

Bundesnetzagentur: Strombegrenzung auf 4,2 kW bei Netzüberlastung

Um die Stromnetze nicht durch die erheblich steigende Zahl von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen zu überlasten hat die Bundesnetzagentur Regelungen mit den Stromnetzbetreibern vereinbart, wie die steuerbaren Verbrauchseinrichtungen sicher und zügig integriert werden können.

Damit immer eine Mindestleistung zur Verfügung steht können die Netzbetreiber bei einer konkreten Überlastung den Strombezug auf 4,2 kW begrenzen.

Bei den Ladeeinrichtungen für E-Autos werden dadurch nur die Ladezeiten verlängert, bei den Wärmepumpen gemäß dem aktuellen Stand der Technik werden sich jedoch katastrophale Auswirkungen ergeben. Es wird kein Strom durch die Begrenzung auf 4,2 kW eingespart, stattdessen werden die Ladevorgänge für Heizen und Warmwasser-Erwärmung durch zu wenig Energie unterbrochen, im Heizkreis der Wärmepumpe erreicht man nicht die für eine Erhöhung notwendigen Temperaturen, sodass diese ständig weiter absinken - der dem Netz entnommene Strom erhöht dadurch nur den Zählerstand, ohne irgendeine nützliche Wirkung zu erreichen!

Beweise dafür sind der eigenen Wärmepumpenanlage entnommen worden durch eine exakte Aufzeichnung von Stromtemperaturen im Minutentakt und der entsprechenden Zählerstände sowie Grafiken, die den genauen Ablauf zeigen. Als einem der Beispiele von den an mehreren Tagen vorgenommenen Aufzeichnungen werden dafür die Daten vom 19.10.2023 als Auszug von der umfangreichen Datei WB2-ZE7 beigefügt.

Die Tabelle zeigt eine Brauchwasser-Erwärmung. Die Wärmepumpe schaltet sich ein, wenn im Brauchwasserspeicher die Temperatur von 45°C unterschritten wird, sobald die Temperatur von 50°C erreicht wird schaltet sich die Wärmepumpe wieder ab oder schaltet sich um wie in diesem Fall auf Heizen, weil die Heizungstemperatur sehr weit auf nur noch 32,6°C abgesunken ist.

Die Heizungstemperatur ist die externe Vorlauftemperatur VL_{ext} der vom Speicher in die Heizkörperanlage fließenden Wärme, die Brauchwassertemperatur BW wird im Speicher erfasst, der jeweilige Stromverbrauch ist dem Wärme-Zähler zu entnehmen. Bei den Grafiken geht es um einige der von der Wärmepumpe dauerhaft gespeicherten Daten, die Heizkreisvorlauftemperatur und die Brauchwassertemperatur.

Die Brauchwasser-Erwärmung kann man sowohl in der Tabelle wie bei den Grafiken verfolgen, sie startete um 18.08 Uhr durch den Rückgang der Temperatur unter 45°C. Wer sich die Tabelle genau ansieht wird erkennen, dass die Temperatur nicht ansteigt, sondern sich sogar deutlich um fast ein Grad verringert, was man ebenso auch auf den Grafiken sehen kann.

Der Vorgang ging durch eine Umschaltung auf Heizen über, weil die Temperatur in der Heizungsanlage von 36,8°C um 18.05 Uhr während der Erwärmung von Brauchwasser auf 32,6°C um 18.50 Uhr abgesunken war.

Die Brauchwasser-Erwärmung dauerte 40 Minuten und benötigte dafür 10 kWh (der Zählerstand erhöhte sich von 325.332 kWh auf 325.342 kWh). Da nach dem Start der Wärmepumpe zunächst nur Wärme mit einer noch geringen Temperatur erzeugt wird und diese in den Speicher geleitet wird, verringert sich dessen Temperatur deutlich von 45°C bis auf 44,1°C. Es dauert 26 Minuten bis 18.34 Uhr, erst dann konnte durch die allmählich weiter ansteigende Heizkreistemperatur der Wärmepumpe die Temperatur im Wasserspeicher wieder auf 45,0°C ansteigen, also den Wert, den es bereits beim Start der Wärmepumpe gab. Allein dafür wurden 6 kWh Strom benötigt (Zählerstand 325.338 kWh), weitere 4 kWh Strom waren nötig, um die Brauchwassertemperatur wie beabsichtigt wieder auf 50,0°C zu erhöhen (Zählerstand 325.342 kWh).

Es war mir wichtig, die Daten dieses Vorgangs so detailliert darzustellen, um konkret nachweisen zu können, welche Probleme entstehen werden, weil durch "dimmen" nur 4,2 kWh Strom zur Verfügung stehen bei den häufig zu erwartenden Überlastungen der Stromnetze, wenn im Winterhalbjahr die Wärmepumpen in kurzen zeitlichen Abständen wieder die Heiztemperatur und teils auch die Warmwassertemperatur erhöhen müssen.

Man muss dabei berücksichtigen, dass Photovoltaikanlagen in den drei kältesten Monaten des Jahres nicht mehr genug Strom für die Haushalte liefern können, keine 94 kWh im Monat mehr für Warmwasser, erst recht keinen Strom für Wärmepumpen und E-Autos.

Im Gegensatz zu dem bestehenden System der Wärmepumpen könnte deutlich Strom eingespart werden, wenn durch das von mir entwickelte neue Verfahren nach dem Start zunächst die Wärme mit der noch sehr niedrigen Temperatur genutzt wird für eine Erhöhung der Quellentemperaturen, sodass aufgrund der dann geringeren Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Heizkreis weniger Strom benötigt wird.

Die möglichen Veränderungen mittels der Speicherung von Wärme im Erdreich oder im Speicher, insbesondere durch die zu nutzende Anergie gleich nach dem Start der Wärmepumpe, sollten durch die einzelnen Grafiken des Betriebsablaufs jedem deutlich werden.

Dies ist von "Experten" bisher nicht verstanden worden, man meint wie bisher konkrete Bilanzbereiche ansetzen zu müssen, obwohl stattdessen jeweils die Wärmeausbreitung im Erdreich zugrundegelegt werden muss - meine Annahmen dafür sind bereits 2018 vom Deutschen Geoforschungszentrum Potsdam untersucht und als den realen Gegebenheiten entsprechend bestätigt worden.

Das Ziel der Bundesnetzagentur, die steuerbaren Verbrauchseinrichtungen sicher und zügig zu integrieren, wird man keinesfalls erreichen können, weil die Maßnahmen sich bei Wärmepumpen nicht umsetzen lassen - stattdessen würden sich im Stromsektor extreme Probleme ergeben, möglicherweise in Teilbereichen sogar komplette Ausfälle.

Datum 19.10.2023

Außentemperatur 8,9°C (6,5 / 7,5 / 8,8 °C)

Brauchwasser-ErwärmungEIN bei 45°C, AUS bei 50°C

Zeit	GM	VL	RL	VL _{ext}	Wärme-Z.	BW
17.55	25	40,9	42,0	37,5	325.332	45,1
18.05	5	40,1	41,9	36,8		<u>45,0</u>
<u>BW Start</u>						
18.08	-8	39,8	30,3	36,3		44,9
.09	-12	36,3	27,5	36,2	<u>325.333</u>	44,9
.10	-16	34,0	27,5	36,1		44,8
.11	-20	33,5	27,6	36,1		44,8
.12	-24	33,3	28,6	36,0		44,7
.13	-28	34,8	33,4	35,9	<u>325.334</u>	44,7
.14	-32	37,4	33,8	35,8		44,7
.15	-36	38,6	34,1	35,8		44,6
.16	-41	39,2	34,5	35,7		44,5
.17	-45	39,5	35,6	35,6	<u>325.335</u>	44,4
.18	-50	40,7	37,8	35,5		44,4
.19	-54	42,9	38,9	35,3		44,3
.20	-59	43,3	39,1	35,2		44,3
.21	-64	43,7	39,6	35,1		44,2
.22	-69	44,1	40,2	35,0	<u>325.336</u>	44,2
.23	-74	44,8	41,7	34,9		44,1
.24	-79	45,7	42,3	34,8		44,1
.25	-84	46,1	42,6	34,8		44,1
.26	-90	46,9	43,2	34,7		44,2
.27	-95	47,4	43,6	34,6	<u>325.337</u>	44,2
.28	-101	47,9	44,3	34,5		44,2
.29	-106	48,3	44,9	34,4		44,3
.30	-112	49,5	45,5	34,3		44,3
18.31	-118	49,6	46,0	34,2		44,4

