

GROWCONTROL

VPD-Master-Guide

Stand/Version: **Januar 2026/V 1.0**

Verantwortlicher: **Aaron**

Kurzüberblick - Worum geht es?

Dieser Guide wurde entwickelt, um die professionelle Klimaführung im Indoor-Anbau auf wissenschaftlicher Basis verständlich zu machen. Er kombiniert praxisnahe Anwendung mit präziser Sensorik und Regeltechnik.

Ziel ist es, das Konzept von VPD als zentrale Leitgröße der modernen Klimaregelung darzustellen. Auf den folgenden Seiten geht es um die biologischen und physikalischen Hintergründe des Themas und deren Zusammenhänge im Indoor-Anbau. Unser Guide zeigt, wie sich die VPD-Werte für VPD_{air} und VPD_{leaf} berechnen. Er beschreibt Zielbereiche für die verschiedenen Wachstumsphasen sowie deren Interpretation. Dazu liefert er konkrete Beispiele zur Praxisanwendung mit GrowControl-Systemen. Illustrationen veranschaulichen schematisch die physiologischen Prozesse und Abläufe.

Der Guide verwendet zum Teil bewusst vereinfachte Begriffe, um praxisrelevante Zusammenhänge klar zu vermitteln. Zum Beispiel wird das Wort „Steuerung“ im Sinne von klimatischer Reizsetzung verwendet. Im Kontext zur Pflanzenphysiologie beschreibt der Begriff keine direkte physiologische Kontrolle.

Hinweise der Redaktion:

Jedes Kapitel enthält zu Beginn eine kompakte Zusammenfassung der wichtigsten Punkte (**Kurz:**).

Das Dokument dient als praxisbezogenes Nachschlagewerk, um gezielt in einzelne Themenbereiche einzusteigen.

Der Guide kann in kleineren Blöcken oder abschnittsweise gelesen werden. Das Inhaltsverzeichnis hilft dabei, schnell das passende Kapitel zu finden.

Einige Aussagen implizieren, dass die Pflanze optimal mit Wasser und Nährstoffen versorgt ist. Zudem gilt in den meisten Fällen die Annahme, dass kein biotischer oder abiotischer Stress vorliegt (Hormondisbalance, Pathogene, Salzstress, etc.).

INHALTSVERZEICHNIS

— 1 — *VPD - Der entscheidende Klimafaktor*

- *Erklärung & Überblick*

— 2 — *Physik & Berechnung*

- *Formeln*
- *Definitionen*
- *Beispielrechnungen*

— 3 — *Sensorik & Messung*

- *Sensoren & Platzierung*
- *Typische Fehlerquellen*
- *Messqualität bewerten*

— 4 — *Zielbereiche & Interpretationen*

- *Zielbereiche nach Stadium*
- *Interpretation & physiologische Effekte nach Wachstumsphase*

— 5 — *Regelprinzipien - Vom Messwert zur stabilen Klimaführung*

- *Wirkungsketten*
- *Einfluss von Sensorik und Aktoren*
- *Regelstrategien - Hysterese, P-, PD- & PID-Regelung*
- *Beispiele: Hysterese & Entfeuchten über die Lüftung mit PID-Regler*

— 6 — *VPD im Crop Steering*

- *Vegetative Steuerung*
- *Generative Steuerung*

— 7 — *Praxisanwendung - Phasen & Zielwerte*

- *Wachstumsphasen*
- *Strategien bei Tag/Nacht-Übergängen*
- *Licht an*
- *Licht aus*
- *Mikroklimata managen*

— 8 — Taupunkt - ΔT (Tag/Nacht)

- **Formel**
- **Beispielrechnung**
- **Zusammenhang von Temperatur, rF% und ΔT (Tag/Nacht)**
- **Maßnahmen zur Taupunkt-Vermeidung**
- **Strategien für ein größeres Tag-Nacht-Delta**
- **Praxiswerte & Sicherheitsabstände**

— 9 — VPD im Kontext zu Licht, CO₂, Bewässerung und Nährstoffen

- **Licht**
- **CO₂-Supplementierung**
- **Nährstoffe & Bewässerung**
- **Zusammenhänge im gesamten System**

— 10 — Troubleshooting - Symptome, Ursachen, Maßnahmen

- **Tabelle**

— 11 — Klima-Checklisten

- **Setup Grundprüfung (bei Start, Umbau oder Neuinstallation)**
- **Täglicher Check - Wachstumsphase**
- **Täglicher Check - Blütephase**
- **Tag/Nacht-Übergänge**
- **Wöchentlicher Check**

VPD - Der entscheidende Klimafaktor

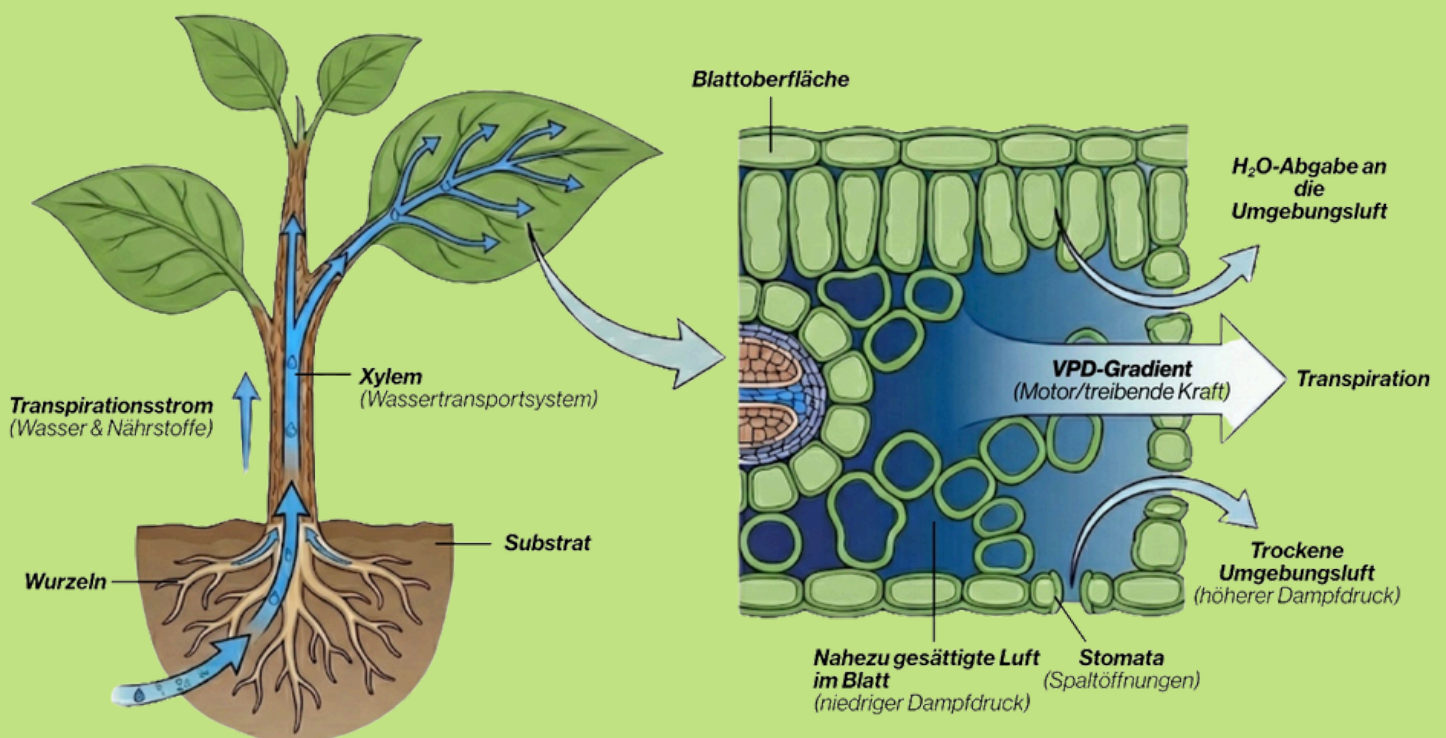
Kurz:



VPD ist das Bindeglied zwischen Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Der Wert hilft dabei, frühzeitig zu erkennen warum Pflanzen stagnieren oder Stress zeigen. Moderne Klimaführung verwendet den VPD zur präzisen Steuerung der Transpiration und bestimmt dadurch den Wasser- und Nährstoffstatus einer Kultur.

VPD (engl.: Vapor Pressure Deficit — Dampfdruckdefizit) beschreibt den Druckunterschied zwischen der praktisch wassergesättigten Blattoberfläche und der Umgebungsluft. Dieser Gradient dient als „Motor“ der Transpiration — also des Wasserflusses durch die Pflanze, vom Wurzelsystem bis zur Blattoberfläche. So beeinflusst der VPD-Wert den Wasser- und Nährstofftransport innerhalb der Pflanze.

Im Gegensatz zu Temperatur und Luftfeuchtigkeit als Einzelwerte fasst der VPD beide Größen zu einem funktionalen Klimaparameter zusammen. Der Wert zeigt unmittelbar, wie stark die Luft Wasser aus den Blättern aufnimmt und damit, wie aktiv Wasser und Nährstoffe durch die Pflanze transportiert werden.



Sowohl bei zu hohem als auch bei zu niedrigem VPD sinkt die Transpirationsrate. Dadurch ist der Gasaustausch der Pflanze gestört und die Photosyntheseleistung wird beeinträchtigt. Die Umgebungsluft darf nicht zu trocken oder zu feucht sein, um die Pflanze im jeweiligen VPD-Zielbereich zu halten.

