

Einfluß des Strömungszustandes (laminar / turbulent) im Wärmeträgerrohr auf den Kollektorwirkungsgradfaktor eines Finnenabsorbers

Dipl. Ing. Robert Hausner,
Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, A-8200 Gleisdorf,
Tel.: ++43 3112 5886, Fax.: ++43 3112 5886 18
Dipl. Ing. Hubert Fechner,
Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal, A-1030 Wien
Tel.: ++43 1 79747 299, Fax.: ++43 1 79747 594

Der Wärmeübergang vom Wärmeträgerrohr eines Finnenabsorbers auf das Fluid hängt bekannterweise entscheidend vom Strömungszustand ab. Laminare Strömungszustände können gegenüber turbulenten zu merkbaren Wirkungsgradverlusten führen, welche bei entsprechender Konzeption des Absorbers und der Absorberverschaltung in Abstimmung zur Anwendung oft vermeidbar sind. Eine Optimierung des Wirkungsgrades eines Kollektors durch eine entsprechende Wahl des Absorberrohres, der Absorberverschaltung und der Durchflußmengen, sollte, der gängigen Theorie entsprechend, den Kollektorsertrag gegenüber nicht optimierten Anwendungen um einige Prozente verbessern. Da im allgemeinen damit eine Steigerung des gesamten Reibungsdruckverlustes der Kollektorverschaltung einhergeht, sind dabei Grenzen durch eine sinnvolle Pumpenleistung gesetzt.

In diesem Beitrag wird die aus der Theorie abgeleitete Aussage der Wirkungsgradverbesserung bei turbulenter Strömung meßtechnisch überprüft.

1. Theoretische Aussagen

Nach /1/ (Gleichungen 6.5.17-19) errechnet sich die längenspezifische Wärmeleistung q'_u eines Finnenabsorbers mit

$$q'_u = WF' \left[S - U_L (T_f - T_a) \right] \quad \text{mit} \quad F' = \frac{U_0}{U_L} = \frac{1}{\left[D + (W - D)F \right] + \frac{WU_L}{C_b} + \frac{WU_L}{\pi D_i h_{fi}}}$$

F' [-]	Kollektorwirkungsgradfaktor	F [-]	Wirkungsgradfaktor - Finne /1/
q'_u [W/m]	Kollektorleistung je Längeneinheit	W [m]	Rohrteilung
G [W/m ²]	solare Einstrahlung	D [m]	Anbindungsbreite der Finne
S [W/m ²]	absorbierte solare Einstrahlung	D_i [m]	Rohrinnendurchmesser
T_f [°C]	Temperatur Fluid		
T_a [°C]	Umgebungstemperatur		
U_0 [W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient Fluid - Umgebung		
U_L [W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient Finne - Umgebung		
C_b [W/mK]	Wärmeübergangskoeffizient Anbindung Finne - Rohr je Längeneinheit		
h_{fi} [W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient Fluid - Rohr		

Die spezifische Wärmeleistung q'_u eines Kollektors ist damit direkt proportional dem Kollektorwirkungsgradfaktor F' und dieser hängt wieder vom Wärmeübergangskoeffizienten Fluid - Rohr h_{fi} ab. Der Einfluß von h_{fi} auf F' ist umso stärker, je höher der Wärmeübergangskoeffizient Finne - Umgebung U_L ist.

Der Wärmeübergangskoeffizient Fluid - Rohr h_{fi} ist sehr stark vom Strömungszustand im Rohr abhängig. h_{fi} kann nach /2/, unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des Fluids und der Geometrie des Rohres errechnet werden. h_{fi} -Werte im Laminarbereich von etwa 200 - 500 W/m²K und im turbulenten Bereich von etwa 1000 - 3000 W/m²K, mit entsprechenden Übergängen dazwischen, werden erreicht.

2. Folgerungen für die Praxis

Übliche Betriebszustände von Kollektoren liegen im laminaren Bereich (Reynoldszahl $Re < 2320$) bzw. im Übergangsbereich laminar - turbulent ($2320 \leq Re < 10000$). Seltener wird voll turbulente Strömung erreicht ($Re \geq 10000$). Typische Strömungsgeschwindigkeiten im Rohr liegen bei 0,03 bis 0,06 m/s bei Harfen-, bzw. bei 0,3 bis 0,6 m/s bei Mäanderrohren. Mit einer kinematischen Zähigkeit von Wasser von etwa $1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ bei 20°C bzw. etwa $3.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ bei 100°C ergeben sich Reynoldszahlen von etwa 300 bis etwa 2000 bei der Harfenverrohrung, bzw. etwa 2000 bis etwa 15000 beim Mäander. Bei üblichen Frostschutzmittelmischungen sinken die Reynoldszahlen auf etwa 20 % bis 50 % dieser Werte ab.