→ Fortsetzung der Aufzeichnung

Anlage 5 vom 19.10.2023**Teil 1: Exakte Aufzeichnungen der Temperaturwerte**

Datum 19.10.2023

Außentemperatur 8,9°C

(6,5 / 7,5 / 8,8 °C)

Brauchwasser-Erwärmung

(Fortsetzung der Aufzeichnung)

Zeit	GM	VL	RL	<u>VL_{ext}</u>	<u>Wärme-Z.</u>	<u>BW</u>
18.32	-124	50,0	46,4	34,1		44,5
.33	-130	50,6	47,0	34,0	<u>325.338</u>	44,7
.34	-136	50,9	47,5	33,9		<u>45,0</u>
.35	-143	51,6	48,2	33,7		45,2
.36	-149	52,2	48,8	33,6		45,4
.37	-155	52,6	49,3	33,5		45,7
.38	-162	53,1	49,5	33,4	<u>325.339</u>	46,3
.39	-169	53,4	50,0	33,3		46,6
.40	-169	53,8	50,4	33,3		46,8
.41	-169	54,5	51,0	33,2		47,2
.42	-169	54,8	51,5	33,2		47,5
.43	-169	55,0	51,8	33,1	<u>325.340</u>	47,8
.44	-169	55,6	52,2	33,0		48,2
.45	-169	56,0	52,6	32,9		48,5
.46	-169	56,3	53,0	32,8		48,8
.47	-169	56,7	53,4	32,8	<u>325.341</u>	49,1
.48	-169	57,3	53,9	32,7		49,4
.49	-169	57,6	54,3	32,7		49,8
18.50	-169	57,9	54,5	<u>32,6</u>	<u>325.342</u>	<u>50,1</u>

Umschaltung von Brauchwasser auf Heizen

18.51	-169	43,5	32,3	<u>38,2</u>		50,5
.52	-169	40,4	32,5	38,6	325.343	50,9
.53	-169	38,7	32,8	38,4		51,3
.54	-169	38,5	32,9	38,1		51,5
.55	-169	38,5	33,9	38,0		51,6
.56	-169	38,5	33,1	38,1	325.344	51,8
.57	-169	38,5	33,1	38,1		52,0
.58	-169	38,6	33,2	38,2		52,2
18.59	-169	38,6	33,4	38,4		52,3

→ Fortsetzung der Aufzeichnung

Datum 19.10.2023

Außentemperatur 8,9°C

(6,5 / 7,5 / 8,8 °C)

Heizen (Fortsetzung der Aufzeichnung)

Zeit	GM	VL	RL	VL _{ext}	Wärme-Z.	BW
19.00	-169	38,7	33,6	38,5	325.445	52,4
.01	-169	39,3	35,0	38,6		52,6
.02	-169	39,8	35,5	38,9		52,7
.03	-169	40,5	35,8	39,2		52,8
.04	-169	40,8	36,0	39,6		52,9
.05	-169	41,1	36,2	39,9	325.346	52,9
.06	-168	41,4	36,5	40,3		53,0
.07	-168	41,6	36,7	40,6		53,0
.08	-167	41,7	36,8	40,8		53,0
.09	-166	41,9	37,2	41,1	325.347	53,1
.10	-165	42,1	37,9	41,4		53,1
.11	-164	42,3	37,8	41,7		53,1
.12	-162	42,6	38,1	41,9		53,1
.13	-160	42,8	38,3	42,1	325.348	53,1
.14	-158	43,1	38,5	42,3		53,1
.15	-155	43,3	38,7	42,5		53,1
.16	-153	43,6	38,9	42,8		53,1
.17	-150	43,8	39,2	43,0	325.349	53,1
.18	-147	44,0	39,5	43,3		53,1
.19	-143	44,3	39,7	43,5		53,1
.20	-140	44,5	44,0	43,7		53,1
.21	-136	44,7	40,2	44,0	325.350	53,1
.22	-132	44,9	40,4	44,2		53,1
.23	-128	45,1	40,6	44,4		53,1
.24	-123	45,3	40,9	44,7		53,1
19.25	-118	45,5	41,4	44,9	325.351	53,1
Heizen Ende						
19.26	+ 6	45,7	41,2	45,1		53,1

Informationen zu den Grafiken der aufgezeichneten Temperaturen vom 19.10.2023

Die Grafiken 5.1 bis 5.8 ergänzen die tabellarischen Aufzeichnungen der Temperaturen einer Sole/Wasser-Wärmepumpe für eine Radiatorenheizung in einem Bestandsgebäude und deren Brauchwassererwärmung, die Nennleistung beträgt 15 kW.

Aufgezeichnet wurden am 19.10.2023

die Vorlauftemperatur VL im Heizkreis = BT2 (rot),

die Brauchwassertemperatur im Speicher = BT6 (blau)

und bei den Grafiken 5.6 bis 5.8 zusätzlich auch die Heißgastemperatur = BT14 (lila-farben).

Calc. Supply zeigt den Mittelwert der eingestellten Heiztemperatur von 40°C (schwarz).

Schwarze Linien kennzeichnen auch die Brauchwassertemperatur von 45°C für den Start der Erwärmung sowie an deren Ende von 50°C für die Abschaltung der Wärmepumpe.

Die Dauer eines Vorgangs oder eines Teils davon wird angegeben am oberen Rand der Grafik, gekennzeichnet durch die beiden vertikalen Linien.

Aufgenommen wurden die Daten am Abend bei einer Außentemperatur von 8,9°C.

Die Grafik 5.1 zeigt den gesamten Tagesverlauf über 24 Stunden, die Zeiten werden am unteren Rand angegeben. In der Nacht und ein zweites Mal gegen Abend ist jeweils das Brauchwasser wieder erwärmt worden, sobald dessen Temperatur unter 45°C absinkt.

Grafik 5.2 ist ein Ausschnitt des Tages mit der Brauchwassererwärmung am Abend und einem direkt anschließenden Heizvorgang zu dem Zeitpunkt, an dem die Brauchwassertemperatur wieder 50°C erreicht. Dies dauert insgesamt eine Stunde und 16 Minuten.

Allein 40 Minuten davon entfallen auf die Brauchwassererwärmung, wie die Grafik 5.3 zeigt, die restlichen 36 Minuten in Grafik 5.4 benötigt der Heizvorgang nach dessen Umschaltung, was ungefähr den anderen Heizvorgängen entspricht.

Nach dem Start der Wärmepumpe zur Brauchwassererwärmung fällt die Vorlauftemperatur zunächst deutlich ab, wie man der Grafik 5.5 entnehmen kann. Das führt zu einem großen Unterschied zur Temperatur im Brauchwasserspeicher, dem nun deutlich kühleres Wasser zugeführt wird mit der Folge, dass die Temperatur im Speicher nicht ansteigt, sondern um fast ein Grad auf 44,1°C absinkt (wie man den tabellarischen Daten entnehmen kann).

Es dauert nun 26 Minuten, bis das Brauchwasser wieder die zu Beginn des Vorgangs vorhandene Temperatur von 45°C erreicht und dann erst die Temperatur im Speicher wieder ansteigt. An den im Minutentakt aufgenommenen Daten kann man feststellen, dass allein für den Ausgleich dieses Temperaturabfalls in diesen 26 Minuten bereits 6 kWh Strom verbraucht worden sind, für den Temperaturanstieg auf 50°C sind dann nur noch weitere 4 kWh benötigt worden.

Der nach dem Start der Wärmepumpe als Anergie zu betrachtende Stromanteil von 6 kWh ist zwar erforderlich, um die Heizkreisvorlauftemperatur zunächst so weit zu steigern, dass schließlich die Brauchwassertemperatur oder die Heiztemperatur wieder erhöht werden kann, ist aber zusätzlich auch noch anders zu nutzen - das ist neu.

Ein für Wärmepumpen entwickeltes Verfahren ermöglicht durch ein multifunktionales Regelsystem eine ganzjährige Regeneration der Wärmequelle einer Sole/Wasser-Wärmepumpe bzw. eines Wärmespeichers einer Luft/Wasser-Wärmepumpe.

