei

e_t : spezifische Einnahmen (€/kWh) im Jahr t

a_t : spezifische Ausgaben (€/kWh) im Jahr t

x_t : Stromerzeugung (kWh) im Jahr t

$1/z^t$: Abzinsungsfaktor im Jahr t

Wenn $e_t = e = \text{konstant}$, gilt

$$e \sum_{t=1}^n \frac{x_t}{z^t} = \sum_{t=1}^n \frac{a_t x_t}{z^t} \quad (\text{D-4})$$

Die Summe links im obigen Ausdruck stellt den „Barwert der Stromerzeugung“ dar. Die Gleichung nach e aufgelöst, liefert

$$e = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{a_t x_t}{z^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{x_t}{z^t}} = \frac{\text{Barwert der Ausgaben}}{\text{Barwert der Stromerzeugung}} \quad (\text{D-5})$$

Dies ist eine Berechnungsformel für die finanzmathematischen Durchschnittskosten. Die andere Formel erhält man durch nachfolgende Ableitung.

Setzt man in der Summe für den Barwert der Einnahmen $e_t = e = \text{konstant}$ und $x =$ über die Nutzungsdauer konstante jährliche Stromerzeugung, wird

$$e = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{a_t x_t}{z^t}}{x \sum_{t=1}^n \frac{1}{z^t}} = \frac{\text{Barwert der Ausgaben}}{\text{Barwert der Stromerzeugung}} \quad (\text{D-6})$$

Anders geschrieben

$$e = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{a_t x_t}{z^t}}{x} \frac{1}{\sum_{t=1}^n \frac{1}{z^t}} \quad (\text{D-7})$$

Da der Kehrwert des Barwertfaktors gleich dem Annuitätsfaktor ist, gilt

$$e = \frac{\text{Barwert der Ausgaben} \times \text{Annuitätsfaktor}}{\text{jährlich konstante Stromerzeugung}} \quad (\text{D-8})$$

Damit ist die mathematische Gleichwertigkeit der alternativen Berechnungsmöglichkeiten für die finanzmathematischen Durchschnittskosten bewiesen.

Lebenslauf

Marco Aurélio dos Santos Bernardes

Rua Delegado Álvaro Loureiro 196/201
31160-650 Belo Horizonte, MG, Brasilien
E-Mail: masb_99@yahoo.com

Persönliche Angaben

Geburtsdatum: 21.12.1970
Geburtsort: Ipatinga - Brasilien

Beschäftigung

- ab 11.99 Erlaubnis zur Promotionsarbeit an der Universität Stuttgart
- ab 09.97 Hochschullehrer am Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEFET - MG
Lehre: Wärmelehre, Konstruktionslehre, Technisches Zeichen, Strömungslehre
- 10.96 - 07.97 Stellvertretender Hochschullehrer an der Universidade Federal de Minas Gerais -
UFMG.
Lehre: Technisches Zeichen

Studium

- 1999 - 2004 Promotionsarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart - Deutschland
Thema: Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraft-
werken
- 1995 - 1997 M. Sc., UFMG-MG, Belo Horizonte - MG
Thema: Präliminarstudien zum Solarthermischen Aufwindkraftwerk
- 1988 - 1994 Vorlesungen in Maschinenbau, CEFET-MG, Belo Horizonte - MG
- WS 1993/94 Praxissemester II - Das Referat „Wärmeaustauscher (Entwicklung, Funktion und
Bauelemente)“ gehalten am 20. Dezember 1993 in deutscher Sprache mit
anschließender Diskussion.

Praktika

- 11.93 - 03.94 Güntner GmbH, München - Deutschland
- 01.92 - 06.92 USIMINAS S. A. , Belo Horizonte - MG

Wissenschaftliche Arbeit

- 9.01 - 12.02 Lebenszyklusanalyse ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken
- 01.02 - 03.02 Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-
Württemberg

Schulbildung

- 1977 - 1984 Grund- und Mittelschule, Ipatinga - MG
- 1985 - 1987 Gymnasium, Ipatinga / Belo Horizonte- MG

Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Bezugsadresse: Universität Stuttgart
 Institut für Energiewirtschaft
 und Rationelle Energieanwendung
 - Bibliothek -
 D-70550 Stuttgart

