Temperaturgeregeltes Dampfen

Dem interessierten Dampfer erkläre ich die Arbeitsweise von temperaturgeregeltem Dampfen und werde auch auf die Besonderheiten eingehen, die für eine optimale Funktion zu berücksichtigen sind.

1. Mechanischer Akkuträger (Elektronische Akkuträger und das ohmsche Gesetz)

Bei einer einfachen E-Zigarette (mechanischer Mod) wird eine Wicklung über einen Kontakt oder Schalter mit einer Batterie verbunden. Nach dem Ohmschen Gesetz ($I=U/R$, U =Spannung R = Widerstand, I =Strom) stellt sich bei der Batterie-Spannung U dann ein Strom I durch die Heizwicklung, die den Widerstand R darstellt, ein. Multipliziert man den Strom mit der Spannung über der Wicklung, so ergibt sich die Heizleistung. Ohne entsprechende Kühlung würde die Temperatur der Wicklung schnell mehrere hundert Grad erreichen und die Wicklung beginnen zu glühen. Bei einer leistungs-, spannungs- oder stromgeregelten E-Zigarette sind die Verhältnisse ähnlich, nur, dass sich die Heizleistung nicht einfach in Abhängigkeit des Wicklungswiderstands und der Batteriespannung einstellt, sondern durch die Elektronik konstant gehalten wird.

2. Gesundheitsgefährdende Substanzen

Solange die Wicklung mit Liquid benetzt ist, wird es zum Verdampfen der Komponenten des Liquids kommen, bevor die Wicklungstemperatur weiter steigen kann. Da ein Liquid, wie es in herkömmlichen E-Zigaretten verwendet wird, aus einer Mischung von Flüssigkeiten besteht, welche unterschiedliche Siedepunkte besitzen, werden zunächst diejenigen Teile verdampfen, die einen niedrigen Siedepunkt aufweisen; dies ist im allgemeinen das in den Liquids enthaltene Wasser. Wasser siedet normalerweise bei 100°C . Dadurch aber, dass der Wasseranteil im Liquid im Vergleich zu den anderen Komponenten gering ist, verdampft das Wasser erst bei deutlich höheren Temperaturen und dann schlagartig, was als Siedeverzug bezeichnet wird. Bei dem schlagartigen Verdampfen entstehen kleine Explosionen und die anderen Stoffe des Liquids werden vernebelt. Um die Aromastoffe im Nebel zu schmecken reicht es aus, dass sich diese an die Nebeltropfen heften, d.h. sie werden in aller Regel nicht verdampft. Anmerkung: Weiterhin spielt die Umgebungstemperatur in der Nähe der Wicklung eine entscheidene Rolle bei der Nebelbildung. Hier kommt der Geometrie des Verdampfers und die des verwendeten Liquidtransporteurs (Docht) große Bedeutung zu. Es sollte konstruktiv verhindert werden, dass der gerade erzeugte Dampf an kalten Oberflächen in der Nähe niederschlägt. Zusammenfassend kann man sagen: ein Liquid besitzt keinen fest definierten Siedepunkt sondern vielmehr ein gewissen Arbeitsbereich. Unterhalb dieses Bereichs findet keine nennenswerte Dampfentwicklung statt, oberhalb des Arbeitsbereichs zerfallen die im Liquid enthaltenden Stoffe in andere, mitunter gesundheitsbedenkliche Substanzen, namentlich Aldehyd bzw. Acrolein. Letzteres

kann man leicht an einem unangenehmen *Geschmack* feststellen. (*) Zu hohe Temperaturen entstehen in Bereichen der Wicklung, die nicht ausreichend mit Liquid benetzt sind. Anmerkung: die Menge an gesundheitsgefährdenden Substanzen ist, selbst wenn solche Hot-Spots entstehen, deutlich geringer als beim Rauchen einer normalen Tabakzigarette. Zudem wird der Dampfer aufgrund des schlechten *Geschmacks* sofort das Dampfen einstellen.

3. Temperaturgeregeltes Dampfen

Beim temperaturgeregelten Dampfen ist die Aufgabe der Elektronik die Temperatur der Wicklung in dem beschriebenen Arbeitsbereich zu halten. Abhängig von der exakten Temperatur im Arbeitsbereich sind die verschiedenen aromatischen Bestandteile im Liquid zu schmecken; somit kann der empfundene *Geschmack* des verwendeten Liquids in gewissen Grenzen variiert werden.