Dafür kann nicht nur entweder etwas Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe in deren Quellenkreis übertragen werden oder zeitweise auch überschüssiger Strom in Wärme umgewandelt und gespeichert werden, es lässt sich auch - wie in den Grafiken zu sehen ist - die bei jedem Start anfallende Anergie für die Erhöhung der Quellentemperatur nutzen.

Es muss lediglich die Wärme im Heizkreisvorlauf statt in den Brauchwasserspeicher oder in den Heizkreis über ein Dreiwegeventil in einen Wärmetauscher und von dort weiter in die Quelle geleitet werden. Diese Umleitung von Wärme endet erst dann, wenn die Heizkreisvorlauftemperatur die notwendige Temperatur beispielsweise für eine Erhöhung der Brauchwassertemperatur erreicht hat, es kommt dadurch nicht mehr zu einer Temperaturabsenkung im Speicher, die dafür anschließend notwendige zusätzliche Energie entfällt.

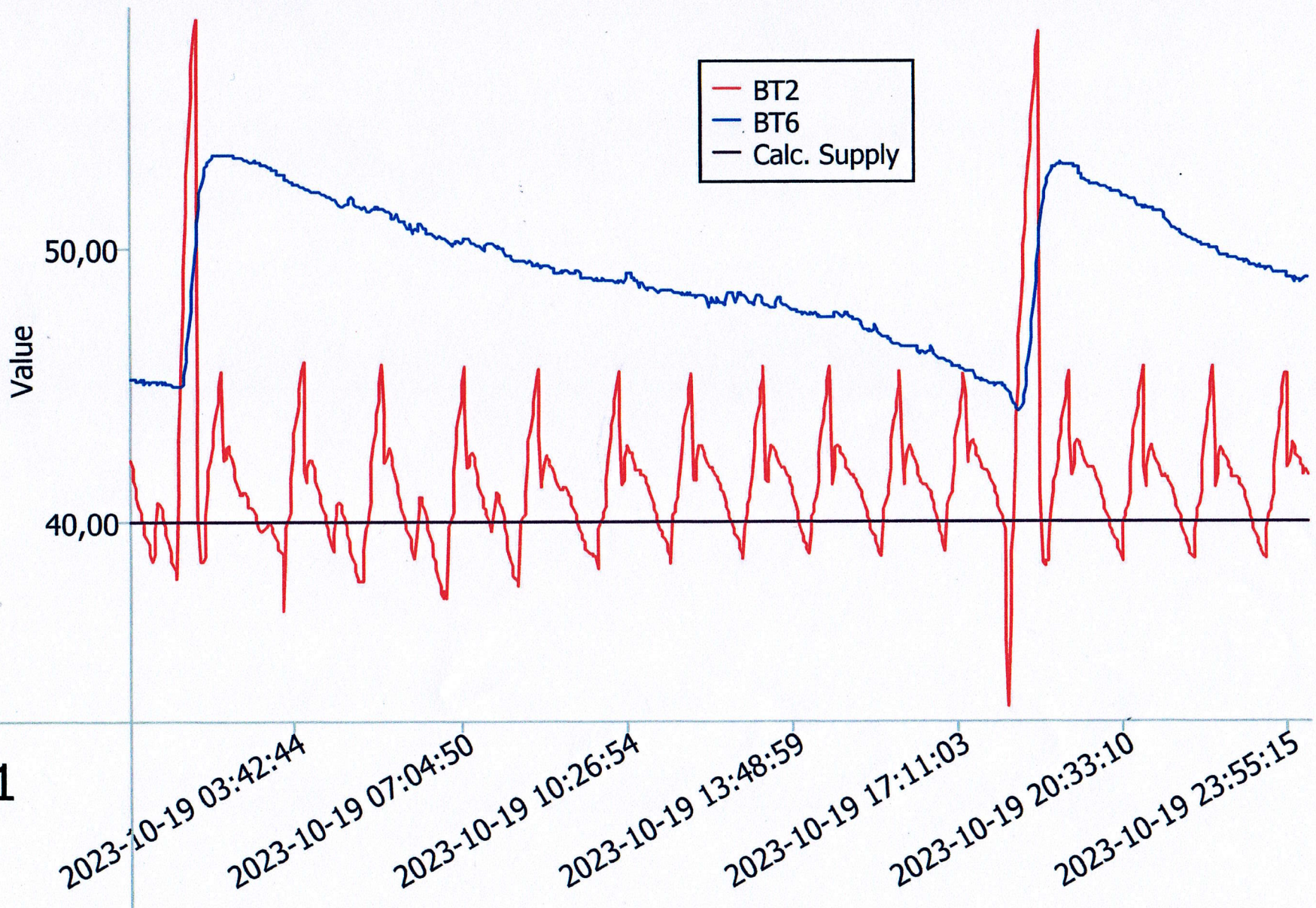
Diese Umleitung von Wärme führt weder zu einem geringeren noch zu einem höheren Stromverbrauch. Durch diese Umleitung von Wärme erreicht man jedoch eine deutliche Steigerung der Quellentemperaturen, die sich im Laufe des Jahres bei Erdwärmepumpen sonst von etwa 12°C auf 0°C verringern, bei den von der Außenluft abhängigen Wärmepumpen von etwa 25°C bis auf -15°C, während die umgeleiteten Vorlauftemperaturen dagegen das ganze Jahr weit darüber liegen.

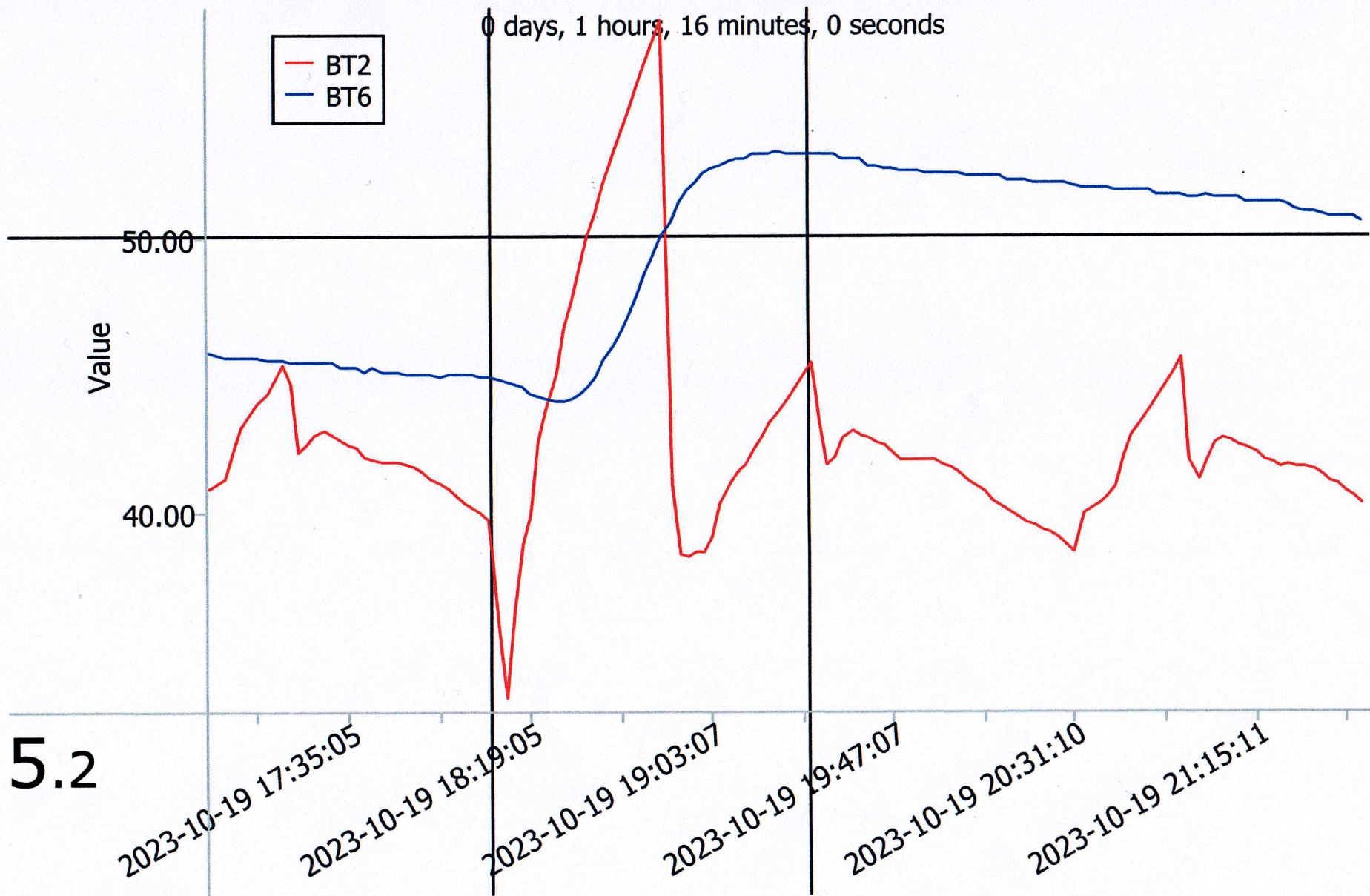
In den Grafiken **5.6** bis **5.8** sind auch die Heißgastemperaturen enthalten, die bei jedem Start der Wärmepumpe sehr schnell noch viel höhere Werte erreichen, auch diese hohen Temperaturen können trotz einem nur geringen Volumen in gleicher Weise genutzt werden.