 Tel.: 0711 / 7806161
 Fax: 0711 / 7803953
 E-Mail: bib@ier.uni-stuttgart.de

Bestellungen sind auch über Internet möglich:
<http://www.ier.uni-stuttgart.de>

- Band 95 M. A. dos Santos Bernardes
Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken
März 2004, 228 Seiten, 15 €
- Band 94 J. Bagemihl
Optimierung eines Portfolios mit hydro-thermischem Kraftwerkspark im börslichen Strom- und Gasterminmarkt
Februar 2003, 138 Seiten, 10 €
- Band 93 A. Stuible
Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen
November 2002, 156 Seiten, 13 €
- Band 92 M. Blesl
Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs
August 2002, 282 Seiten, 18 €
- Band 91 S. Briem, M. Blesl, M. A. dos Santos Bernardes, U. Fahl, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß
Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg
August 2002, 138 Seiten, 10 €
- Band 90 B. Frey, M. Neubauer
Energy Supply for Three Cities in Southern Africa
Juli 2002, 96 Seiten, 8 €

- Band 89 A. Heinz, R. Hartmann, G. Hitzler, G. Baumbach
Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin
Juli 2002, 212 Seiten, 15 €
- Band 88 M. Sawillion
Aufbereitung der Energiebedarfsdaten und Einsatzanalysen zur Auslegung von Blockheizkraftwerken
Juli 2002, 136 Seiten, 10 €
- Band 87 T. Marheineke
Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken
Juli 2002, 222 Seiten, 15 €
- Band 86 B. Leven, C. Hoeck, C. Schaefer, C. Weber, A. Voß
Innovationen und Energiebedarf - Analyse ausgewählter Technologien und Branchen mit dem Schwerpunkt Stromnachfrage
Juni 2002, 224 Seiten, 15 €
- Band 85 E. Laege
Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie - Eine modellgestützte Systemanalyse
Januar 2002, 254 Seiten, 15 €
- Band 84 S. Molt
Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystem-analytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung
Oktober 2001, 166 Seiten, 13 €
- Band 83 D. Hartmann
Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien
September 2001, 228 Seiten, 15 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 82 G. Kühner
Ein kosteneffizientes Verfahren für die entscheidungsunterstützende Umweltanalyse von Betrieben
September 2001, 210 Seiten, 15 €
- Band 81 I. Ellersdorfer, H. Specht, U. Fahl, A. Voß
Wettbewerb und Energieversorgungsstrukturen der Zukunft
August 2001, 172 Seiten, 13 €

- Band 80 B. Leven, J. Neubarth, C. Weber
Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen
 Mai 2001, 166 Seiten, 13 €
- Band 79 R. Krüger, U. Fahl, J. Bagemihl, D. Herrmann
Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg
 April 2001, 142 Seiten, 13 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 78 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe
 Februar 2001, 248 Seiten, 15 €
- Band 77 W. Rüdfler
Integrierte Ressourcenplanung für Baden-Württemberg
 Januar 2001, 284 Seiten, 18 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 76 S. Rivas
Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern
 Januar 2001, 200 Seiten, 15 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 75 M. Härdtlein
Ansatz zur Operationalisierung ökologischer Aspekte von "Nachhaltigkeit" am Beispiel der Produktion und Nutzung von Triticale (×Triticosecale Wittmack)-Ganzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der luftgetragenen N-Freisetzungen
 September 2000, 168 Seiten, 13 €
- Band 74 T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß
Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken
 August 2000, 118 Seiten, 10 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 73 J. Sontow
Energiewirtschaftliche Analyse einer großtechnischen Windstromerzeugung
 Juli 2000, 242 Seiten, 15 €
- Band 72 H. Hermes
Analysen zur Umsetzung rationeller Energieanwendung in kleinen und mittleren Unternehmen des Kleinverbrauchersektors
 Juli 2000, 188 Seiten, 15 €