Ist der VPD-Wert zu niedrig, fließt zu wenig Wasser durch die Pflanze. Da die Luft bereits mit Wasserdampf gesättigt ist, kann keine weitere Feuchtigkeit aus dem Blatt an die Luft abgegeben werden. Der Transpirationsstrom, um Wasser durch das Xylem zu transportieren, sinkt deutlich. Auswirkungen sind gehemmtes oder stagnierendes Wachstum, hängende Blätter oder Nährstoffprobleme. Zusätzlich erhöht ein niedriger VPD das Risiko für Schimmel deutlich.

Ist der VPD-Wert zu hoch, versucht die Pflanze den Wasserverlust zu begrenzen, der durch den hohen Verdunstungsdruck entsteht. Als Reaktion darauf schließen die Stomata (Spaltöffnungen an den Unterseiten der Blätter, vgl. Kapitel 4 & 6). Dies erschwert den Gasaustausch und somit auch die Aufnahme von CO_2 . Es kommt zu sichtbaren Stresssymptomen - ein Verwelken der Pflanze ist ebenfalls möglich.

Ziel sind kontrollierte VPD-Bereiche für jede Wachstumsphase der Kultivierung (Mutterpflanze, Klone, Vegetativ, Generativ). Innerhalb dieser Sweetspots ist die stomatische Leitfähigkeit hoch, der Wasser- und Nährstofffluss stabil und die CO_2 -Aufnahme läuft optimal.

Die Werte aus diesem Guide verstehen sich als Richtlinien, die auf wissenschaftlicher Basis und langjährigen Erfahrungen beruhen.

GROWCONTROL		Physiologische Zielbereiche													
		VPD in kPa													
		Relative Luftfeuchtigkeit, rF%													
°C		35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
15°		1.11	1.02	0.94	0.85	0.77	0.68	0.60	0.51	0.45	0.34	0.26	0.17	0.09	0.05
16°		1.19	1.09	1.00	0.91	0.82	0.73	0.64	0.55	0.46	0.36	0.27	0.18	0.09	0.07
17°		1.28	1.16	1.07	0.97	0.87	0.78	0.68	0.58	0.46	0.39	0.29	0.20	0.10	0.09
18°		1.34	1.26	1.14	1.03	0.93	0.83	0.72	0.62	0.52	0.41	0.31	0.21	0.10	0.10
19°		1.46	1.32	1.21	1.10	0.99	0.88	0.77	0.66	0.55	0.44	0.33	0.22	0.11	0.10
20°		1.52	1.40	1.28	1.17	1.05	0.94	0.82	0.70	0.58	0.47	0.35	0.23	0.12	0.10
21°		1.62	1.49	1.37	1.24	1.12	1.00	0.87	0.75	0.62	0.50	0.37	0.25	0.12	0.11
22°		1.72	1.59	1.45	1.32	1.18	1.05	0.92	0.79	0.66	0.53	0.40	0.26	0.13	0.12
23°		1.83	1.69	1.55	1.41	1.26	1.12	0.98	0.84	0.70	0.56	0.42	0.28	0.14	0.13
24°		1.94	1.79	1.64	1.49	1.34	1.19	1.04	0.89	0.74	0.60	0.45	0.30	0.13	0.14
25°		2.06	1.90	1.74	1.59	1.43	1.12	0.98	0.84	0.70	0.56	0.47	0.28	0.14	0.13
26°		2.18	2.02	1.85	1.68	1.51	1.35	1.18	1.01	0.84	0.67	0.50	0.34	0.17	0.16
27°		2.32	2.14	1.96	1.78	1.61	1.43	1.25	1.07	0.89	0.71	0.54	0.36	0.18	0.17
28°		2.46	2.27	2.08	1.89	1.70	1.51	1.32	1.13	0.95	0.76	0.57	0.38	0.19	0.18
29°		2.61	2.41	2.20	2.00	1.80	1.60	1.40	1.20	1.00	0.60	0.60	0.40	0.20	0.19
30°		2.78	2.56	2.34	2.12	1.91	1.70	1.48	1.27	1.06	0.85	0.64	0.42	0.21	0.20
31°		2.92	2.70	2.47	2.25	2.02	1.80	1.57	1.35	1.12	0.90	0.67	0.45	0.22	0.21
32°		3.10	2.85	2.62	2.36	2.14	1.90	1.67	1.43	1.19	0.95	0.71	0.48	0.24	0.22
33°		3.27	3.00	2.77	2.62	2.27	2.01	1.76	1.51	1.36	1.01	0.76	0.50	0.23	0.23
34°		3.44	3.20	2.96	2.66	2.40	2.13	1.86	1.60	1.33	1.07	0.80	0.53	0.27	0.25
35°		3.86	3.56	3.26	2.97	2.67	2.38	2.08	1.79	1.49	1.19	0.90	0.60	0.30	0.28

Farblegende						
Gefahrenzone	Hoher Stress	Späte Blüte	Vegetation - frühe Blüte	Keimung - Stecklinge	Pathogene	Taupunkt

Wichtig:

VPD ist ein klimatischer Reiz zur Steuerung, kein isolierter biologischer Regler.



VPD bestimmt **NICHT:**

- Die Wurzelgesundheit einer Pflanze
- Die Verfügbarkeit von Nährstoffen im Wasser oder Substrat
- Die genetischen Limits einer Kultur
- Die Limitierung durch andere Parameter



Kurz:

Korrekte Klimaregelung erfordert korrekte Berechnung. Der VPD am Blatt kann vom VPD der Luft abweichen. Die Blattoberflächentemperatur sollte in der Berechnung berücksichtigt werden.

Die Luft kann mit steigender Temperatur mehr Wasserdampf aufnehmen, während die Blattoberfläche nahezu wassergesättigt ist. Der VPD-Wert muss also neben der relativen Luftfeuchtigkeit sowohl die Temperatur der Luft, als auch die des Blattes berücksichtigen. Dieser Wert ist der Sättigungsdampfdruck (saturation vapor pressure) nach Magnus (FAO-56), in kPa.

$$e_s(T) = 0,6105 \times e^{[(17,269 \times T) / (237,3 + T)]}$$

Daraus ergeben sich zwei Formeln für den VPD-Wert:

$$VPD_{air} = e_s(T_{air}) \times (1 - rh)$$

$$VPD_{leaf} = e_s(T_{leaf}) - rh \times e_s(T_{air})$$

Definitionen der Angaben:

rh: relative humidity (Luftfeuchtigkeit), dezimal z.B. 60% rh = 0,6

T_{air} : Raumtemperatur in °C

T_{leaf} : Blattoberflächentemperatur in °C

$e_s(T)$: Sättigungsdampfdruck in kPa

e: $\approx 2,718$ (Eulersche Zahl)

Beispielrechnungen für VPD_{air} und VPD_{leaf} :

Angenommene Werte: $T_{air} = 26^{\circ}\text{C}$ | $rh = 60\%$ | $T_{leaf} = 28^{\circ}\text{C}$

$$e_s(26) = 0,6105 \times e^{[(17,269 \times 26) / (237,3 + 26)]}$$

$$= 0,6105 \times e^{(448,99 / 263,3)}$$

$$= 0,6105 \times e^{1,70524117}$$

$$= 0,6105 \times 5,502$$

$$\approx 3,36 \text{ kPa}$$

Für $T_{leaf} = 28^{\circ}\text{C}$ erfolgt dieselbe Berechnung

$$e_s(28) = 0,6105 \times e^{[(17,269 \times 28) / (237,3 + 28)]}$$

$$= 0,6105 \times e^{(483,53 / 266,3)}$$

$$= 0,6105 \times e^{1,815734134}$$

$$= 0,6105 \times 6,145$$

$$\approx 3,75 \text{ kPa}$$

$$\mathbf{VPD_{air}} = 3,36 \times (1 - 0,6) = 3,36 \times 0,4 = \underline{1,344 \text{ kPa}}$$

$$\mathbf{VPD_{leaf}} = 3,75 - 0,6 \times 3,36 = 3,75 - 2,016 = \underline{1,734 \text{ kPa}}$$

Es wird deutlich, dass sich der VPD-Wert am Blatt um 0,4 kPa erhöht, wenn die Blatttemperatur $+2^{\circ}\text{C}$ zur Raumtemperatur beträgt. Eine präzise Bestimmung des VPD setzt demnach die Messung der Blatttemperatur voraus.

•GROWCONTROL

— 3 —

Sensorik & Messung



Kurz:

Dieses Kapitel zeigt, wie Sensoren positioniert und Messwerte korrekt interpretiert werden. Eine zuverlässige Sensorik gehört zur Grundausstattung einer reproduzierbaren Klimaführung.

Sensoren & Platzierung:

Eine verlässliche VPD-Regelung steht und fällt mit der Qualität der Sensorik.

Da der VPD ein abgeleiteter Wert ist, hängt seine Genauigkeit vollständig von den exakten Messungen der Lufttemperatur (T_{air}), der relativen Luftfeuchtigkeit ($rF/rh\%$) und der Blatttemperatur (T_{leaf}) ab. Schon geringe Messfehler um $\pm 1^\circ\text{C}$ oder $\pm 2\%$ rF können den berechneten VPD um 0,1-0,3 kPa verschieben.

Temperatur/Luftfeuchte (RHT) Sensor:

Der Kombifühler wird auf Blatthöhe und im Hauptluftstrom platziert. Reflexionen oder Wärmestau an Oberflächen können zu überhöhten Temperaturwerten führen. Wände, Ecken oder „tote Zonen“ (ohne Luftbewegung) verfälschen die Messwerte. Der Sensor sollte dort messen, wo sich das Hauptvolumen der Blattmasse befindet. Alternativ kann dieser oder ein zweiter Sensor auch im Blätterdach, unterhalb der oberen Blattlinie platziert werden.