Die für den Anlauf der Wärmepumpe erforderliche Energie geht nicht verloren, wenn man zunächst die Wärme mit der noch zu niedrigen Temperatur in den Quellenkreis überträgt (Phase 1 = Grafik **5.6**), dann bei einer ansteigenden ausreichend hohen Vorlauftemperatur die Wärme für Heizen oder Warmwasser genutzt wird (Phase 2 = Grafik **5.7**) und schließlich nach der Abschaltung der Wärmepumpe die in der gesamten Anlage noch vorhandene Wärme erneut wieder zur Quelle umgeleitet wird (Phase 3 = Grafik **5.8**).

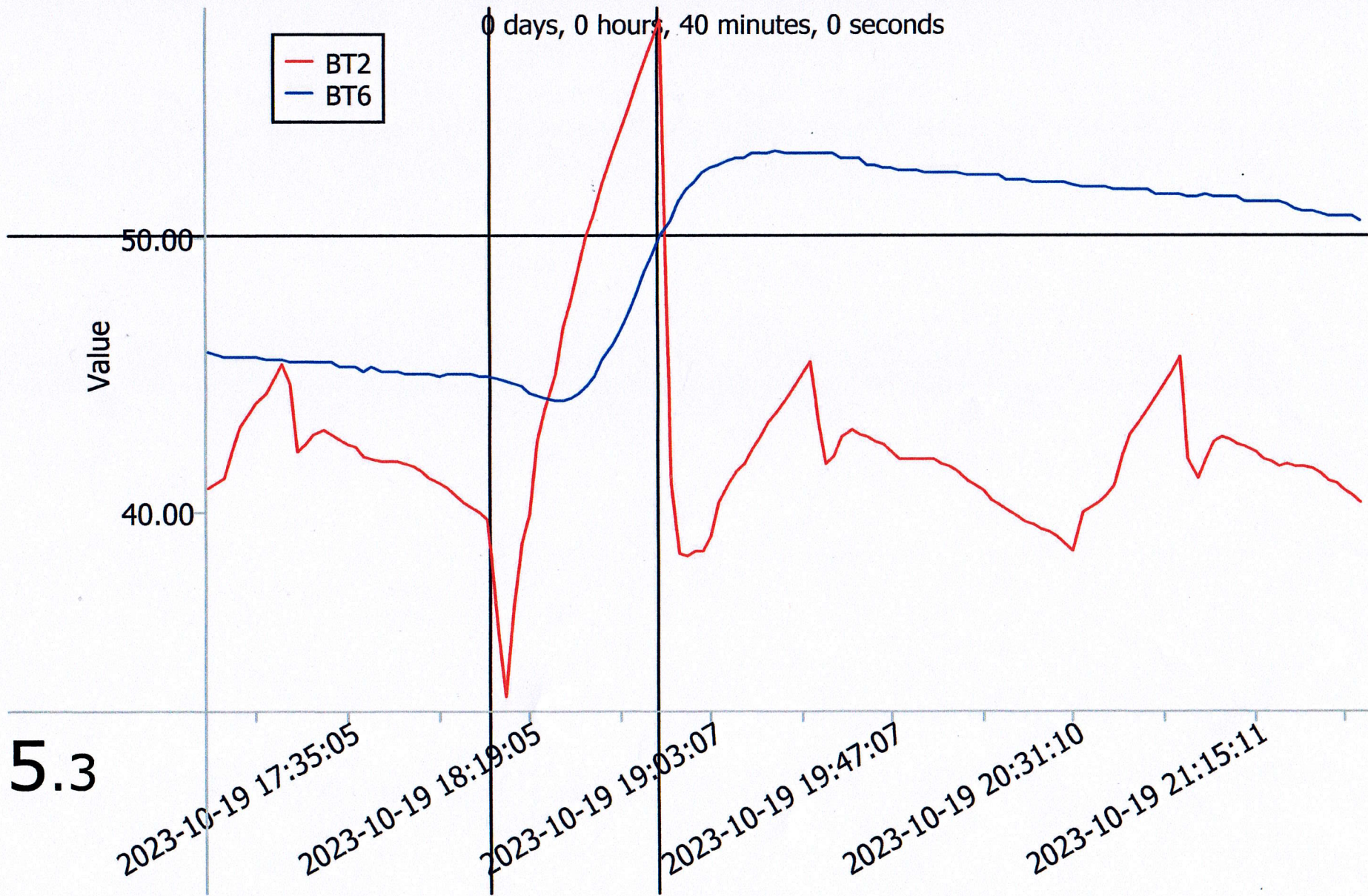
Da der Temperaturhub (die Differenz der Temperaturen zwischen Quelle und Heizkreis) maßgebend für den Strombedarf ist wirkt sich die Steigerung der Quellentemperaturen entscheidend auf den Energiebedarf aus. Mehr dazu ist den Grafiken im Anhang zu entnehmen (diese wurden übernommen aus der Datei WB2-ZE6 von meiner Website).