Eine überschlägige Rechnung für marktübliche Absorber zeigt, daß die Summe der ersten beiden Terme des Nenners obiger Gleichung etwa im Bereich von 1,05 bis 1,1 liegt und der letzte für den Strömungszustand maßgebende Term für hoch turbulente Strömung bei etwa $< 0,01$, für laminare Strömung jedoch im Bereich von 0,04 bis 0,10 liegen kann. Das bedeutet, daß der Kollektorwirkungsgradfaktor F' und damit auch der Kollektorwirkungsgrad η eine Abhängigkeit vom Strömungszustand um einige Prozente (etwa 3 - 8 % rel.) aufweisen kann. Daraus folgt weiters, daß ein Kollektor, der im laminaren Zustand vermessen wurde und im Einsatz eher in den turbulenten Bereich kommt, bessere Erträge bringt, als dem Prüfzeugnis entspricht (Abbildung 1); aber es ist auch umgekehrt möglich (z. B.: Prüfung mit Wasser, Betrieb mit Frostschutzmittelmischung).

Für die Kollektorprüfung kann es auch bedeuten, daß sich wegen der starken Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit des Fluids im unteren Temperaturbereich laminare und im oberen Temperaturbereich günstigere Strömungszustände aus dem Übergangsbereich laminar-turbulent einstellen. Eine solche Kennlinie sollte daher im Übergangsbereich einen Anstieg aufweisen, der in der Prüfpraxis aufgrund der Meßwertstreuungen und großen Abstände der Meßpunkte bei der regressionsanalytischen Auswertung nicht unbedingt auffällt.

3. Simulation und meßtechnischer Nachweis

Zur quantitativen Ermittlung wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, das, ausgehend von den geometrischen und physikalischen Verhältnissen des Kollektors seine Kollektorkennlinie theoretisch errechnen läßt /1,2/. Es wird dabei insbesondere die Absorbergeometrie (Finne, Rohr), seine Beschichtung, die Kollektorabdeckung und -dämmung und der Strömungszustand des Fluids detailliert berücksichtigt. Ein Absorberstreifen wird abschnittsweise über seine Länge simuliert. Alternativ kann auch eine gemessene Kennlinie als Eingabe verwendet und diese auf andere Betriebszustände umgerechnet werden. Ungleiche Strömungsverteilungen auf parallel geschaltete Absorberrohre werden iterativ unter Berücksichtigung der strömungsverteilungsabhängigen Widerstandsbeiwerte der Rohrabzweigungsstücke ebenso wie temperatur- und konzentrationsabhängige Eigenschaften des Fluids in Rechnung gestellt.

Im Rahmen von Kollektortests am Österreichischen Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal wurden an zwei geeigneten Kollektoren Meßreihen zur Ermittlung der Abhängigkeit des Kollektorwirkungsgrades von der Strömungsform bei konstanter Kollektormitteltemperatur bei variierter Durchflußmenge durchgeführt. In den Abbildung 2 und 3 sind Meßergebnisse der Simulation gegenübergestellt.

Die Simulation sagt deutliche Wirkungsgradanstiege voraus. Für den in der Abbildung 2 (nicht selektive Beschichtung) dargestellten Bereich wurden 4,9 % (8,4 % rel.) errechnet. Da im unteren laminaren Bereich der vermessene Kollektor über einen sehr weiten Temperaturbereich betrieben wird, wird hier die Kennlinienkrümmung als zusätzlicher Einfluß merkbar. Eine Berechnung zeigt, daß im gegebenen Fall nur 0,65 % auf die im unteren laminaren Bereich sich merkbar auswirkende Krümmung der Kollektorkennlinie entfallen, die restlichen 4,25 % sind Auswirkungen unterschiedlicher Strömungszustände zuzuschreiben. Der Anstieg ist besonders im Bereich zwischen etwa 120 und 150 kg/h Durchflußmenge (Umschlagbereich) sehr steil.