Zuluft Sensor:

Ein zusätzlicher RHT-Sensor vor der Zuluftleitung oder im Lungenraum ist sinnvoll, um den Einfluss der Umgebungsluft auf das Raumklima zu überwachen. Mit diesen Daten kann der Controller fundierte Entscheidungen treffen. Dadurch wird verhindert, dass die Lüftung unnötig stark betrieben wird, wenn die Frischluft aktuell weder zum Kühlen noch zum Entfeuchten geeignet ist. In solchen Situationen kann ein angeschlossener Luftentfeuchter gezielter und effektiver arbeiten.

IRCube:

Der IRCube misst die Oberflächentemperatur der Blätter mittels Infrarot Strahlung. Das Sichtfeld (FOV) muss vollständig mit Blättern gefüllt sein. Man kann es sich als Kegel mit einem Winkel von $\sim 30^\circ$ vorstellen. Solange das Sichtfeld ausgefüllt ist, ist der Abstand dabei weniger entscheidend.

Multi-Sensor- Betrieb (GrowBase Pro):

In größeren Räumen oder heterogenen Klimazonen empfiehlt sich die Nutzung mehrerer Sensoren. Der Controller bildet daraus Mittel-, Minimum- oder Maximumwerte. Das erlaubt beispielsweise eine konservative Regelung auf Basis der minimalen rF% (z.B. als „worst case“). Durch die Verwendung von mehreren Sensoren können Mikroklimata entdeckt und Risiken für Schimmel vermieden werden.

Typische Fehlerquellen:

In der Praxis sind die folgenden Punkte häufiger die Ursache für instabile Regelung als der Controller selbst.

- Strahlungswärme: Sensor zu nah am Licht $\rightarrow T_{\text{air}}$ zu hoch \rightarrow unnötige Befeuchtung
- Einzelsensor in großem Raum: Mikroklimata bleiben unentdeckt \rightarrow lokale Probleme
- IRCube Sichtfeld falsch: Messung an Boden/Topf $\rightarrow T_{\text{leaf}}$ zu niedrig \rightarrow VPD falsch
- Kondensation am Sensor: durch ΔT Schwankung \rightarrow träge oder falsche rF-Werte

Messqualität bewerten:

Eine gute VPD-Regelung erkennt man an stabilen Trendverläufen. Typische Indikatoren sind:

- VPD Abweichung $< \pm 0,1 \text{ kPa}$ über mehrere Stunden
- ΔT (Tag/Nacht) konstant bei $2\text{-}4^\circ\text{C}$
- T_{leaf} konstant bei $-1\text{-}2^\circ\text{C}$ (stabiler Turgor in den Blättern, Pflanze gut bewässert)
- rF-Schwankung $< 3\%$ bei stabiler Umluft und $1,5\%$ Hysterese

Unstetige oder zackige Trends weisen meist auf Luftstau, unzureichende Umluft oder fehlerhafte Einstellungen hin. Der Controller kann nur so präzise regeln, wie die Sensorik misst. Eine korrekte Installation, Kontrollmessungen und das Verständnis der Messlogik sind ausschlaggebend. So lässt sich der VPD als reproduzierbare Leitgröße und praxisrelevantes Signal für Pflanzengesundheit und Klimastabilität nutzen.

Ohne IRCube als Sensor, basiert die VPD-Regelung auf einem manuell definierten ΔT zwischen Blatt- und Lufttemperatur. Die Blatttemperatur sollte regelmäßig gegen reale Bedingungen geprüft werden, da dieser Wert auch von der Lichtleistung, der Umluft und der Dichte des Blätterdaches abhängt. Ein falsch gesetztes ΔT kann zu Fehlern führen.

Ein periodischer Abgleich (z.B. wöchentlich) sorgt dafür, dass der Betrieb reproduzierbar läuft. Die Temperatur von Oberflächen lässt sich auch mit einem Laser-Thermometer oder einer Wärmebild-Kamera verifizieren.

Zielbereiche & Interpretationen



Kurz:

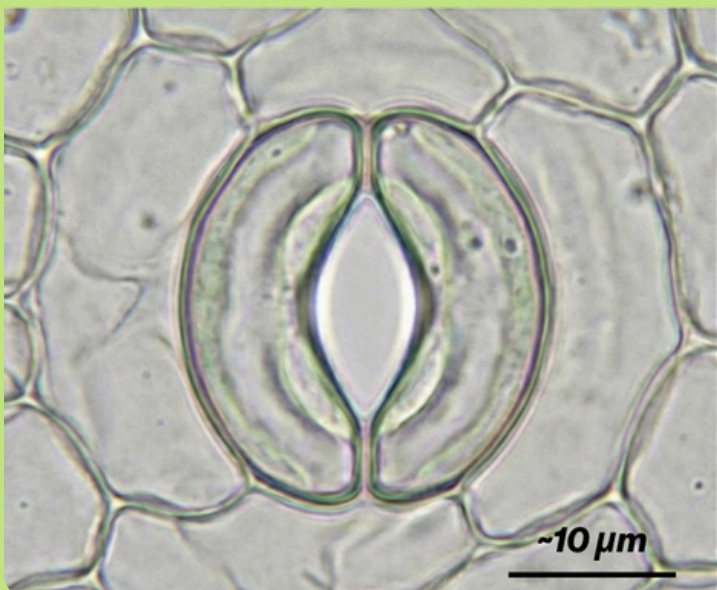
Der richtige VPD trennt Vitalität von Stress. Für jede Wachstumsphase einer Kultur gibt es definierte Zielbereiche. Konstante Trends sind wichtiger als Momentwerte. VPD hat einen Einfluss auf die physiologischen Prozesse einer Pflanze.

Im professionellen Anbau hängt der optimale VPD-Bereich auch vom Stadium und der genetischen Toleranz der Pflanze ab. Während Stecklinge eine nahezu gesättigte Umgebung für die Wurzelinduktion benötigen, profitieren etablierte Pflanzen von einer höheren Verdunstungsrate.

Bei einem stabilen VPD innerhalb des Zielbereiches ist die Leitfähigkeit der Stomata (Spaltöffnungen, sgl. Stoma, griechisch = Mund) in der Regel hoch. Dadurch bleibt die Transpiration und der Wasser- und Nährstofffluss weitestgehend konstant. Die Voraussetzung dafür ist, dass das System nicht durch andere Parameter wie Licht, Bewässerung, CO₂, etc. limitiert wird (Vgl. Kapitel 6).

In manchen Fällen können schon kleinere Abweichungen von ~0,2 kPa sichtbare Auswirkungen auf das Wachstum, die Blütengröße und die Schimmelfanfälligkeit einiger Kulturen haben. Dies hängt jedoch auch mit andern biotischen und abiotischen Faktoren zusammen.

Stoma geöffnet



Stoma geschlossen



Wichtig:

Entscheidend ist, dass der VPD im biologischen Gleichgewicht zwischen Transpiration, Wasser- und Nährstoffhaushalt und Gasaustausch einer Kultur liegt.

Weicht der VPD-Wert dauerhaft vom optimalen Bereich ab, wird die stomatische Leitfähigkeit beeinträchtigt. Bei zu hohem VPD (warm + trocken) schließen die Stomata und die Transpiration bricht ab. Ist der Wert zu niedrig (kühl + feucht), reicht der Gradient nicht aus, um Wasser aus dem Blatt zu ziehen.

VPD-Werte oberhalb des genetischen Optimums einer Kultur steigern zusätzlich den Wasserverbrauch. Liegt der Wert konstant unter dem optimalen Bereich, ist der Wasserfluss im Xylem gehemmt und die Ionenmobilität sinkt. Die Folgen können Mangelerscheinungen sein, obwohl genug Nährstoffe vorhanden sind und die Bewässerungs- und Substratwerte stimmen.

Die Zielbereiche müssen anhand der Trenddaten validiert werden. Kurzzeitige Spitzen (Peaks) oder Momentwerte sind weniger aussagekräftig, solange der durchschnittliche Verlauf innerhalb des physiologischen Fensters liegt.

Für die Pflanze ist relevant, wie lange sie in optimaler Umgebung verbringt. Ein VPD, der über Stunden konstant im Zielbereich liegt, wirkt sich messbar auf die Nährstoffmobilität, die stomatische Leitfähigkeit, die CO₂-Aufnahme und den Turgor (Zellinnendruck) der Pflanze aus. Für eine korrekte Interpretation der Messwerte ist die konstante Trendqualität wichtiger als Einzelmessungen.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die VPD-Zielwerte in den einzelnen Wachstumsphasen. Die Werte können für unterschiedliche Genetiken und Kulturen variieren und bilden keine absoluten Kennzahlen ab.

Hinweis:

VPD-Zielbereiche unterliegen einer genetischen Bandbreite. Kulturen mit hoher Transpirationsrate tolerieren teilweise höhere VPD-Setpoints, während andere Genetiken bereits früher Anzeichen von Stress zeigen.



Entscheidend hierfür ist der Zusammenhang zwischen der stomatischen Leitfähigkeit und dem Ionentransport der Pflanze. Beispielsweise können Sorten, die zu Ca/Mg-Mangel neigen, einen eher moderaten VPD-Bereich benötigen (0,8-1,2 kPa). Die Zielbereiche sind daher als physiologische Fenster zu interpretieren und stellen keine festen Vorgaben dar.