5.1

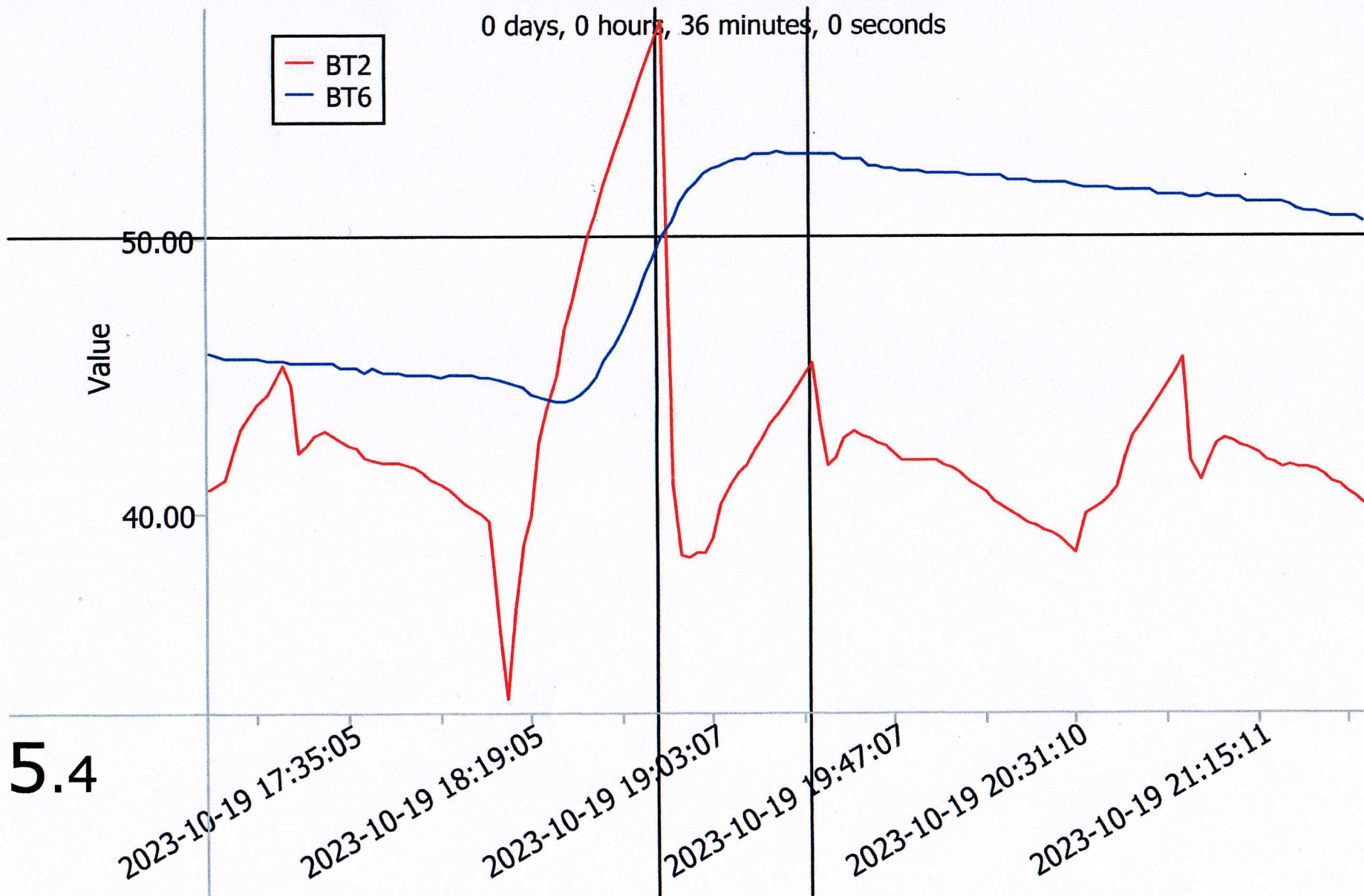




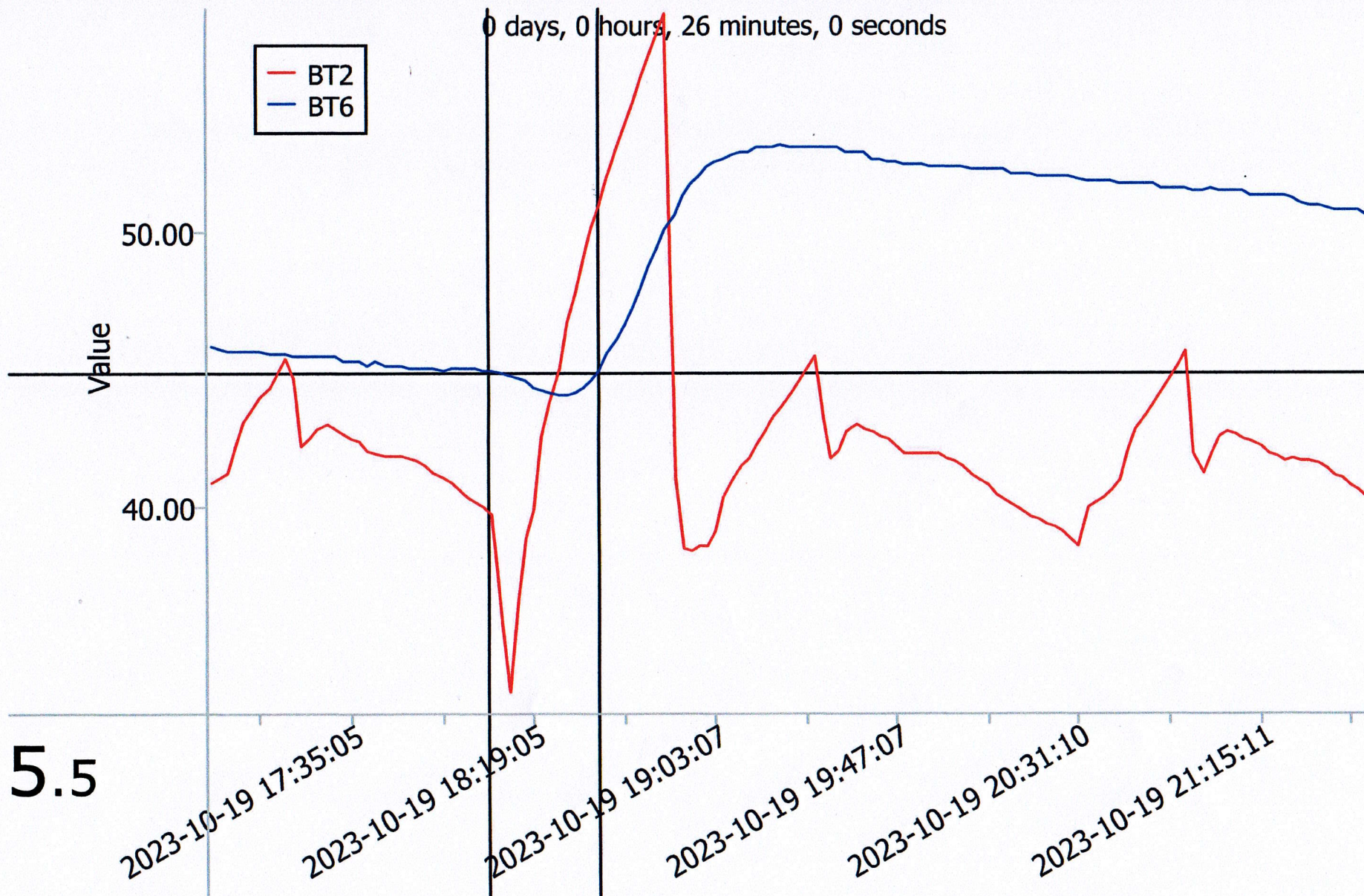
5.2



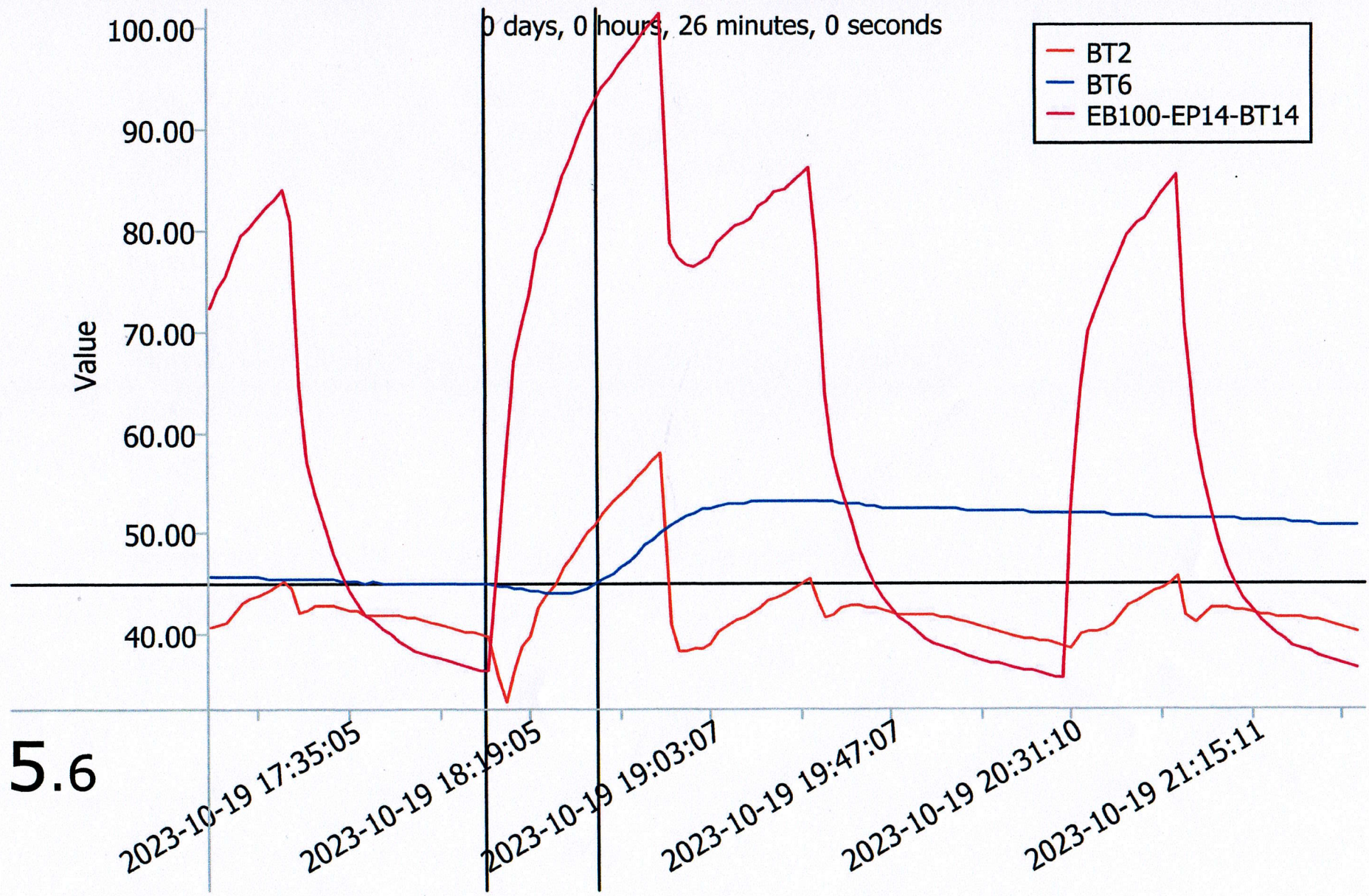
5.3

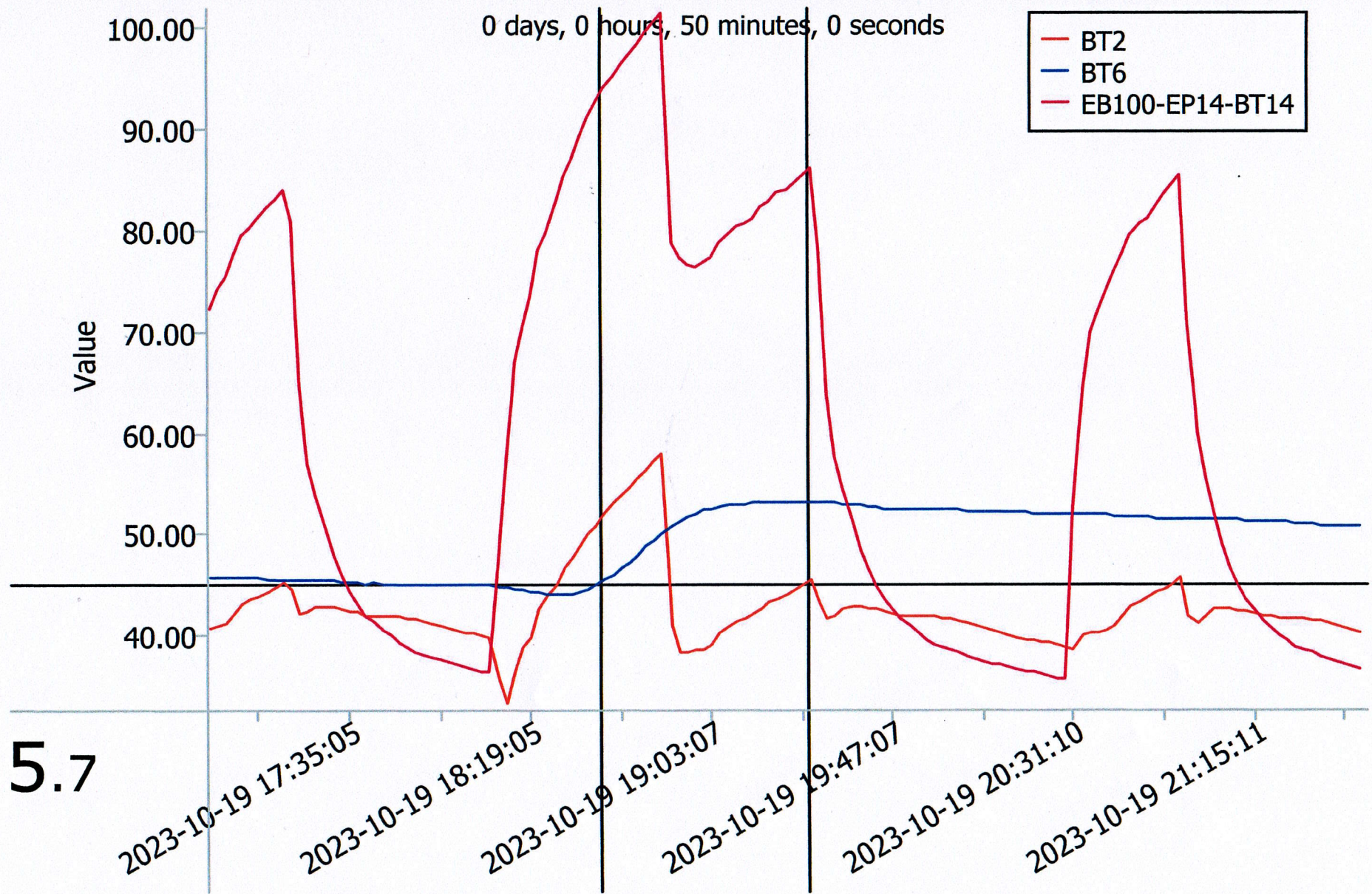


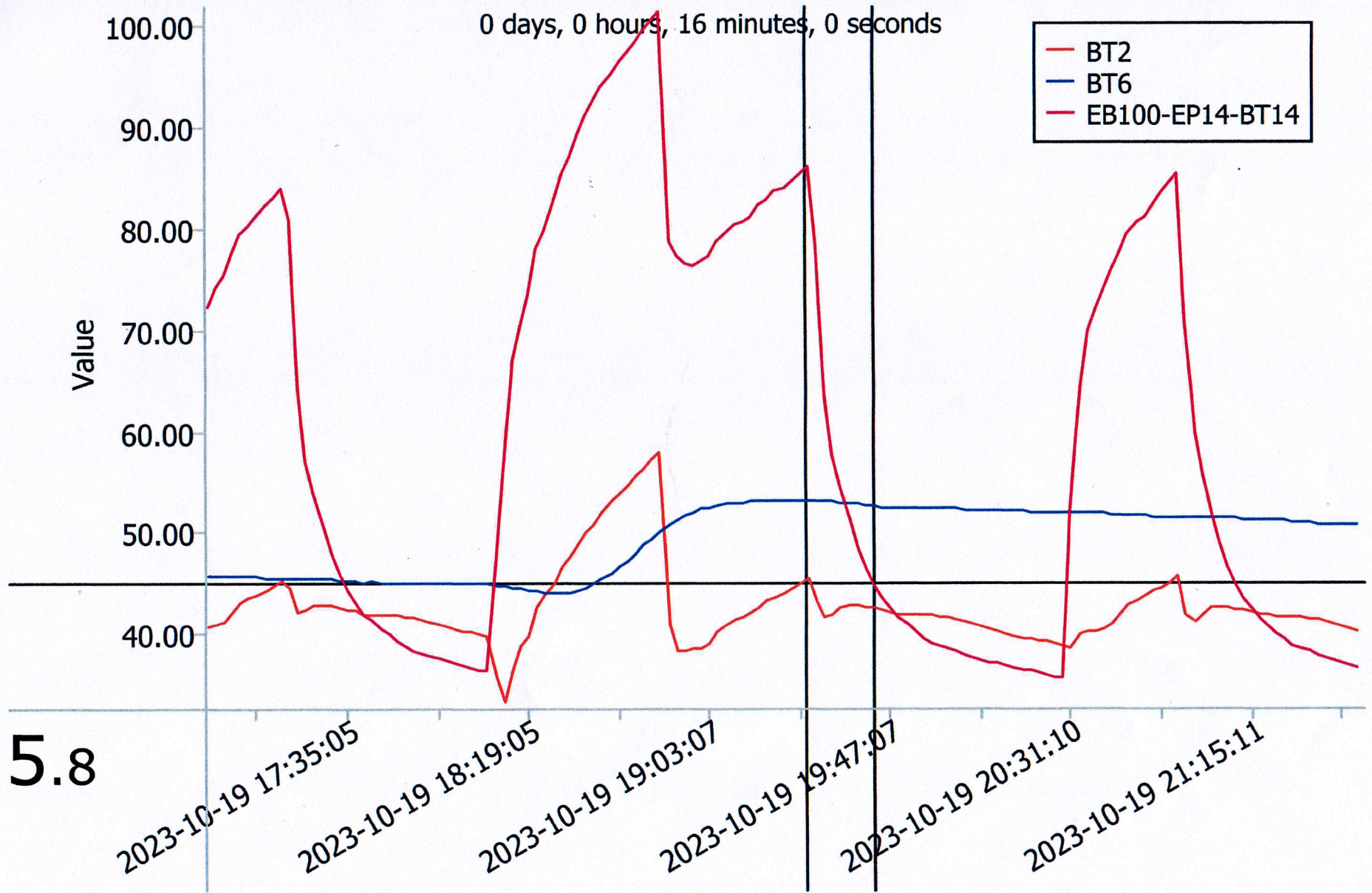
5.4



5.5







Die Anlage 2 im Anhang zeigt für die von der jeweiligen Außentemperatur abhängigen Luft/Wasser-Wärmepumpen gemäß dem heutigen Stand der Technik die erforderliche elektrische Leistung, die sich jeweils durch die Temperatur im Wärmespeicher ergibt. In der Übergangszeit des Jahres kann das beispielsweise eine Temperatur von 10°C sein und eine Leistung von 1,485 kW erfordern. Sinkt die Außenluft auf 0°C ab würde sich der Bedarf auf 2,145 kW erhöhen, das wäre bereits eine Steigerung um 44,4%, wie der Anlage 3 zu entnehmen ist. Je weiter die Außentemperatur Werte unter 0°C im Winter annimmt, um so mehr Strom muss für die Erzeugung von Wärme aufgewendet werden - dieses Problem ist bekannt, es ist ein großer Nachteil der Luft/Wasser-Wärmepumpe.

Diese Situation wird sich wesentlich ändern durch das neue Verfahren, weil der für die Luft/Wasser-Wärmepumpen erforderliche Wärmespeicher mittels des multifunktionalen Regelsystems die nach dem Start der Wärmepumpe zunächst entstehende Anergie nutzen kann für die Aufnahme der Wärme, solange deren Temperatur noch zu niedrig ist für die Heizung und für die Erwärmung von Warmwasser.

Zusätzlich kann auch in den Wintermonaten zeitweise überschüssiger Strom von Windkraftanlagen in Wärme umgewandelt und gespeichert werden, außerdem kann bei Bedarf schon während des Ladevorgangs der Wärmepumpe etwas Wärme aus deren Heizkreis in den Primärkreis übertragen werden.