- Band 71 C. Schaefer, C. Weber, H. Voss-Uhlenbrock, A. Schuler, F. Oosterhuis, E. Nieuwlaar, R. Angioletti, E. Kjellsson, S. Leth-Petersen, M. Togeby, J. Munksgaard
Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating - an International Empirical Analysis (EPISODE)
 Juni 2000, 146 Seiten, 13 €
- Band 70 U. Fahl, J. Baur, I. Ellersdorfer, D. Herrmann, C. Hoeck, U. Remme, H. Specht, T. Steidle, A. Stuible, A. Voß
Energieverbrauchsprognose für Bayern
 Mai 2000, 240 Seiten, 15 €
 Kurzfassung, 46 Seiten, 5 €
- Band 69 J. Baur
Verfahren zur Bestimmung optimaler Versorgungsstrukturen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete in Entwicklungsländern
 Mai 2000, 154 Seiten, 13 €
- Band 68 G. Weinrebe
Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken
 April 2000, 212 Seiten, 15 €
- Band 67 C.-O. Wene, A. Voß, T. Fried (eds.)
Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies
 April 2000, 282 Seiten, 18 €
- Band 66 A. Schuler
Entwicklung eines Modells zur Analyse des Endenergieeinsatzes in Baden-Württemberg
 März 2000, 236 Seiten, 15 €
- Band 65 A. Schäfer
Reduction of CO₂-Emissions in the Global Transportation Sector
 März 2000, 290 Seiten, 18 €
- Band 64 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture - Processes, Inventories, Mitigation -
 März 2000, 148 Seiten, 13 €
- Band 63 A. Heinz, R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer, D. Jezierska
Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten
 Dezember 1999, 308 Seiten, 20 €

- Band 62 U. Fahl, M. Blesl, D. Herrmann, C. Kemfert, U. Remme, H. Specht, A. Voß
Bedeutung der Kernenergie für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg - Auswirkungen eines Kernenergieausstiegs
 November 1999, 146 Seiten, 13 €
- Band 61 A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich
Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme
 September 1999, 138 Seiten, 10 €
- Band 60 R. Lux
Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Stromerzeugung konventioneller Kraftwerkssysteme
 September 1999, 162 Seiten, 13 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 59 M. Kayser
Energetische Nutzung hydrothermalen Erdwärmevorkommen in Deutschland - Eine energiewirtschaftliche Analyse -
 Juli 1999, 184 Seiten, 15 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 58 C. John
Emissionen von Luftverunreinigungen aus dem Straßenverkehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung - Untersuchung von Emissionsszenarien am Beispiel Baden-Württembergs
 Juni 1999, 214 Seiten, 15 €
- Band 57 T. Stelzer
Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweganalysen von Umweltwirkungen
 Mai 1999, 212 Seiten, 15 €(z. Zt. vergriffen)
- Band 56 R. Lux, J. Sontow, A. Voß
Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark
 Mai 1999, 322 Seiten, 20 €(z. Zt. vergriffen)
 Kurzfassung, 48 Seiten, 5 €
- Band 55 B. Biffar
Messung und Synthese von Wärmelastgängen in der Energieanalyse
 Mai 1999, 236 Seiten, 15 €
- Band 54 E. Fleißner
Statistische Methoden der Energiebedarfsanalyse im Kleinverbrauchersektor
 Januar 1999, 306 Seiten, 20 €

- Band 53 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (Hrsg.)
Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture
 Januar 1999, 252 Seiten, 18 €
- Band 52 J. Haug, B. Gebhardt, C. Weber, M. van Wees, U. Fahl, J. Adnot, L. Cauret, A. Pierru, F. Lantz, J.-W. Bode, J. Vis, A. van Wijk, D. Staniaszek, Z. Zavody
Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Programmes for the Promotion of Condensing Boilers
 Oktober 1998, 156 Seiten, 13 €
- Band 51 M. Blesl, A. Schweiker, C. Schlenzig
Erweiterung der Analysemöglichkeiten von NetWork - Der Netzwerkeditor
 September 1998, 112 Seiten, 10 €
- Band 50 S. Becher
Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen
 Juli 1998, 200 Seiten, 15 €
- Band 49 P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner, E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuble, A. Voß
Einbindung des ECOLOG-Modells 'E³Net' und Integration neuer methodischer Ansätze in das IKARUS-Instrumentarium (ECOLOG II)
 Juli 1998, 110 Seiten, 10 €
- Band 48 G. Poltermann, S. Berret
ISO 14000ff und Öko-Audit - Methodik und Umsetzung
 März 1998, 184 Seiten, 15 €
- Band 47 C. Schlenzig
PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung
 Januar 1998, 230 Seiten, 15 €
- Band 46 R. Friedrich, P. Bickel, W. Krewitt (Hrsg.)
External Costs of Transport
 April 1998, 144 Seiten, 13 €
- Band 45 H.-D. Hermes, E. Thöne, A. Voß, H. Despretz, G. Weimann, G. Kamelander, C. Ureta
Tools for the Dissemination and Realization of Rational Use of Energy in Small and Medium Enterprises
 Januar 1998, 352 Seiten, 20 €
- Band 44 C. Weber, A. Schuler, B. Gebhardt, H.-D. Hermes, U. Fahl, A. Voß
Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren
 Dezember 1997, 186 Seiten, 15 €