Zielbereiche nach Stadium:

Phase	Zielbereich VPD_{leaf} (kPa)	Risiken bei Abweichung
Stecklinge/Propagation	0,2 - 0,6	Zu hoch: Welken, langsames Anwurzeln Zu niedrig: Stagnation, Schimmelrisiko
Vegetation	0,8 - 1,2	Zu hoch: Stressfaktor, hoher Wasserverbrauch, Nährstoffüberschuss Zu niedrig: schlaaffe Blätter, gehemmtes Wachstum
Blüte (früh)	1,1 - 1,5	Zu hoch: Qualität nimmt ab, Stressfaktor Zu niedrig: Schimmelrisiko, Überwässerung
Blüte (mittel/spät)	1,3 - 1,6	Zu hoch: Stressfaktor, Qualitätsverlust, Welken möglich Zu niedrig: Feuchtequellen, Schimmelrisiko

Interpretation & Physiologische Effekte nach Wachstumsphasen:

Das richtige VPD-Fenster im Bezug auf die jeweilige Genetik der Pflanze ist der Kern der modernen Klimaführung. Wer die Biologie und Physiologie hinter den Zielbereichen kennt und versteht, kontrolliert gezielt die Transpiration, den Wasser- und Nährstoffhaushalt, sowie den Gasaustausch der Pflanze. Im Vordergrund stehen dabei stabile Trendverläufe ohne dauerhafte Abweichungen oder Verlaufsspitzen.

Stecklinge/ Propagation (0,2 - 0,6 kPa):

In dieser Phase sind die Wurzeln noch nicht aktiv. Der Wassertransport verläuft hauptsächlich über die Blätter. Eine hohe Luftfeuchtigkeit hält den VPD niedrig und verhindert ein frühzeitiges Welken der Pflanze. Gleichzeitig ist eine sanfte Umluft nötig, um stehende Feuchte zu vermeiden. Andernfalls steigt das Risiko für Schimmel oder Bakterienfilme auf den Blattoberflächen.

Vegetation (0,8 - 1,2 kPa):

Ein moderater VPD fördert den aktiven Wasserfluss, die Zellstreckung und eine hohe stomatische Aktivität. Der Stoffwechsel läuft am Optimum und die Pflanze bildet kräftige, gesunde Blätter. Liegt der VPD dauerhaft unter 0,8 kPa, wird das Transpirationssignal zu schwach. Blätter wirken schlapp und beginnen zu hängen – die Pflanze wird geschwächt und ist anfälliger für Infektionen.

Blüte früh (1,1 - 1,5 kPa):

Die Pflanze wechselt von vegetativem Wachstum in die generative Entwicklung. Jetzt zählt ein stabiler Gasaustausch bei zugleich kontrollierter Blattkühlung.

In einem dicht bewachsenen Blätterdach begünstigt ein zu niedriger VPD die Bildung von Kondenswasser, was ein großes Risiko für Schimmel birgt (vgl. Kapitel 8). Ein zu hoher VPD hemmt die Photosyntheseleistung, da sich durch die trockene Luft die Stomata verschließen. Dies kann im späteren Verlauf die Qualität der Blüten vermindern.

Blüte mittel/spät (1,3 - 1,6 kPa):

Mit zunehmender Biomasse und zunehmender Dichte der Blütenstände steigt erneut das Risiko für lokale Feuchtezonen und damit auch für Pilzbefall innerhalb der Blüten. Ein leicht erhöhter VPD sorgt für effektive Lufttrocknung und reduziert die Gefahr für Schimmel deutlich.

Werte ab 2,0 kPa sind jedoch eher als kritisch anzusehen, da sich unter diesen Bedingungen die Stomata schließen. Dies hemmt den Gasaustausch und vermindert die Aufnahme von CO_2 , was wiederum die Photosyntheseleistung beeinträchtigt.

Profi-Wissen:



Blütenstände besitzen kaum bis keine Stomata. Im Gegensatz zu Blättern können sie sich nicht durch Transpiration selbstständig kühlen. Daher kann die Oberflächentemperatur der Blütenstände (zum Teil deutlich) über der gemessenen Blatttemperatur liegen.

Regelprinzipien - vom Messwert zur stabilen Klimaführung



Kurz:

Ein stabiler VPD entsteht nicht zufällig, sondern durch eine präzise Regelstrategie. Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden angepasst, um den VPD in einem gewünschten Bereich zu halten. Die Priorisierung der Regellogik ermöglicht eine effizientere Schaltung der Geräte (Hysterese vs. PID).

Da der VPD nicht direkt messbar, sondern ein abgeleiteter Wert ist, hängt seine Stabilität von der präzisen Regelung zweier physikalischer Werte ab: der relativen Luftfeuchtigkeit ($rF\%$) und der Lufttemperatur (T_{air}). Zusätzlich beeinflusst das Temperaturgefälle (ΔT) zwischen Blatt und Luft den tatsächlichen VPD-Wert am Blatt (VPD_{leaf}).

Die VPD-Regelung erfolgt also indirekt durch die Veränderung der Klimaparameter T_{air} und $rF\%$. Jede Änderung an einem dieser Punkte wirkt sich unmittelbar auf die anderen Faktoren aus.

Befeuchter, Entfeuchter, Heizung, Abluft und Zuluft beeinflussen sich gegenseitig. Ohne manuelle Priorisierung arbeiten diese Einheiten oft gegeneinander. Häufig laufen Be- und Entfeuchter abwechselnd, obwohl der VPD nur minimal schwankt.

Eine korrekte Regelstrategie ist über Priorisierungen definiert. Ein praktisches Beispiel hierfür ist die Möglichkeit, entweder über die Abluft oder die Heizung zu entfeuchten. Das Entfeuchten über die Abluft hat in der Regel auch eine Absenkung der Temperatur zur Folge. Ziel ist, eine unnötige Gegensteuerung der einzelnen Geräte möglichst zu vermeiden.

Wenn diese Parameter in Echtzeit berechnet und aufeinander abgestimmt werden, bleibt der VPD konstant im Zielbereich. Ein vorausschauendes Klimamanagement seitens des Growers hält Schwankungen innerhalb enger Toleranzen und verhindert Temperatur- oder Feuchtedrifts nach oben oder unten.

Wirkungsketten (Beispiele):

- Befeuchter an \rightarrow Luftfeuchtigkeit steigt \rightarrow VPD_{air} sinkt \rightarrow VPD_{leaf} sinkt
- Entfeuchter an \rightarrow Luftfeuchtigkeit sinkt \rightarrow VPD_{air} steigt \rightarrow VPD_{leaf} steigt
- Heizung an \rightarrow T_{air} steigt \rightarrow Luftfeuchtigkeit sinkt (meistens) \rightarrow VPD_{air} steigt
- Mehr Abluft/Klimaanlage \rightarrow T_{air} sinkt \rightarrow Luftfeuchtigkeit sinkt \rightarrow VPD_{air} schwankt
- Umluft erhöhen \rightarrow ΔT (Blatt/Raum) sinkt \rightarrow VPD_{leaf} nähert sich VPD_{air}

Diese Zusammenhänge verdeutlichen, dass der VPD nur durch eine präzise abgestimmte Klimaregelung dauerhaft und konstant in einem gewünschten Bereich gehalten werden kann. Eine solche Regelung berücksichtigt die Messwerte, berechnet diese automatisch und steuert alle dazu benötigten Geräte effizient an.

Einfluss von Sensorik und Aktoren:

Die Regeldynamik wird maßgeblich von der Reaktionszeit der Sensoren sowie von der Trägheit der Stellglieder (z.B. Befeuchter, Entfeuchter, Lüfter) beeinflusst. Diese Verzögerung wird als Totzeit des Regelsystems bezeichnet.

Träge Sensoren oder ungünstig platzierte Messpunkte können dazu führen, dass der Istwert dem tatsächlichen Raumklima zeitlich hinterherläuft. Dies erhöht insbesondere bei PID-Reglern die Gefahr von Überschwingungen.

Eine korrekte Platzierung der Sensoren reduziert die Totzeit deutlich. Zusätzlich kann die Messung durch eine Multi-Sensor-Logik stabilisiert werden (vgl. Kapitel 3 & 7).

Regelstrategien - Hysterese, P/PD & PID:

Um den VPD-Wert gezielt zu beeinflussen, kann der Controller die nötige Luftfeuchtigkeit berechnen, die nötig ist, um bei bekannter Luft- und Blatttemperatur den gewünschten VPD-Sollwert zu erreichen.

Zur Veränderung der Luftfeuchtigkeit stehen folgende Stellmöglichkeiten zur Verfügung:

- Befeuchten mit einem Luftbefeuchter
- Entfeuchten mit einem Luftentfeuchter
- Entfeuchten über die Lüftung
- Entfeuchten über die Heizung

P-, PD- & PID-Regelung:

Zur Regelung der Luftfeuchtigkeit durch Ansteuerung von Befeuchtern, Enfeuchtern oder Lüftern können z.B. P-, PI-, PD- oder PId-Regler eingesetzt werden.

P, I und D stehen dabei für **Proportional**-, **Integral**- und **Differential**-Anteil in der Regelung.

P-Regler:

Ein P-Regler berücksichtigt ausschließlich die momentane Regelabweichung, also die Differenz zwischen Soll- und Istwert.

PD-Regler:

Ein PD-Regler berücksichtigt zusätzlich die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung. Der Differentailanteil wirkt vorausschauend und dämpfend, indem die Stellgröße bereits angepasst wird, bevor der Sollwert überschritten wird. Dadurch können schnelle Änderungen abgefangen und Überschwingungen reduziert werden.