Dieser gegenüber dem Stand der Technik neuartige technologische Ansatz ermöglicht bei der Speicherung der Wärme durchaus sehr hohe Temperaturen. Wie man der Tabelle in Anlage 3 entnehmen kann wäre bei einer Speichertemperatur von 24°C nur noch extrem wenig Strom erforderlich. Gegenüber dem bisherigen Bedarf von 2,145 kW im Winter bei einer Temperatur von 0°C wären das beispielsweise bei einer möglichen Speichertemperatur im Winter von 20°C dann 0,825 kW, das entspricht einer Ersparnis von 61 %.

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen sollte man nicht über 12°C in den Erdsonden hinausgehen, damit nicht ein Teil der Wärme sich im Erdreich ausbreitet und so verloren geht. Der Vorteil wäre nicht ganz so groß, würde aber immer noch bei 37% liegen.

Anhang

1. Funktion und Aufbau der Wärmepumpe
2. Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung
3. Einfluss der Temperatur im Wärmespeicher auf den Strombedarf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (mit Berechnung der Tabellenwerte)

1.3 Funktion und Aufbau der Wärmepumpe

Die prinzipielle Funktion einer Wärmepumpe besteht darin, Wärmeenergie bei einem niedrigen Temperaturniveau aufzunehmen und diese unter Zuführung von mechanischer Energie auf einem höheren, nutzbaren Temperaturniveau wieder abzugeben. Dadurch wird es möglich, die in der Umwelt (Luft, Erdrreich, Wasser) enthaltene Wärmeenergie nutzbar zu machen.

Im Wärmepumpenprozess wird ein Arbeitsmittel, auch als Kältemittel bezeichnet, periodisch verdichtet (komprimiert) und entspannt (expandiert). Im expandierten Zustand wird bei niedriger Temperatur die Wärme aus der Wärmequelle aufgenommen, wobei das