Die Messung zeigt ebenfalls einen deutlichen Anstieg (3,8 % - 6,5 % rel - über den gesamten Bereich, das sind etwa 75 % des theoretischen Wertes) bei dem auch der Umschlagbereich

erkennbar ist. Eine Erklärung für diesen geringeren Wert - zumindest zum Teil - kann sein, daß aus dem Fertigungsprozeß stammende Störstellen (unsaubere Schnittkanten, Lötstellen) im Bereich der Einlauf-T-Stücke der Absorberrohre zusätzliche Verwirbelungen verursachen, welche sich im laminaren Bereich stärker auswirken.

Der Umschlag von laminarer auf turbulente Strömung ist auch am gemessenen Druckverlust sichtbar und entspricht hier beinahe exakt der Simulation. Der Druckverlust wurde hier als Gesamtdruckverlust gebrochen durch Quadrat der Durchflußmenge dargestellt. Man erkennt die ausgezeichnete Übereinstimmung von theoretischen und gemessenen Werten im Übergangsbereich und die gute Übereinstimmung im oberen laminaren Bereich und im anschließenden Umschlagbereich.

Der Wirkungsgrad des selektiv beschichteten Kollektors (Abbildung 3) zeigt erwartungsgemäß eine geringere Abhängigkeit vom Strömungszustand. Der Wirkungsgradanstieg mit zunehmender Durchflußmenge ist auch hier gegeben. Details gehen hier in der Meßwertstreuung unter.

4. Pumpenleistung

Die Verbesserung des Wärmeüberganges durch Übergang zu turbulenter Strömung erhöht den Druckverlust. Die damit verbundene Pumpenleistungserhöhung wurde beispielhaft rechnerisch ermittelt. Für zwei Kollektorfelder (selektiv und nicht selektiv) wurden Absorberstreifen unterschiedlich verschalten (Abbildung 4), und der Reibungsdruckverlust und die thermische Kollektorleistung für einen häufig auftretenden Betriebszustand rechnerisch unter Berücksichtigung des ermittelten Anpassungsfaktors (siehe Abbildung 2) für den gesamten Kollektorkreis (Rohre, Armaturen, Wärmetauscher) errechnet. Die notwendige elektrische Pumpenleistung wurde aus der hydraulischen über den Pumpenwirkungsgrad /3/ errechnet.

Bei diesem Beispiel beträgt gegenüber der rein parallelen Verschaltung (welche häufig in der Praxis anzutreffen ist) der thermische Leistungsgewinn der optimalen Variante (3 parallel x 12 seriell) 157 W (3,7 % rel.) beim selektiven, bzw. 207 W (6,3 % rel.) beim nicht selektiven Typ und es sind dafür zusätzlich 10 W elektrisch (19 % rel.) aufzuwenden.

Bei derzeit in Entwicklung befindlichen Kleinpumpen mit wesentlich verbessertem Wirkungsgrad /3/, sind für die Zukunft noch günstigere Verhältnisse zu erwarten.

5. Literatur

/1/ J. A. Duffie, W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 1991

/2/ VDI- Wärmeatlas 1991

/3/ Th. Staubli, J. Niplow, Wirkungsgradverbesserung bei Kleinumwälzpumpen, Pumpentagung, Karlsruhe 1996