- Band 43 J. Albiger
Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung
November 1997, 168 Seiten, 13 €
- Band 42 P. Berner
Maßnahmen zur Minderung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus der Lackanwendung - Vergleich zwischen Abluftreinigung und primären Maßnahmen am Beispiel Baden-Württembergs
November 1997, 238 Seiten, 15 €
- Band 41 J. Haug, M. Sawillion, U. Fahl, A. Voß, R. Werner, K. Weiß, J. Rösch, W. Wölflé
Analysis of Impediments to the Rational Use of Energy in the Public Sector and Implementation of Third Party Financing Strategies to improve Energy Efficiency
August 1997, 122 Seiten, 10 €
- Band 40 U. Fahl, R. Krüger, E. Läge, W. Rüffler, P. Schaumann, A. Voß
Kostenvergleich verschiedener CO₂-Minderungsmaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland
August 1997, 156 Seiten, 13 €
- Band 39 M. Sawillion, B. Biffar, K. Hufendiek, R. Lux, E. Thöne
MOSAİK - Ein EDV-Instrument zur Energieberatung von Gewerbe und mittelständischer Industrie
Juli 1997, 172 Seiten, 13 €
- Band 38 M. Kaltschmitt
Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
April 1997, 108 Seiten, 10 €
- Band 37 C. Böhringer, T. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß
Volkswirtschaftliche Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer Berücksichtigung von Umweltsteuern
März 1997, 82 Seiten, 8 €
- Band 36 P. Schaumann
Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom- und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalisierten Energiemodell -
Januar 1997, 282 Seiten, 18 €
- Band 35 R. Kühner
Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme
Dezember 1996, 262 Seiten, 18 €

- Band 34 U. Fahl, P. Schaumann
Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen
November 1996, 124 Seiten, 10 €
- Band 33 W. Krewitt
Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme
November 1996, 196 Seiten, 15 €
- Band 32 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, T. Schulze, U. Fahl, A. Voß, A. Perrels, W. van Arkel, W. Pellekaan, M. O'Connor, E. Schenk, G. Ryan
Consumers' Lifestyles and Pollutant Emissions
September 1996, 118 Seiten, 10 €
- Band 31 W. Rüffler, A. Schuler, U. Fahl, H.W. Balandynowicz, A. Voß
Szenariorechnungen für das Projekt *Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg*
Juli 1996, 140 Seiten, 13 €
- Band 30 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, U. Fahl, A. Voß
Energy Consumption and Air-Borne Emissions in a Consumer Perspective
September 1996, 264 Seiten, 18 €
- Band 29 M. Hanselmann
Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
August 1996, 138 Seiten, 13 €
- Band 28 G. Schmid
Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen
August 1996, 184 Seiten, 15 €
- Band 27 A. Obermeier, J. Seier, C. John, P. Berner, R. Friedrich
TRACT: Erstellung einer Emissionsdatenbasis für TRACT
August 1996, 172 Seiten, 13 €
- Band 26 T. Hellwig
OMNIUM - Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung in Industriebetrieben
Mai 1998, 118 Seiten, 10 €
- Band 25 R. Laing
CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias
Februar 1996, 221 Seiten, 20 €