PID-Regler:

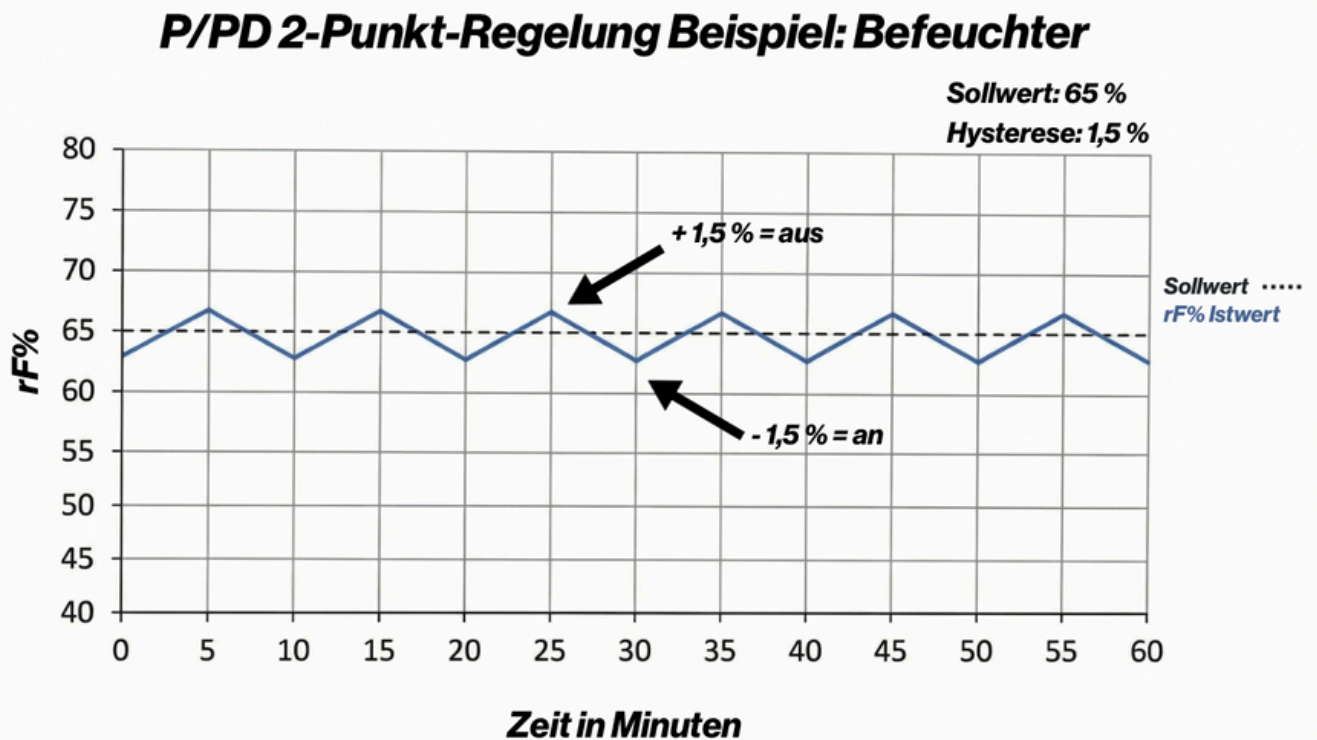
Bei einem PID-Regler wird der P- und der D-Anteil um den Intergralanteil ergänzt. Dieser sorgt dafür, dass auch kleine, dauerhaft bestehende Abweichungen zwischen Soll- und Istwert vollständig ausgeglichen werden.

Die GrowBase Pro sowie andere unserer Controller erlauben in bestimmten Anwendungen die Auswahl des Regler-Typs und der zugehörigen Abstimmungsparameter.

Beispiel: Hysterese

Ein Zweipunktregler kennt nur zwei Zustände: **EIN** und **AUS**. Die Hysterese definiert den Abstand zwischen Ein- und Ausschaltpunkt.

Der Regler schaltet den Befeuchter ein, wenn der Istwert den Sollwert um den Betrag der Hysterese unterschreitet. Er schaltet den Befeuchter wieder aus, wenn der Istwert den Sollwert um den gleichen Betrag überschreitet.



Hinweis:



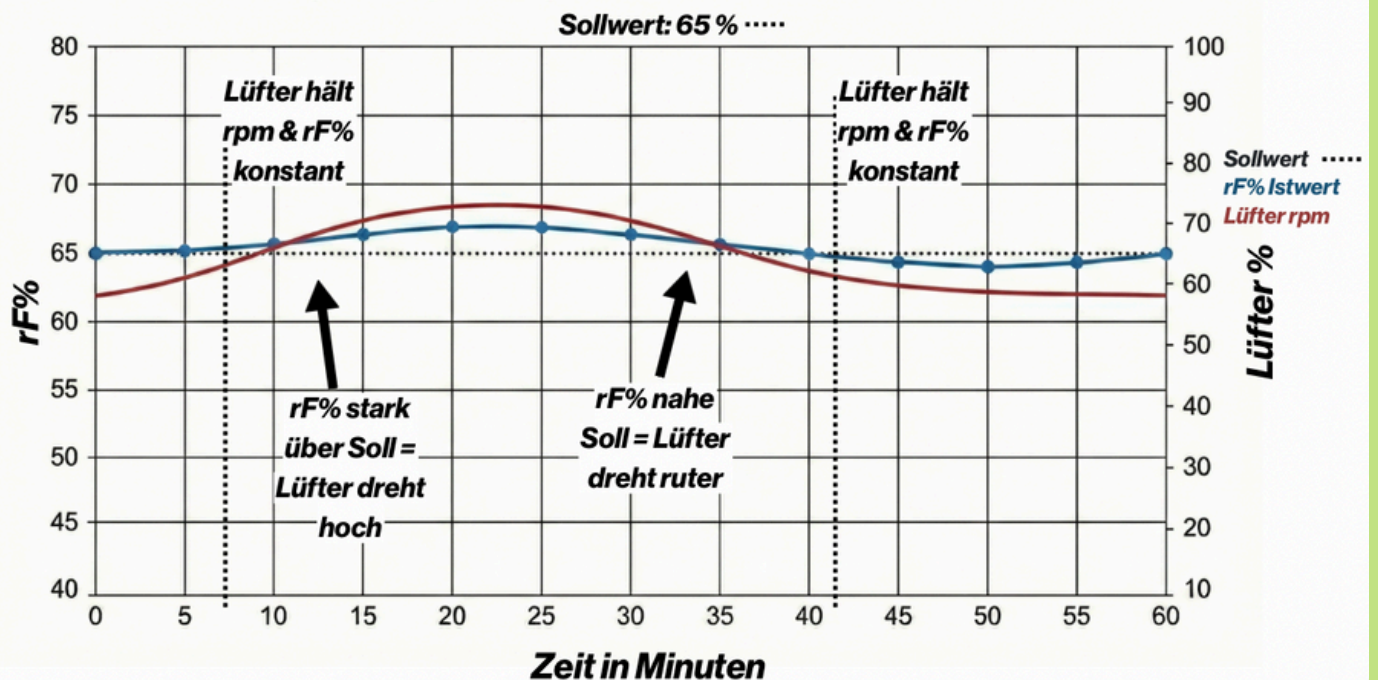
Der abgebildete Graph dient ausschließlich als schematische Veranschaulichung. Die tatsächlichen Regelverläufe können in der Praxis abweichen. Alle dargestellten Werte sind beispielhaft gewählt.

Beispiel: Entfeuchten über die Lüftung mit PID-Regler

Die Drehzahl (rpm) der Lüftung kann stufenlos verändert werden, wodurch beim Entfeuchten über die Lüftung ein harmonischer Verlauf entsteht. Die Drehzahl des Lüfters wird so angepasst, dass der Luftfeuchte-Sollwert möglichst genau gehalten wird.

Da bei offenen Systemen in der Regel auch die Temperatur über die Lüftung geregelt wird, muss der Controller gegebenenfalls Kompromisse zwischen Temperatur- und Luftfeuchteregelung treffen.

PID-Regelung Beispiel: Entfeuchten über Abluft



Hinweis:



Der abgebildete Graph dient ausschließlich als schematische Veranschaulichung. Die tatsächlichen Regelverläufe können in der Praxis abweichen. Alle dargestellten Werte sind beispielhaft gewählt.

VPD im Crop Steering



Kurz:

Der VPD ist eines der Signale, mit denen sich Pflanzen gezielt vegetativ oder generativ steuern lassen. Kontrollierte Anpassungen im Klima haben Einfluss auf die Morphologie. Ein optimales Zusammenspiel des gesamten Systems ist nötig, um das volle Potential einer Kultur zu erreichen.

Crop Steering beschreibt den gezielten Eingriff in physiologische Prozesse einer Pflanze durch kontrollierte Steuerung der Umweltreize (Beleuchtung, Nährstoffe, Bewässerung, Substrattemperatur, VWC, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, VPD). Ziel ist, die Pflanze aktiv in eine vegetative oder generative Richtung zu lenken. Neben Licht, Nährstoffmanagement und Bewässerungsstrategie spielt dabei auch der VPD-Wert eine zentrale Rolle. Dieser Guide befasst sich mit den Zusammenhängen von VPD zu anderen Umweltparametern und geht nicht spezifisch auf jedes Element im System ein (vgl. Kapitel 9).

Sollen Pflanzen gezielt gesteuert werden, reicht es nicht, einen bestimmten VPD-Wert zu halten. Der Wert muss gezielt variiert werden, um vegetative oder generative Reize in der Pflanze zu auszulösen. Durch die präzise Regelung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wird der VPD-Wert zu einem steuerbaren Umweltsignal in professionellen Kulturen.