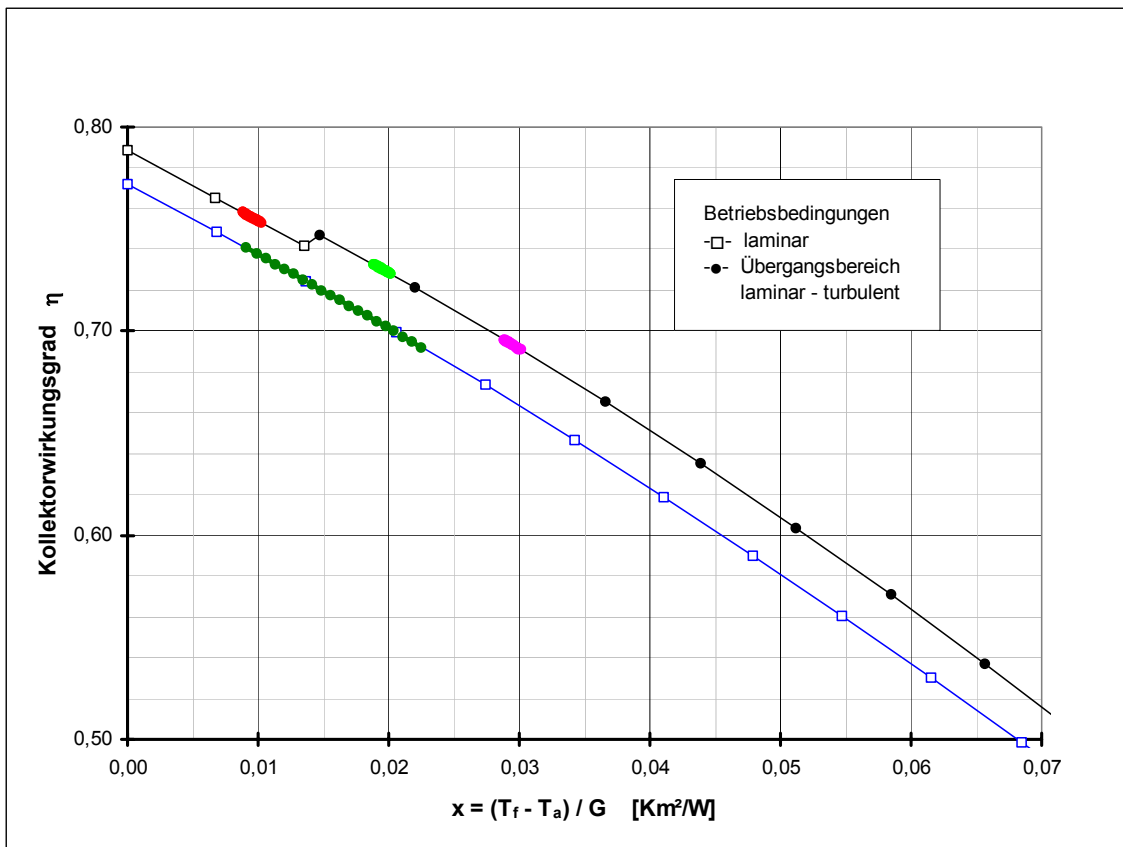


Abbildung 1: Simulation der Verbesserung einer Kollektorkennlinie durch Übergang von laminare auf turbulente Strömung.

Untere Kurve: Beispiel eines im extremen Laminarbereich vermessenen Kollektors mit Harfenverschaltung (Testbericht Rapperswil 95, Fluid: 33,3% Ethylenglykol). Das darauf eingezeichnete Beispiel eines Kollektor-Betriebszustandes (dicke Linie, Kollektoreintritt $x = 0,009$ bis Kollektoraustritt $x = 0,022$) hat folgende mittlere Kennwerte: Strömungsgeschwindigkeit $v = 0,037$ m/s, Reynoldszahl $Re = 240$, Wärmeübergangskoeffizient Rohr / Fluid $h_{fi} = 218$ W/m²K, Kollektorwirkungsgradfaktor $F' = 0,923$, Reibungsdruckverlust (ohne Sammelrohre) $\Delta p = 0,05$ kPa.

Obere Kurve: Aus der unteren Kurve durch Simulation errechnete Kennlinie des gleichen Kollektors für die **zehnfache Durchflußmenge** bei gleichem Fluid. Bis $x = 0,014$ ist hier noch laminare Strömung, darüber Strömung aus dem Übergangsgebiet laminar-turbulent. Die drei eingezeichneten Kollektorbetriebszustände auf dieser Linie (dicke Liniestücke bei $x = 0,01, 0,02$ und $0,03$) haben folgende Kennwerte: $v = 0,37$ m/s, $Re = 2020, 2540$ und 3130 , $h_{fi} = 404, 933$ und 1157 W/m²K, $F' = 0,944, 0,957$ und $0,958$, $\Delta p = 0,52, 0,77$ und $0,73$ kPa.