- Band 24 P. Mayerhofer, W. Krewitt, A. Trukenmüller, A. Greßmann, P. Bickel, R. Friedrich
Externe Kosten der Energieversorgung
März 1996, Kurzfassung, 40 Seiten, 3 €
- Band 23 M. Blesl, C. Schlenzig, T. Steidle, A. Voß
Entwicklung eines Energieinformationssystems
März 1996, 76 Seiten, 3 €
- Band 22 M. Kaltschmitt, A. Voß
Integration einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung in den konventionellen Kraftwerksverbund
Juni 1995, Kurzfassung, 51 Seiten, 3 €
- Band 21 U. Fahl, E. Läge, W. Ruffler, P. Schaumann, C. Böhringer, R. Krüger, A. Voß
Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg
September 1995, 454 Seiten, 26 €
Kurzfassung, 48 Seiten, 3 €
- Band 20 M. Fishedick
Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund - Technische Effekte, Kosten, Emissionen
Dezember 1995, 196 Seiten, 15 €
- Band 19 A. Obermeier
Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg
Mai 1995, 208 Seiten, 15 €
- Band 18 N. Kalume
Strukturmodule - Ein methodischer Ansatz zur Analyse von Energiesystemen in Entwicklungsländern
Dezember 1994, 113 Seiten, 10 €
- Band 17 Th. Müller
Ermittlung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung
November 1994, 142 Seiten, 10 €
- Band 16 A. Wiese
Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland
Juni 1994, 223 Seiten, 15 €

- Band 15 M. Sawillion, T. Hellwig, B. Biffar, R. Schelle, E. Thöne
Optimierung der Energieversorgung eines Industrieunternehmens unter Umweltschutz- und Wirtschaftlichkeitsaspekten - Wertanalyse-Projekt
Januar 1994, 154 Seiten, 13 €
- Band 14 M. Heymann, A. Trukenmüller, R. Friedrich
Development prospects for emission inventories and atmospheric transport and chemistry models
November 1993, 105 Seiten, 10 €
- Band 13 R. Friedrich
Ansatz zur Ermittlung optimaler Strategien zur Minderung von Luftschadstoffemissionen aus Energieumwandlungsprozessen
Juli 1992, 292 Seiten, 18 €
- Band 12 U. Fahl, M. Fishedick, M. Hanselmann, M. Kaltschmitt, A. Voß
Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentiale energiebedingter CO₂-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten
August 1992, 471 Seiten, 26 €
Kurzfassung, 45 Seiten, 5 €
- Band 11 M. Kaltschmitt, A. Wiese
Potentiale und Kosten regenerativer Energieträger in Baden-Württemberg
April 1992, 320 Seiten, 20 €
- Band 10 A. Reuter
Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützten Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern
November 1991, 170 Seiten, 13 €
- Band 9 T. Kohler
Einsatzmöglichkeiten für Heizreaktoren im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland
Juli 1991, 162 Seiten, 13 €
- Band 8 M. Mattis
Kosten und Auswirkungen von Maßnahmen zur Minderung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg
Juni 1991, 188 Seiten, 13 €
- Band 7 M. Kaltschmitt
Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs
Dezember 1990, 178 Seiten, 13 €

- Band 6 G. Schmid, A. Voß, H.W. Balandynowicz, J. Cofala, Z. Parczewski
Air Pollution Control Strategies - A Comparative Analysis for Poland and the Federal Republic of Germany
Juli 1990, 92 Seiten, 8 €
- Band 5 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb
Juli 1990, 484 Seiten, 28 €
- Band 4 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee
Juni 1990, 498 Seiten, 28 €
- Band 3 D. Kluck
Einsatzoptimierung von Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung
Mai 1990, 155 Seiten, 10 €
- Band 2 M. Fleischhauer, R. Friedrich, S. Häring, A. Haugg, J. Müller, A. Reuter, A. Voß, H.-G. Wystrcil
Grundlagen zur Abschätzung und Bewertung der von Kohlekraftwerken ausgehenden Umweltbelastungen in Entwicklungsländern
Mai 1990, 316 Seiten, 20 €
- Band 1 U. Fahl
KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft und Energiepolitik
März 1990, 265 Seiten, 18 €