Der VPD als Regelgröße hat einen Einfluss auf die stomatische Leitfähigkeit (stomatal conductance). Eine hohe Leitfähigkeit bedeutet weit geöffnete Stomata. Wird die Leitfähigkeit reduziert, sinkt die Transpirationsrate. Die Pflanze verdunstet weniger Wasser.

Über die Stomata findet zudem der Gasaustausch statt. Bei verminderter Leitfähigkeit, nimmt die Aufnahme von CO_2 ab, was wiederum die Photosyntheseleistung einschränkt. Der VPD-Wert beeinflusst dabei, wie stark die Luft Wasser aus den Blättern zieht (Transpirationsdruck). Dies lässt sich unmittelbar in die Bewässerungsstrategie einbeziehen.

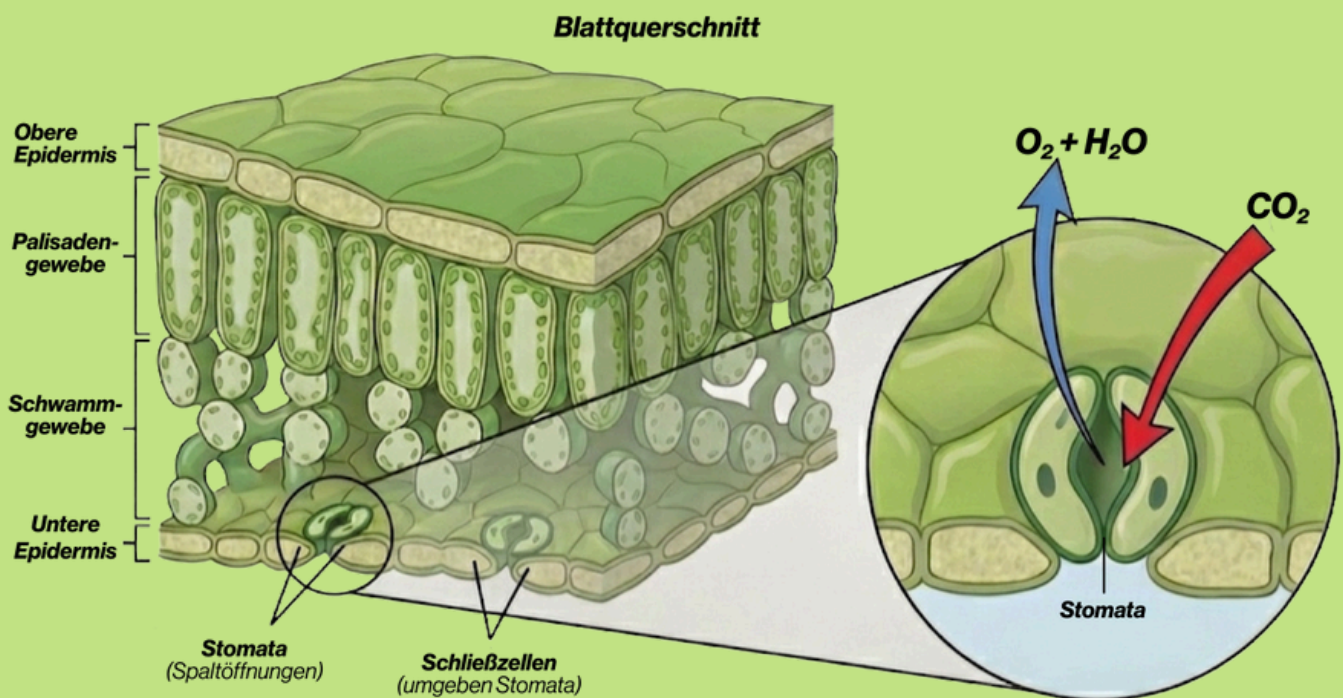
Im modernen Crop-Steering dient der VPD als Kontrollparameter und aktives Steuerelement. Der präzise Wechsel zwischen vegetativer und generativer Phase ermöglicht unterschiedliche Strategien zur Steuerung von Kulturen. Diese Methoden werden genutzt, um hormonelle und physiologische Reaktionen zu induzieren und so die Morphologie der Pflanze zu verändern.

Vegetative Steuerung:

Ein moderater VPD fördert üppiges, vitales Wachstum. Die Stomata bleiben geöffnet und die Transpiration ist aktiv. Der Wasser- und Nährstofffluss ist ausreichend, der Zellinnendruck (Turgor) ist stark. Optisch zeigen sich kräftige, „betende“ Blätter, ausgeprägte Seitentriebe und breite Internodien. Die gleichmäßige Transpiration fördert die Bildung von Blattmasse. Das Verhältnis zwischen Wurzel- und Sprosswachstum ist ausgeglichen. In dieser Phase können kurze Schwankungen im VPD das Verhältnis von Zellteilung zu Zellstreckung beeinflussen. Dies verändert die Struktur des Pflanzenaufbaus.

Generative Steuerung:

Durch einen erhöhten VPD, im Zusammenspiel mit der angepassten Beleuchtungs- und Bewässerungsstrategie, erhält die Pflanze ein Stresssignal für Wasserknappheit. Die stomatische Leitfähigkeit wird reduziert, dadurch sinken Transpiration und Gasaustausch. Gleichzeitig verschiebt sich die hormonelle Aktivität der Pflanze als Reaktion auf das generative Signal. Dadurch wird ein kompakterer Wuchs und einer erhöhter Blütendichte begünstigt. Diese Phase fördert die Bildung von Blüten, Früchten und sekundären Pflanzenstoffen, da die Pflanze ihre Ressourcen von vegetativem Wachstum in die Reproduktion verlagert.



Hinweis:



VPD-Signale funktioniert in kleinen Schritten. Ein abrupter Sprung z.B. von 1,0 auf 1,8 kPa ist Stress für die Pflanze. Crop Steering arbeitet mit feinen Anpassungen innerhalb eines physiologisch tolerierten Spektrums.

Praxisanwendung - Phasen & Zielwerte



Kurz:

Im Zyklus der Pflanze werden die VPD-Zielwerte verändert, um Stress zu vermeiden und das Risiko für Schimmel zu minimieren. Mikroklimata und zu starke Tag/Nacht-Übergänge erhöhen die Wahrscheinlichkeit für Ernteaufschläge oder Infektionen.

Stecklinge/Propagation:

Während der Propagation liegt der Fokus auf der Wurzelbildung. Hier bleibt der VPD niedrig, um den Transpirationsdruck zu minimieren (0,2 - 0,6 kPa). Eine aktive Steuerung ist in diesem Stadium nur begrenzt sinnvoll, da der Wassertransport fast ausschließlich über das Blatt erfolgt.

Die Luftfeuchtigkeit sollte in dieser Phase tendenziell hoch (>80%) und in einem stabilen Bereich gehalten werden. VPD Übergänge, um die Pflanze auf das Vegetations-Klima vorzubereiten, erfolgen in kleinen Schritten über 24-48 Stunden (z.B. 0,3 → 0,45 → 0,6 kPa). Dies ist physiologisch stabiler als direkte Sprünge von 0,2 auf 0,6 kPa.

Vegetation (Wachstum):

Mit zunehmender Größe des Wurzelsystems in der vegetativen Phase wird ein stärkerer Wasserfluss aufgebaut. Ein moderater VPD (0,8 - 1,0 kPa) sorgt für konstante Transpiration, schnelles Sprosswachstum und einen kräftigen Turgor (Zellinnendruck). In diesem Stadium wird der VPD wesentlich stärker durch die Lichtleistung beeinflusst.

Hohe PPFD-Werte können die Blatttemperatur schneller erhöhen als die Temperatur der Luft, wodurch sich der VPD_{leaf} kurzzeitig vom errechneten VPD_{air} abkoppelt. Eine leichte Absenkung des VPD um 0,05-0,1 kPa während der Hauptlichtphase stabilisiert den Turgor und verhindert eine übermäßige Ionenkonzentration im Blatt.

Gleichzeitig sollte das ΔT (Blatt/Luft) eng überwacht werden. Eine Abweichung von $>+2^{\circ}C$ am Blatt kann eine unzureichende Wasserversorgung oder zu hohe Strahlungslast signalisieren (z.B. wenn Far-Red-, oder Infrarot-Beleuchtung verwendet wird).

Generativ (Blüte):

Zu Beginn der frühen Blüte kann der VPD leicht angehoben werden (1,1 - 1,4 kPa). Der Wasserfluss soll weiterhin aktiv gehalten, aber übermäßiges vegetatives Wachstum gebremst werden. Diese Phase ist typischerweise sensibel für hohe Feuchtwerte, besonders zum Ende der Dunkelphase.

Startet der VPD morgens zu niedrig ($<0,9$ kPa), kann dies zu Kondensation innerhalb des Blätterdaches führen. Diese feuchten Zonen begünstigen Pilzinfektionen und andere pathogene Erkrankungen. Über die Regelstrategie kann schon in der Nachtphase gegengesteuert werden.

Funktionen wie „Preheating“ oder Entfeuchten über Heizung können nächtliche VPD-Drifts verhindern. Ein Startwert von 1,1-1,2 kPa schon vor Licht an vermeidet Stressreaktionen und fördert eine saubere Blüteinduktion.

In der mittleren bis späten Blütephase kann das Klima erneut etwas trockener geführt werden (1,3 - 1,7 kPa). Die Pflanze interpretiert das als Reifungssignal; die Blütenstände verdichten sich weiter.

Gleichzeitig nimmt die Transpiration in dichten Blätterdächern lokal ab, wodurch sich „Hotspots“ mit hoher Luftfeuchtigkeit bilden. Bei VPD-Werten von 1,4-1,7 kPa nimmt die Luft das verdunstende Wasser stärker auf. Dies reduziert den Feuchtegradienten innerhalb des Blätterdaches.