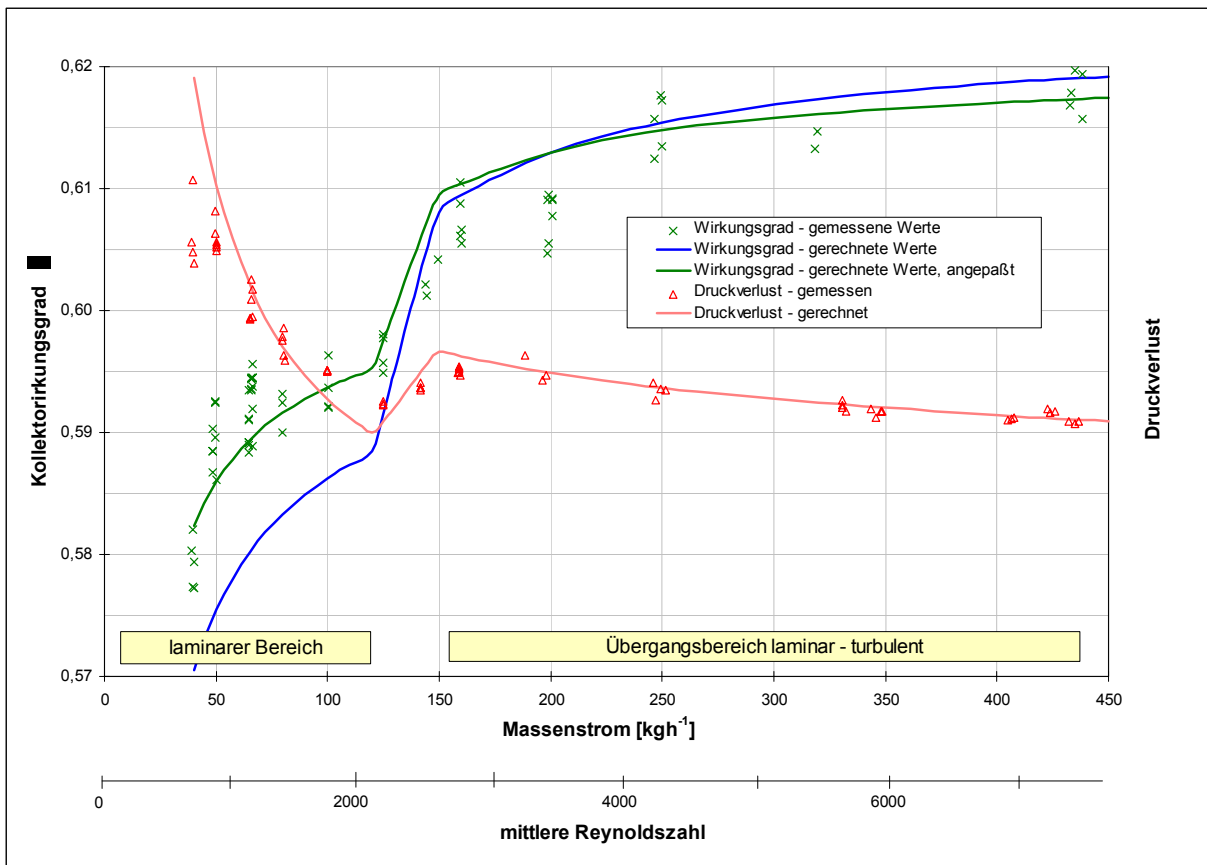


Abbildung 2: Gegenüberstellung der simulierten Abhängigkeit des Kollektorwirkungsgrades von der Durchflußmenge eines nicht selektiv beschichteten Finnenkollektors mit Harfenverschaltung zu gemessenen Werten für das Medium Wasser, eine mittlere Fluidtemperatur $T_f = 32 \text{ °C}$, eine solare Einstrahlung $G = 909 \text{ W/m}^2$ und eine Umgebungstemperatur $T_a = 20 \text{ °C}$ (durchgezogene Kurve).

Diese Kurve wurde weiters mit einem Anpassungsfaktor an die Meßdaten angepaßt (strichlierte Kurve). Der Anpassungsfaktor wurde als multiplikativer Korrekturwert, der auf die theoretischen Wirkungsgradänderungen angewendet wird, definiert. Er wurde mit einem Wert von 0,72 so festgelegt, daß die Messpunkte ausreichend gut durch die angepaßte theoretische Kurve dargestellt werden. Das bedeutet, daß die gemessenen, durch Variation der Durchflußmenge verursachten Änderungen im Wirkungsgrad nur etwa 72 % der theoretischen betragen.

Die näherungsweise eingetragenen Reynoldszahlen sind Durchschnittswerte über die gesamte Kollektorverschaltung.

Dargestellt ist weiters der gemessene und der gerechnete Druckverlust der gesamten Kollektorverschaltung (gesamter Druckverlust inkl. Sammelrohre und T-Stücke) gebrochen durch das Quadrat des Massenstroms - punktierte Kurve.