Arbeitsmittel verdampft, und im komprimierten, heißen Zustand unter Verflüssigung des Arbeitsmittels wieder abgegeben. Da nach Ablauf eines Arbeitszyklus die Zustandsgrößen des Arbeitsmittels wieder dieselben sind, spricht man bei diesem Vorgang von einem Kreisprozess.

Die wichtigsten Bauteile einer Wärmepumpe sind:

- Verdichter
- Kondensator (Wärmetauscher)
- Expansionsventil
- Verdampfer (Wärmetauscher)

Das Schema einer Wärmepumpe mit den entsprechenden Druck- und Temperaturverhältnissen zeigt Bild 1.2 (Kältemittel R 407C; B0 / W45):

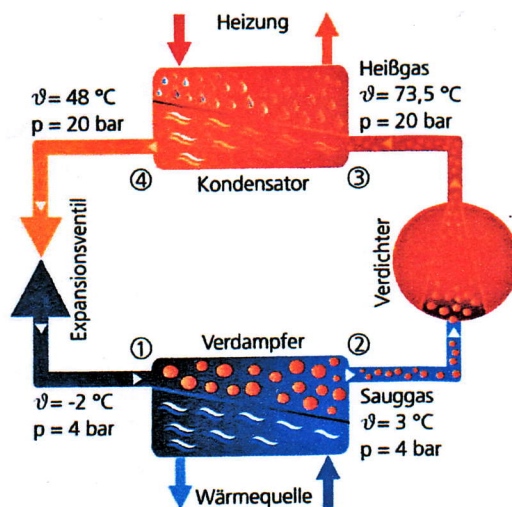


Bild 1.2: Schema eines Wärmepumpenkreislaufs

Der Carnot-Prozess

Allgemein beschreibt der (idealisierte) Carnot-Prozess die Funktion von Wärmekraftmaschinen, die durch periodische Kompression und Expansion Wärme in mechanische Arbeit umwandeln. Wird dieser Kreislaufprozess umgekehrt (links-drehend) durchlaufen, bildet er eine Kraftwärmemaschine ab, die bei tiefen Temperaturen Wärme aus der Umgebung entnimmt und mit von außen zugeführter mechanischer Arbeit bei hoher Temperatur wieder abgibt.

Als Arbeitsmittel wird hierbei ein ideales Gas mit sehr niedrigem Siedepunkt angenommen. Das folgende Bild 1.3 zeigt die vier Phasen des Kreisprozesses im sogenannten T-S-Diagramm:

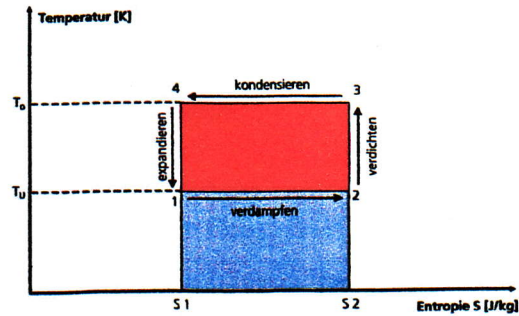


Bild 1.3: Carnot-Prozess

■ Verdampfen (1-2):

Das flüssige Arbeitsmittel wird bei niedrigem Druck und geringer Temperatur verdampft. Die dafür erforderliche Verdampfungswärme wird der Umgebung bzw. Wärmequelle entzogen, hierbei ändert sich die Temperatur nicht (isothermer Vorgang). Durch die Wärmezufuhr bei konstanter Temperatur steigt die Entropie an.