Feuchte Zonen in diesem Stadium können zu Schimmel und Ernteaussfällen führen. Bei sehr kompakten Sorten kann das VPD-Ziel zum Ende der Blüte auch auf 1,6 - 1,8 kPa steigen (ggf. sogar höher).

Reifung:

Sobald sich die Pflanze hormonell auf die Reifung einstellt, steigt der Energiebedarf im Blütencluster. Die Blatttemperatur wird in dieser Phase oft unterschätzt. Regelmäßige T_{leaf} Messungen an unterschiedlichen Positionen können verdeutlichen, wo lokale Übertemperaturen entstehen, die den VPD_{leaf} in kritische Bereiche bewegen. Gezielte Korrekturen der Umluft können hierbei effektiver sein als das Entfeuchten der Raumluft.

Zeitliche Einordnung:

Vegetatives „Bulking“ beginnt, wenn die generative Streckphase („Stretch“) beendet ist. Bei den meisten modernen Kultivaren mit 8 Wochen Blütezeit liegt dieser Übergang zwischen Blütetag 14-21.



Nach dieser Zeit kann der VPD wieder moderat vegetativ eingestellt werden (1,2-1,5 kPa), damit die Transpiration hoch bleibt, ohne die Stomata zu schließen. Dies fördert die CO_2 Aufnahme und erhöht die Photosyntheseleistung in dieser Phase. Dadurch können dichtere Blütenstände gebildet werden.

Strategien bei Tag/Nacht-Übergängen:

Der Wechsel zwischen den Lichtphasen ist eine der kritischsten Punkte für ein stabiles Klima. Bei Licht an kann die Blatttemperatur schneller als die Lufttemperatur ansteigen. Der VPD am Blatt springt und es folgt ein kurzzeitiger Transpirationsschock.

Im Übergang zur Dunkelphase geschieht dann das Gegenteil. Die Temperatur sinkt rapide, während die Luftfeuchtigkeit steigt. Kondensation ist möglich. Das Risiko für Schimmel nimmt zu, insbesondere in dichten Blätterdächern. Diese Momente können jedoch aktiv abgefedert werden.

Eine stabile VPD-Führung in diesen Übergangsphasen erfordert zeitlich abgestimmte Regelung der Geräte. Bereits vor dem Lichtwechsel sollte die Veränderung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit antizipiert werden. Heizung, Entfeuchter und Umluft können genutzt werden, um den VPD-Gradienten abzuflachen. Hierfür eignet sich z.B ein abgestuftes „Temperatur-Ramping“ über etwa 10-20 Minuten.

In dicht bewachsenen Beständen können abrupte Übergänge zu Problemen führen, da sich vereinzelt Mikroklimata oder Feuchtezonen bilden können. Diese werden von falsch platzierten oder fehlkalibrierten Sensoren nicht erkannt. Die Multi-Sensor-Funktion der GrowBase Pro eignet sich als weiteres Instrument zur Fehlerminimierung.

Licht an:

Ziel ist ein kontrollierter Temperaturanstieg und ein stabiles ΔT zwischen Luft und Blatt. Die GrowBase Pro ermöglicht dies über „Soft-Start-Szenarien“. Die Temperatur kann schon vor Licht an schrittweise angehoben werden (Preheat).

Wenn möglich kann die Umluftleistung manuell leicht erhöht werden, um Temperaturdifferenzen im Canopy schnell auszugleichen. Die nötige rF% berechnet der Controller automatisch und hält diese synchron zur VPD-Regelung. Dadurch steigt die Blatttemperatur gleichmäßiger, der VPD bleibt innerhalb von $\pm 0,1$ kPa und Stress wird minimiert.

- T_{air} steigt plötzlich schnell an $\rightarrow T_{leaf}$ und VPD springen
- Vorheizen, um Taupunkt zu vermeiden
- Umluft stärker, um ΔT auszugleichen
- Sonnenaufgang simulieren, mildert VPD-Sprünge ab

Licht aus:

Mit dem Abschalten des Lichts fällt die Raumtemperatur schnell ab und die Luftfeuchtigkeit nimmt zu. Ohne Gegenmaßnahmen können innerhalb weniger Minuten Feuchtigkeitszonen entstehen, die Risiko für Schimmel bieten. Hier kann eine „vorausschauende Entfeuchtung“ Abhilfe schaffen.

Die Temperatureinstellungen dafür müssen am Controller vorgenommen und ggf. angepasst werden. So kann die Unterschreitung des Taupunktes verhindert und das Risiko für Schimmel vermieden werden. Ein leichtes Nachheizen in die Dunkelphase hinein stabilisiert das ΔT zwischen Luft und Blatt. Der sanfte Übergang sorgt dafür, dass die VPD-Differenz nicht mehr als $\pm 0,15$ kPa beträgt.

- rF% Peak absehbar \rightarrow Max.% begrenzen
- Entfeuchter früher schalten
- T_{air} sinkt schnell stark ab \rightarrow Nachheizen, um Kondensation zu verhindern
- Sonnenuntergang simulieren, mildert VPD-Sprünge ab

Mikroklimata managen:

In größeren Räumen ohne ausreichende Umluft entstehen Mikroklimata. In diesen Zonen weichen Temperatur und Luftfeuchtigkeit von den gemessenen Werten ab. Sie bleiben für den Controller unerkannt. Ein stabiler Wert auf dem Display bedeutet nicht automatisch, dass alle Pflanzen im Raum das selbe Klima erleben.

Dies geschieht vor allem in dicht bewachsenen Blätterdächern, in Raumecken oder an Wänden. Auch eine asymmetrische Luftführung oder unterschiedliche Lampentypen können lokale Abweichungen begünstigen.

Mikroklimata entstehen fast immer durch unzureichende Luftführung im Grow-Raum. Die wichtigste Maßnahme dagegen ist eine aktive Luftzirkulation. Reiner Seitenwind stabilisiert nur die Blätter im äußeren Bereich. Die inneren Zonen bleiben dabei unbewegt.

Umluftventilatoren, Luftverteilungsschläuche oder ähnliche Systeme sorgen für stetige Umwälzung der Raumluft. Ziel ist ein laminarer Luftstrom durch das Blätterdach (horizontal und/oder vertikal). Eine Windgeschwindigkeit von $<1\text{m/s}$ ist hierfür völlig ausreichend.

Die sanfte, gleichmäßige Luftbewegung reduziert das Temperaturgefälle zwischen Luft und Blatt. So nähert sich der VPD_{leaf} über das gesamte Blätterdach einem verlässlichen Wert an. Hohe Windgeschwindigkeiten sind in der Regel nicht nötig und können zu übermäßigen Verdunstung beitragen. Dies beeinträchtigt den Turgor und kann zu lokalem Austrocknen führen.



Unzureichende Luftbewegung führt zu lokalem Wärme- oder Feuchtigkeitsstau. Die Folgen sind Mikroklimata und heterogene Zonen im Raum. Sensorwerte sind nicht repräsentativ und der Bestand gefährdet.



Aktive und gezielte Luftzirkulation schafft einen sanften, gleichmäßigen Luftstrom durch das Blätterdach und den Raum. Temperatur, Feuchtigkeit und CO₂ werden so konstant gehalten und optimales Wachstum garantiert.

Multi-Sensor-Strategie:

Ein einzelner Sensor repräsentiert nie den gesamten Raum. Genügend Umluft kann diese lokale Messung zwar verbessern, Mikroklimata können trotzdem unentdeckt bleiben. Die GrowBase Pro erlaubt den Anschluss mehrerer Sensoren.

Über die Multi-Sensor-Logik können Mittel-, Minimum-, oder Maximumwerte für die Regelung gewählt werden. Räume mit ungleichmäßiger Lichtverteilung, unterschiedlichen Leuchtmitteln oder mangelnder Umluft profitieren stark von einer strategischen Sensorplatzierung.

- **Minimum rF%:** Für konservative Steuerung —> Orientierung am trockensten Punkt (Worst-Case)
- **Mittelwert:** Für ein ausgewogenes Gesamtbild —> repräsentiert das Hauptvolumen
- **Maximum rF%:** Zur Erkennung feuchter Zonen —> Prävention gegen Schimmel

Mikroklimata können nicht nur über abweichende rF-Werte, sondern auch besonders gut über ΔT -Anomalien erkannt werden. Eine Zone mit $+ 2\text{-}3^\circ\text{C}$ T_{leaf} bei gleichem T_{air} deutet meistens auf unzureichende Luftbewegung oder erhöhte Strahlungslast hin.

Der VPD_{leaf} ist in diesen Bereichen deutlich höher als der gemessene Raumwert, selbst wenn die relative Luftfeuchtigkeit korrekt stabil erscheint. Das Monitoring von ΔT (Blatt/Luft) dient somit auch als zuverlässiger Indikator zur Identifikation lokaler Probleme in dichten Blätterdächern.

Der Einsatz mehrerer Sensoren an der GrowBase Pro erlaubt es, das Klima in mehreren Zonen zu überwachen. Auf diese Weise werden lokale Abweichungen sofort erkannt und nicht-gemittelte Extremwerte vermieden. So ist eine zielgerichtete VPD-Regelung möglich.

Darüberhinaus kann so auf Werte aus dem Blätterdach stärker reagiert werden, als auf die der Randzonen. Bei Ausfall eines Sensors kann die GrowBase Pro auf den verbleibenden Sensor zurückgreifen und so die Betriebssicherheit erhöhen.