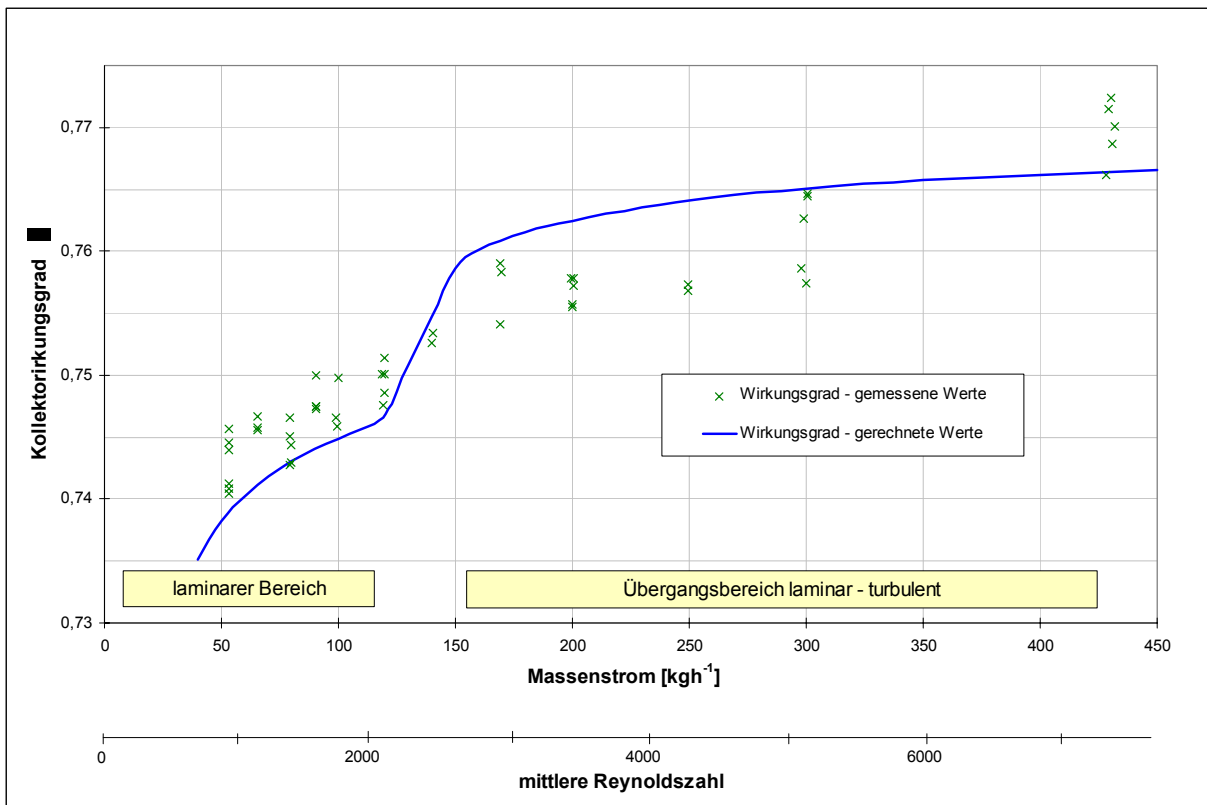


Abbildung 3: Gegenüberstellung der simulierten Abhängigkeit des Kollektorwirkungsgrades von der Durchflußmenge eines selektiv beschichteten Finnenkollektors mit Harfenverschaltung zu gemessenen Werten für das Medium Wasser, eine mittlere Fluidtemperatur $T_f = 32 \text{ °C}$, eine solare Einstrahlung $G = 879 \text{ W/m}^2$ und eine Umgebungstemperatur $T_a = 20 \text{ °C}$. Auf die Bestimmung eines Anpassungsfaktors wurde hier wegen der im Vergleich zur gesamten Wirkungsgradänderung relativ größeren Meßwertstreuungen verzichtet. Die näherungsweise eingetragenen Reynoldszahlen sind Durchschnittswerte.