1. Vorteile des temperaturgeregelten Dampfens

Vermeidung gesundheitsgefährdender Stoffe Dadurch, dass die Temperatur bei korrekter Ausführung der Wicklung innerhalb des unbedenklichen Bereichs gehalten wird, kommt es zu keiner messbaren Erzeugung schädlicher Substanzen, unabhängig davon, ob der Liquidfluss nachlässt oder gestört ist. Das ist auch ein wesentlicher Bequemlichkeitsaspekt für den Kunden.

Besserer *Geschmack* Abhängig von der genauen Temperatureinstellung entfalten die verschiedenen Aromen im Liquid ihren *Geschmack* in unterschiedlicher Intensität. So ähnlich, wie beim Genuss eines Weines, dessen Aromen ebenfalls bei unterschiedlichen Temperaturen einen variierenden *Geschmack* zeigen.

Batterie-Laufzeit Wenn die Wicklung einmal aufgeheizt wurde, ist die Energie zur Aufrechterhaltung der Temperatur wesentlich geringer als beim (möglichst schnellen) Aufheizen. In Abhängigkeit von der Ausführung der Wicklung kann mit einer etwa 1.5 fachen AkkuLaufzeit gerechnet werden.

2. Arbeitsweise der Elektronik

Um Temperaturgeregelt zu dampfen, muss zunächst die Temperatur der Wicklung gemessen werden. Da es bei den herkömmlichen Verdampfern mit 510er Gewinde nicht möglich ist, einen zusätzlichen Temperatursensor unterzubringen, muss die Temperatur der Wicklung über die Widerstandsänderung des Wickeldrahtes ermittelt werden. Dazu benötigt man eine Wicklung aus einem Drahtmaterial, das einen deutlichen Temperaturkoeffizienten besitzt.

► Der Temperaturkoeffizient gibt an, um welchen Faktor sich der Widerstand der Wicklung bei einer definierten Temperaturerhöhung ändert. So ändert sich beispielsweise der Widerstand von reinem Nickeldraht um 62% bei einer

Temperaturerhöhung um 100°C . Normalerweise wurden für Akkuträger bislang Widerstandsdrähte verwendet, deren Temperaturkoeffizienten nahe Null ist, z.B. Kantaldraht Typ A. Achtung: Derartiger Draht ist für temperaturgeregeltes Dampfen nicht geeignet! Generell gilt, je höher der Temperaturkoeffizient des Drahtmaterials ist, desto genauer die Temperaturmessung. Bei der E-Zigarette für temperaturgeregeltes Dampfen können Drähte mit einem Temperaturkoeffizienten von 10% pro 100°C (z.B. V2A-Draht) bis hin zu 65% pro 100°C (reiner Nickeldraht hat $62\%/100^{\circ}\text{C}$) verwendet werden. Der entsprechende Temperaturkoeffizient ist über das Erweiterte-Function-Menu einzustellen.

3. Nachteile von Drähten mit hoher Leitfähigkeit, Vorteil von Legierungen

Unglücklicherweise besitzen Drähte mit einem hohen Temperaturkoeffizienten, wie z.B. Nickel, eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit (geringer spezifischer Widerstand) und sind damit bei typischen Wickelgeometrien sehr niederohmig (Sub-Ohm).

Der Nachteil bei Erstellung einer Wicklung mit niederohmigem Draht, wie z.B. Nickel, besteht darin, dass:

□ die Wicklung sehr niederohmig (Wicklungswiderstand $< 0,2\ \text{Ohm}$) wird und sehr hohe Ströme zum Aufheizen benötigt. Das verringert den Wirkungsgrad des Gesamtsystems und erhöht die Sensibilität von Kontaktproblemen zum Verdampfer und anderen Übergängen.

□ Besitzt die Wicklung sehr viel Draht (Masse) bewirkt dies, dass wesentlich mehr Energie in die Wicklung gesteckt werden muss, um den Anfangsdampfstoß zu erzeugen und sie sich damit nur langsam aufheizt

□ Wird die Wicklung mit sehr dünnem Draht zur Vermeidung der erstgenannten Nachteile hergestellt, was mechanisch schwer ist, ist die Kontaktfläche des Drahtes mit dem Liquid klein. Das wirkt sich aufgrund der hohen thermischen Oberflächenbelastung negativ auf den Geschmack aus.