■ Verdichten (2-3):

Mittels mechanischer Arbeit wird das Arbeitsmittel verdichtet und hierbei auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Die Entropie bleibt aufgrund der von außen zugeführten Arbeit konstant (isentropischer Vorgang).

■ Kondensieren (3-4):

Im Kondensator wird dem heißen und unter hohem Druck stehenden Arbeitsmittel Wärmeenergie entzogen, so dass es kondensiert. Die Temperatur bleibt hierbei wiederum konstant, da nur die bei 1-2 aufgenommene Verdampfungswärme abgegeben wird (isotherm). Durch die Abgabe der Wärmeenergie bei konstanter Temperatur sinkt die Entropie.

■ Expandieren (4-1):

Das Arbeitsmittel wird entspannt, Druck und Temperatur verringern sich, die Entropie bleibt konstant (isentrop).

Anschaulich stellt die rote Fläche die von dem Verdichter zugeführte Energie dar, während die graue Fläche die aus der Umgebung entnommene Energie abbildet. Das Verhältnis der gesamten abgegebenen Energie (rot+grau) zur von außen zugeführten Energie (rot) entspricht der Leistungszahl des Prozesses, der Carnot-Leistungszahl ϵ_c :

$$\epsilon_c = \frac{T_o}{T_o - T_u} = \frac{T_o}{\Delta T}$$

Es wird deutlich, dass die Leistungszahl vom Temperaturhub abhängt, d.h. von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und -senke: je geringer die Differenz, umso höher die Leistungszahl.

Beispiel:

$$T_u = 0\text{ °C} = 273\text{ K}$$

$$T_o = 40\text{ °C} = 273 + 40 = 313\text{ K}$$

$$\epsilon_c = \frac{T_o}{T_o - T_u} = \frac{313}{313 - 273} = 7,83$$

Für den idealen **Carnot-Prozess** ergibt sich die theoretische Leistungszahl ϵ_C aus

$$\epsilon_C = T_o / (T_o - T_u) = T_o / \Delta T \quad (\text{alle Temperaturen in K})$$

mit T_o = Temperatur der Wärmesenke (Heizkreis)

T_u = Temperatur der Wärmequelle (beispielsweise Sole)

ΔT = Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke

Für die Leistungszahl ϵ_{WP} einer realen Wärmepumpe können überschlägig 50% der theoretischen Leistungszahl ϵ_C angesetzt werden,

für **Wärmepumpen** gilt daher $\epsilon_{WP} = 0,5 \cdot \epsilon_C$.

Die Leistungszahl ϵ_{WP} ist das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung P_{th} zu aufgenommener elektrischer Leistung P_{el} .

Beispiel einer Berechnung für eine Fußbodenheizung

mit einer Heizlast (Wärmeleistung) von 10 kW_{therm}

Heizkreistemperaturen = $35/25 \text{ }^\circ\text{C}$, Mittelwert = $30 \text{ }^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$ (T_o)

Soletemperaturen (Quelle) = $0/-5 \text{ }^\circ\text{C}$, Mittelwert = $-2,5 \text{ }^\circ\text{C} = 270,5 \text{ K}$ (T_u)

bei Quellentemperatur $0 \text{ }^\circ\text{C}$: Temperaturhub $\Delta T = 303 \text{ K} - 270,5 \text{ K} = 32,5 \text{ K}$

$$\epsilon_{WP} = 0,5 \cdot \epsilon_C = 0,5 \cdot T_o / \Delta T = P_{th} / P_{el}$$

$$\rightarrow P_{el} = P_{th} \cdot \Delta T / 0,5 \cdot T_o = \Delta T \cdot 10 / 151,5 \rightarrow P_{el} = 0,066 \cdot \Delta T$$

Quelle $^\circ\text{C}$	Hub ΔT in K	P_{el} kW
26	6,5	0,429
24	8,5	0,561
22	10,5	0,693
20	12,5	0,825
18	14,5	0,957
16	16,5	1,089
14	18,5	1,221
12	20,5	1,353

Quelle $^\circ\text{C}$	Hub ΔT in K	P_{el} kW
10	22,5	1,485
8	24,5	1,617
6	26,5	1,749
4	28,5	1,881
2	30,5	2,013
0	32,5	2,145
-2	34,5	2,277
-4	36,5	2,409

Anlage 2 Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung für eine Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur im Wärmespeicher

Speicher 0 °C		2 °C	4 °C	6 °C	8 °C	10 °C	Speicher 10 °C
$T_o = 30\text{ °C} = 303\text{ K}$		303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	$P_{el} = 1,485\text{ kW}$ <u>Bezugswert *</u> für Veränderungen des Strombedarfs je nach der Temperatur im Wärmespeicher
$T_u = -2,5\text{ °C} = 270,5\text{ K}$		-0,5 °C	1,5 °C	3,5 °C	5,5 °C	7,5 °C	
$\Delta T = 32,5\text{ K}$		30,5 K	28,5 K	26,5 K	24,5 K	22,5 K	
$\varepsilon = 4,661$		4,967	5,316	5,717	6,184	6,733	
$P_{el} = 2,145\text{ kW}$		2,013 kW	1,881 kW	1,749 kW	1,617 kW	1,485 kW	
+ 44,4 % gg. Bezugswert		+ 35,5 %	+ 26,7 %	+ 17,8 %	+ 8,9 %	Bezugswert	
12 °C	14 °C	16 °C	18 °C	20 °C	22 °C	24 °C	* Berechnungen für eine Anlage mit einer Fußbodenheizung mit Heizkreistemperaturen von 35/25 °C und einer Heizlast von 10 kW
303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	
9,5 °C	11,5 °C	13,5 °C	15,5 °C	17,5 °C	19,5 °C	21,5 °C	
20,5 K	18,5 K	16,5 K	14,5 K	12,5 K	10,5 K	8,5 K	
7,390	8,189	9,182	10,448	12,120	14,428	17,823	
1,353 kW	1,221 kW	1,089 kW	0,957 kW	0,825 kW	0,693 kW	0,561 kW	
- 8,9 %	- 17,8 %	- 26,7 %	- 35,5 %	- 44,4 %	- 53,3 %	- 62,2 %	

Anlage 3 Einfluss der Temperatur im Wärmespeicher auf den Strombedarf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe

Berechnung der Tabellenwerte für das Beispiel der Anlage 3

Festlegung eines Bezugswerts zur Ermittlung des jeweiligen Strombedarfs bei unterschiedlichen Temperaturwerten,
beispielsweise für die Speichertemperatur 0°C (Quellentemperatur) gegenüber dem Bezugswert bei 10°C .

Angaben erforderlich beispielsweise zur Heizlast (10 kW) und zu dem Mittelwert der Heizkreistemperaturen (Vorlauf = 35°C , Rücklauf = 25°C), die sich für die Berechnung nicht ändern.

Ermittlung des Temperaturhubs ΔT zwischen Temperatur T_u der Quelle und Temperatur T_o des Heizkreises (dafür ist immer die Temperatur von Grad Celsius umzurechnen in Grad Kelvin $\rightarrow \Delta T = T_o$ minus T_u), für die Berechnung ist jeweils der Mittelwert einzusetzen.

Beispiel für eine Speichertemperatur von 0°C : $\rightarrow \Delta T$ für $T_o = 30^{\circ}\text{C} = 303 \text{ K}$ und $T_u = -2,5^{\circ}\text{C} = 270,5 \text{ K}$
bei einer Spreizung im Primärkreis von 5°C $\rightarrow \Delta T = 32,5 \text{ K}$

Carnot-Formel $\rightarrow \epsilon_c = T_o / \Delta T = 303 / 32,5 = 9,323$

für Wärmepumpen gilt $\epsilon_{WP} = \text{etwa } 50\% \text{ von } \epsilon_c = 9,323 \cdot 0,5 \rightarrow \epsilon_{WP} = 4,661$

Leistungszahl COP = thermische Leistung P_{th} zur elektrischen Leistung P_{el} $\rightarrow P_{th} / P_{el} = \epsilon_{WP}$

Elektrische Leistung $\rightarrow P_{el} = P_{th} / \epsilon_{WP} = 10 \text{ kW} / 4,661 = 2,145 \text{ kW}$

Veränderung gegenüber dem Bezugswert 1,485 kW bei 10°C $\rightarrow 2,145 / 1,485 = +44,4 \%$