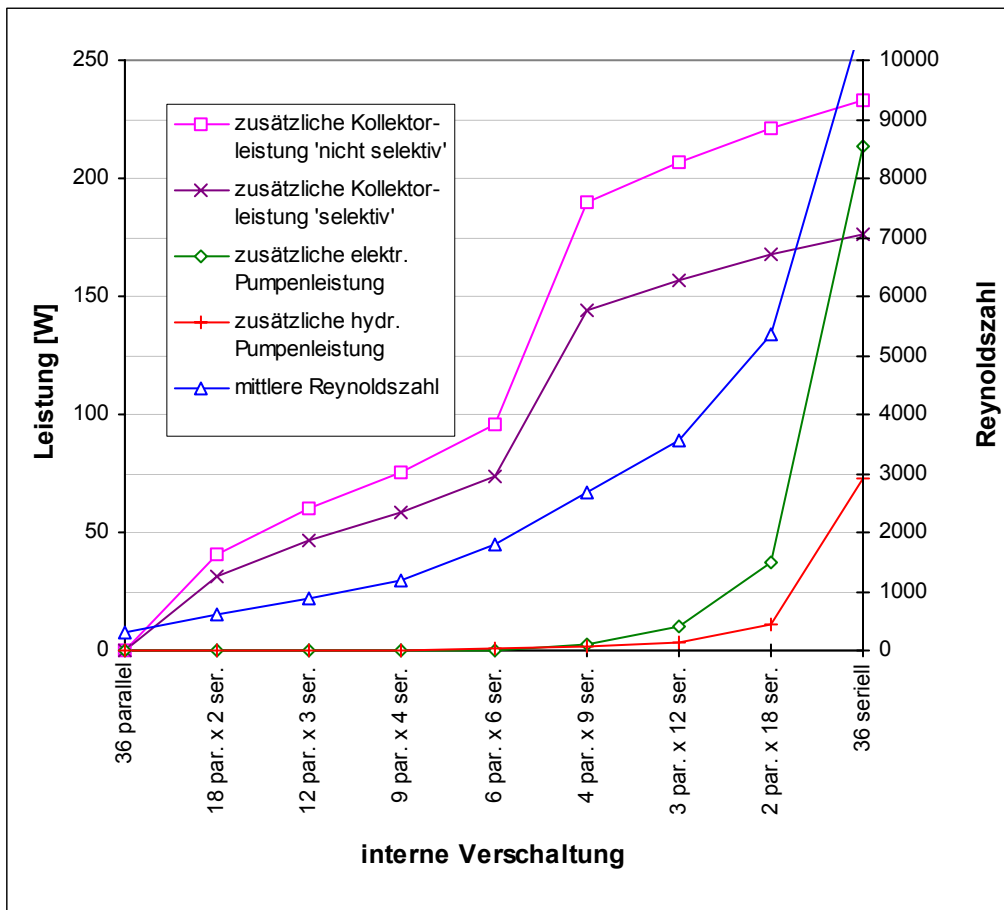


Abbildung 4: Simulationsergebnisse für Leistungsgewinn und aufzuwendende zusätzliche Pumpenleistung für ein beispielhaftes Kollektorfeld (9 m^2 Streifenabsorber, selektiv, bzw. nicht selektiv beschichtet) für einen häufig auftretenden Betriebszustand. Fluid: 35 % Propylenglykol, spez. Durchflußmenge $50 \text{ kg/m}^2\text{h}$, mittlere Fluidtemperatur $50 \text{ }^\circ\text{C}$, Umgebungstemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$, solare Einstrahlung 800 W/m^2 .

Die interne Verschaltung der 36 Absorberstreifen erfolgte in unterschiedlichen Varianten beginnend von vollständiger Parallelschaltung, bis zu vollständiger Serienschaltung. Bei der ersten Variante (36 parallel) beträgt die für den gesamten Kollektorkreis notwendige hydraulische Pumpenleistung $1,5 \text{ W}$. Dafür sind etwa 54 W elektrisch aufzuwenden $/3/$. Die thermische Kollektorleistung beträgt hier 4270 W für den selektiven Typ bzw. 3370 W für den nicht selektiven.

In diesem speziellen Beispiel liegt die optimale Verschaltung (bezogen auf den gewählten Betriebszustand) bei 3 Streifen parallel und 12 solcher Gruppen in Serie, da hier der zusätzliche Kollektorleistungsgewinn gegenüber der benachbarten Verschaltungsvariante (13 W beim selektiven bzw. 17 W beim nicht selektiven) noch die zusätzlich aufzuwendende Pumpenleistung (7 W) übertrifft. Bei Einbeziehung des Primärenergieaufwandes zur Bereitstellung der elektrischen Energie wäre die Variante 4 parallel x 9 seriell optimal, was aber zu konstruktiven Problemen bei diesem Kollektortyp führen würde.