□ Durch die hohe Leitfähigkeit und den hohen Koeffizienten ziehen wärmere Bereiche der Wicklung immer mehr Leistung an sich, wodurch schneller sogenannte Hot-Spots entstehen.

Das heißt, der Vorteil eines sehr hohen Temperaturkoeffizienten bei hoher Leitfähigkeit geht einher mit verschiedenen Nachteilen. Dagegen ist der spezifische Widerstand von Legierungen wesentlich hochohmiger. Bei der Verwendung von Legierungen kann ein Kompromiss zwischen den beschriebenen Vor- und Nachteilen gefunden werden. Gängige Legierungen sind z.B. Edeldraht Typ V2A, auch bekannt unter dem Handelsnamen Gplat, welcher einen relativ niedrigen Temperaturkoeffizienten von ungefähr $10,5\%/100^{\circ}\text{C}$ aufweist.

Der Vorteil dieses Drahtes ist, dass er ist relativ hochohmig und auch bei höheren Temperaturen formstabil ist. D.h. man kann zur Herstellung der Wicklung relativ dicken Draht verwenden und hat trotzdem eine Wicklung mit wenig Masse.

Der Nachteil des geringen Temperaturkoeffizienten wirkt sich auf eine ungenauere Temperaturmessung aus. Somit kann mit Nickel die Temperatur auf ungefähr 5°C genau erfasst werden und mit Edelstahldraht auf lediglich $+ 30^{\circ}\text{C}$ genau. Das scheint sehr ungenau zu sein, ist aber gar nicht so kritisch, weil die Temperatureinstellung interaktiv ohnehin so erfolgt, dass sich der Geschmack des Liquid optimal entfaltet.

4.Referenzmessung für genaues temperaturgeregeltes Dampfen

Zur Ermittlung der Temperatur über den Widerstandswert ist eine extrem genaue Widerstandsmessung notwendig. Dazu ist zu berücksichtigen, dass nicht nur der Widerstand der Wicklung, sondern der Widerstand des Gesamtaufbaus „Verdampfer“ gemessen wird. D.h. Hier gehen sämtliche Übergangswiderstände mit ein. Dazu gehört insbesondere der Übergangswiderstand an den Schraubklemmen zum Draht und der am 510er-Gewinde. Diese Übergangswiderstände werden im Allgemeinen einen drastisch anderen Temperaturkoeffizienten aufweisen, als das Widerstandsmaterial der Wicklung. Außerdem machen kleine mechanische Änderungen am Verdampfer, wie z.B. das nachträgliche Festziehen des Gewindes oder thermische Spannungen, welche durch das Heißwerden des Verdampfers entstehen, schnell Änderungen im Übergangswiderstand von einigen Milliohm aus.

Veranschaulichung:

Wenn man z.B. eine Wicklung mit einem Edelstahldraht erzeugt, die einen Widerstand von $0,1\ \Omega$ (= $100\ \text{Milliohm}$) besitzt, ändert sich der Widerstand der Wicklung um $1\ \text{Milliohm}/10^{\circ}\text{C}$ - weil Edelstahldraht sich ca. um $10\%/100^{\circ}\text{C}$ im Widerstand ändert.

Wenn sich nun aufgrund thermischer Erwärmung oder durch nachträgliches Festziehen des Verdampfergewindes der Kontaktwiderstand zum Verdampfer um $10\ \text{Milliohm}$ ändert, so bedeutet dies eine scheinbare Temperaturänderung von 100°C .

Erstellt man jedoch eine Wicklung von $1\ \Omega$, so bedeutet die gleiche Kontaktänderung nur einen Temperaturfehler von 10°C .

Betrachten wir das Ganze bei der Nickelwicklung.

Angenommen, wir haben die gleiche Wicklung von $0,1\ \Omega$ unter Verwendung von Nickeldraht hergestellt, so bedeutet eine Widerstandsänderung von $10\ \text{Milliohm}$, hervorgerufen von geänderten mechanischen Spannungen am Verdampfer, eine Temperaturänderung von: Temperaturkoeffizient = $62\%/100^{\circ}\text{C}$; $10\ \text{Milliohm}$ von $0,1\ \Omega$ = $10\% \rightarrow 16,1^{\circ}\text{C}$.

Da Nickeldraht wesentlich niederohmiger ist als Edelstahldraht, haben typische nutzbare Wicklungen aus Nickeldraht einen Widerstandswert von ca. $0,2\ \Omega$. Demgegenüber sollten Widerstandswicklungen aus dem hochohmigeren Edelstahldraht Werte zwischen 1 und $2\ \Omega$ aufweisen.

Wenn man diesen Umstand berücksichtigt, kann man sowohl mit Edelstahl Draht als auch mit Nickel Draht Wicklungen erstellen, mit denen ein hervorragendes Dampfergebnis möglich ist.

Aufgrund der beschriebenen Kontaktproblematik ist unbedingt darauf zu achten, dass nur Verdampfer verwendet werden, bei denen eine gute Kontaktierung Verdampfer/Akkuträger und Verdampfer/Wicklung gewährleistet ist. Da bei der im Betrieb üblichen Erwärmung des Akkutragers mit Auftreten mechanischer Spannungen und damit mit Veränderungen des Übergangswiderstandsverhaltens zu rechnen ist, ist es vorteilhaft, wenn die Verbindung Akkutragers/Verdampfer mit einem gefederten Element ausgestattet ist, der die entsprechenden mechanischen Spannungen abfedern kann.

Anmerkung:

Haben weder Verdampfer noch Akkutragers ein federnd ausgleichendes Element so sollte darauf geachtet werden, dass der mechanische Anschlag beim Aufschrauben des Verdampfers durch den Mittelpol und nicht durch den Kopf des Akkutragers dargestellt wird. Es ist also elektrisch gesehen günstiger einen kleinen Spalt in Kauf zu nehmen. Ein nachträglich Anziehen des Verdampfers während des Betriebs nach dem Abgleich ist zu vermeiden.

Falls dennoch nachgedreht werden muss, sollte ein neuer Abgleich der Referenzwertes bei 20°C initialisiert werden:

Dazu ist es lediglich erforderlich, den Verdampfer etwas abkühlen zu lassen und dann Menüpunkt der Referenzmessung zu wählen.

Hintergründe zur Referenzmessung

Damit der Akkutragers über die Widerstandsänderung die Temperatur feststellen kann, muss er zunächst den Widerstand der Wicklung bei einer definierten Temperatur „wissen“. Dazu ist eine Referenzmessung erforderlich. Die Modelle mit Temperaturregelung sind bezüglich der Referenzmessung einstellbar zwischen „automatisch“ und „manuell“, wobei eine manuell initiierte Messung immer möglich ist. Die automatische Messung - sofern aktiviert - erfolgt nach jedem Einschalten, oder wenn der Verdampfer gewechselt wird (bei eingeschaltetem Gerät). Bei dieser Referenzmessung geht der Akkutragers davon aus, dass der Verdampfer eine Referenztemperatur von 20°C aufweist. Sollte der Verdampfer vom vorhergehenden Dampfen noch heiß sein, so muss der Benutzer vor dem Einschalten des Gerätes bzw. vor der Referenzmessung und vor dem ersten Dampfen nach dem Aufschrauben erst abwarten, bis der Verdampfer eine Temperatur von ungefähr 20°C erreicht hat. Ist es dem Benutzer zum Beispiel aufgrund der Umgebungstemperatur nicht möglich, eine Referenztemperatur von 20°C zu erreichen, so muss dies beim Eingeben der Soll-Temperatur berücksichtigt werden. Wurde beispielsweise der Abgleich bei einer Verdampfer Temperatur von 40°C durchgeführt, so wird die tatsächlich geregelte Temperatur 20°C höher ausfallen als der eingestellte Sollwert. Möchte man die Referenzmessung wiederholen, z.B. weil man mit dem aktuellen Ergebnis nicht

zufrieden ist, so sollte man das Gerät kurz abschalten, warten bis der Verdampfer ungefähr eine Temperatur von 20°C an der Wicklung erreicht hat und das Gerät dann wieder einschalten. Anstatt des Ein- und Ausschaltens (im Automatik-Modus) kann auch der Menüpunkt „TempCal“ im Haupt-Menü angewählt werden.

Diese manuelle Aktivierung erfordert eine zusätzliche Quittierung (Anzeige „Confirm“), um eine versehentliche Ausführung zu vermeiden. Unbedingt beachten: Der Anwender sollte stets die Temperaturmessung einer Plausibilitätsprüfung unterziehen: Zeigt das Gerät völlig unerwartete Temperaturen an (z.B negative), dann liegt sehr wahrscheinlich ein Anwenderfehler vor! Dann auf jeden Fall überprüfen „sitzt der Verdampfer fest“ und „ist der Verdampfer abgekühlt“. Dann erneut eine Referenzmessung durchführen! Hier noch ein graphischer Vergleich zwischen normalen Dampfen (mit Boost) und temperaturgeregeltem Dampfen. Ohne Boost-Funktion wäre die Aufheizzeit beim normalen Dampfen länger. Beide Dampfzyklen zeigen ein schnelles Aufheizen der Wicklung.

Beim Normaldampfen wird sich die Temperatur so lange erhöhen, bis sich die Heizleistung und der Liquidnachfluss im Gleichgewicht befinden, so dass sich die Temperatur nicht mehr wesentlich ändert. Je nach Situation (wenig Liquid), ist diese Temperatur schon zu hoch („kokeliger“ Geschmack).

Beim temperaturgeregelten Dampfen wird zum Aufheizen die unter der Leistungseinstellung gewählten Leitung zum Aufheizen freigegeben. Sobald die Wicklung die Solltemperatur erreicht hat, wird die Leistung so weiter geregelt, dass diese Temperatur gehalten wird, unabhängig vom Liquidfluss
- es kann also nie zu einer Überhitzung kommen.

Vorgehensweise zum Erstellen einer Wicklung für temperatur-geregeltes Dampfen:

1. Wicklung erstellen und gut mit dem Klemmen des Verdampfers verbinden.
2. Noch kein Docht / keine Watte einführen, passiviertes Metallmash darf eingeführt sein.

3. Verdampfer aufsetzen.

Den Akkuträger in den Zustand nicht temperatur-geregeltes Dampfen versetzen (Heater Control „HCtrl = 0“)

4. mit adäquater Leistung die Wicklung zum Glühen bringen.

Anmerkung zu 4.: Durch das Glühen werden mechanische Spannungen ausgeglichen und Übergangswiderstände driften später nicht mehr so leicht weg. Außerdem wird die Wicklung an der Oberfläche leicht passiviert und es kommt nicht so schnell zu elektrischen Kurzschlüssen zwischen den Wicklungsschleifen. Ist zu beobachten, dass einige Wicklungsschleifen zu stark oder zu schwach glühen, so sollte die Geometrie der Wicklung mit einem geeigneten Werkzeug verändert werden. Mögliche Wicklungsschlüsse sind unbedingt zu vermeiden, da sich diese unvorhersehbar verhalten und somit der Widerstand der Wicklung im Betrieb springt, was zu einer stark fehlerhaften Temperaturregelung führt. Aufgrund der Anfälligkeit von

Wicklungsschlüssen bei sogenannten Microcoils sind diese zum temperaturgeregelten Dampfen nicht zu empfehlen.

5. nach dem Ausglühen den Docht einfädeln, die Wicklung und den Docht mit Liquid beträufeln, die Wicklung noch mal auf mögliche Windungsschlüsse überprüfen und diese gegebenenfalls beseitigen.

6. unbedingt den richtigen Temperaturkoeffizienten des Drahts eingeben!!!

7. Temperatur-geregeltes Dampfen aktivieren (Heater Control HCtrl=3) und den ersten Dampfstoß erzeugen. Einstellung der Leistung beim temperatur-geregelten Dampfen: Temperatur und Leistung so einstellen, dass das Dampfergebnis also der Geschmack zufriedenstellend ist. Die Leistung sollte der Wicklung angemessen eingestellt werden. Kurze Wicklungen mit dünnen Draht haben eine geringe thermische Masse und heizen sehr schnell an, außerdem ist hier die Oberfläche klein und bei hohen Leistungen ist die Oberflächenbelastung sehr hoch was dazu führt, dass sich schnell lokale Zonen der Überhitzung (Hot Spots) bilden, was zu schlechtem Geschmack und Gesundheitsgefährdung führt. Regel: Wer viel Dampf haben will braucht eine Wicklung mit mehr Masse und mehr Leistung. Viel Dampf bedeutet aber auch, dass der Akku schneller leer ist und dass viel Liquid verbraucht wird.