Taupunkt - ΔT (Tag/Nacht)



Kurz:

Dieses Kapitel zeigt das Zusammenspiel aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit und wie daraus Tau entsteht. Es liefert Strategien und Gegenmaßnahmen, um Kondensation effektiv vorzubeugen. Durch korrektes Taupunkt-Management können größere Temperaturunterschiede realisiert werden.

Der Taupunkt (engl.: dewpoint) beschreibt die Temperatur, bei der die Luft den maximalen Gehalt an Wasserdampf erreicht und Kondensation einsetzt. Sinkt die Temperatur einer Oberfläche (z.B. Blatt oder Blüte) auf oder unter diesen Wert, bilden sich darauf Wassertropfen. Der Taupunkt ergibt sich aus Lufttemperatur (T_{air}) und der relativen Luftfeuchtigkeit (rF%) ebenfalls nach der Magnus-Formel.

$$T_{dew} = b \times \alpha(T, rF) / a - \alpha(T, rF)$$

$$\text{mit } \alpha(T, rF) = [a \times T / (b + T)] + \ln(rF)$$

$$\text{Konstanten: } a = 17,27 \mid b = 237,3^{\circ}\text{C}$$

Beispielrechnung:

Angenommene Werte: $T_{air} = 26^{\circ}\text{C} \mid rF = 60\% (0,60) \mid \ln(0,6) = -0,511$

$$\alpha = [17,27 \times 26 / (237,3 + 26)] + \ln(0,6)$$

$$= (449,02 / 263,3) + \ln(0,6)$$

$$= 1,705 - 0,511$$

$$\approx 1,194$$

$$T_{dew} = (237,3 \times 1,194) / (17,27 - 1,194)$$

$$= 283,3362 / 16,076$$

$$\approx \underline{17,625^{\circ}\text{C}}$$

Der berechnete Taupunkt liegt bei ca. $17,6^{\circ}\text{C}$. Kühlt eine Oberfläche oder die Luft auf diese Temperatur ab, beginnt der Wasserdampf in der Luft zu kondensieren. Diese Berechnung verdeutlicht, dass ein Temperaturabfall um $5-6^{\circ}\text{C}$ bei unveränderter Feuchte schnell in einen kritischen Bereich führt.

Zusammenhang von Temperatur, rF% und ΔT (Tag/Nacht):

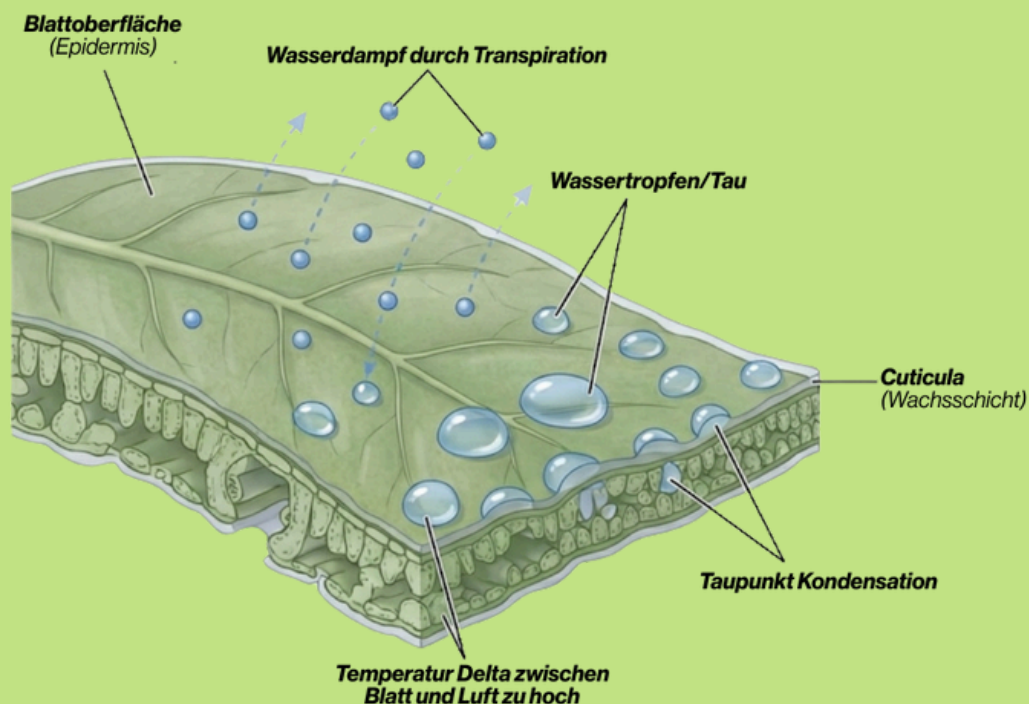
In der Nachtphase sinkt die Temperatur der Luft. Die absolute Feuchtigkeit bleibt jedoch weitgehend gleich. Dadurch steigt die relative Feuchtigkeit an, bis der Taupunkt erreicht wird.

Eine Temperaturabsenkung von 26°C auf 20°C erhöht im Beispiel die relative Luftfeuchtigkeit bei gleichbleibendem Wassergehalt auf etwa 86% (warme Luft hält mehr Wasserdampf als kalte).

Der Abstand der Lufttemperatur zum berechneten Taupunkt (17,6°C) beträgt nur noch 2,4°C. Die „Temperatur-Reserve“, bevor die Sättigung der Luft mit Wasserdampf erreicht wird, nimmt stark ab. Schon bei 19°C (1,4°C Differenz zum Taupunkt) beginnt die Kondensation, da die Luft praktisch gesättigt ist.

Je größer das ΔT zwischen Tag und Nacht ist, desto stärker fällt dieser Effekt aus. Ob Tau zuerst an den Blättern oder anderen Oberflächen entsteht, bestimmt das ΔT zwischen Luft- und Oberflächentemperatur (z.B. Blätter, Blütenstände, Stangen, Wände).

Dichtes Blattwerk und metallische Flächen sind von dem Temperaturgradient besonders betroffen. Wenn in der Dunkelphase die Blätter zu stark abkühlen, wird dort der Taupunkt zuerst unterschritten und es bildet sich Kondensat am Blatt, selbst wenn die Raumwerte noch unkritisch erscheinen.

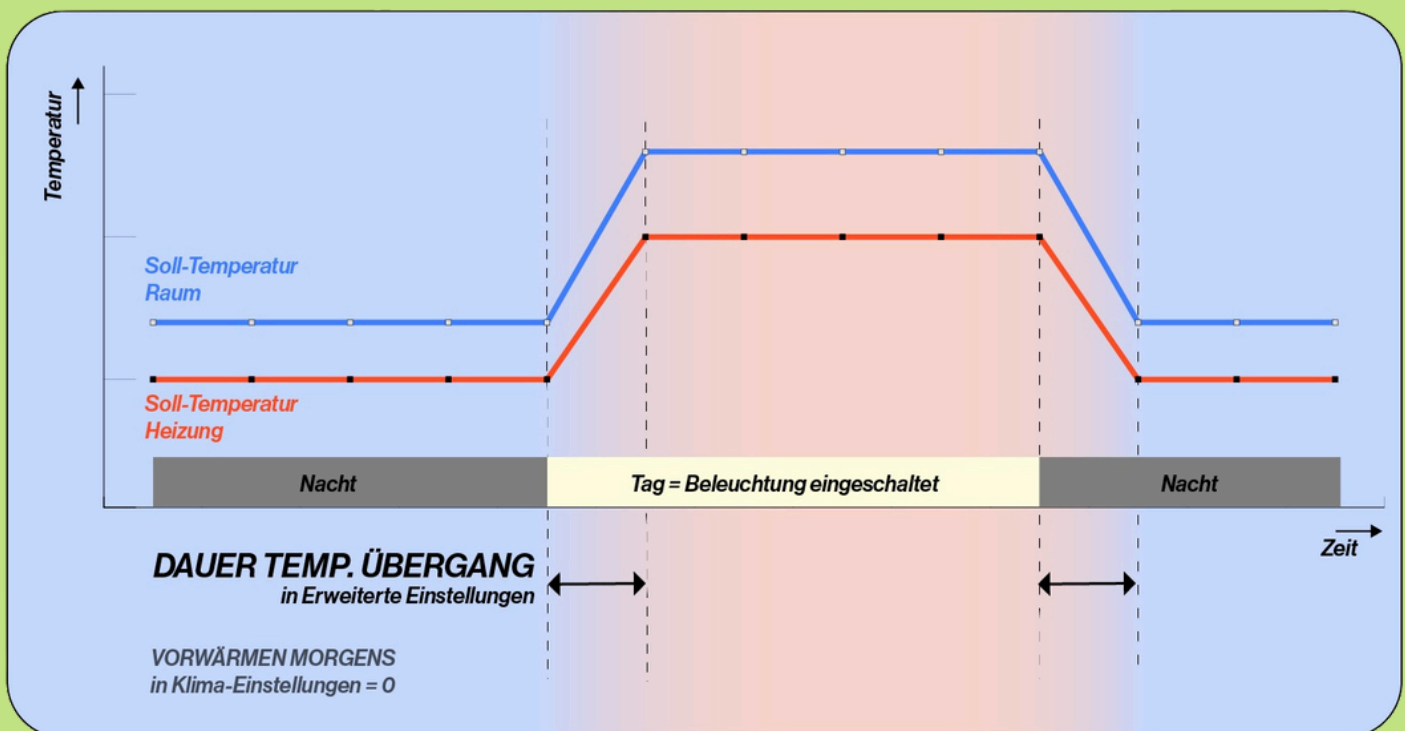


Maßnahmen zur Taupunkt-Vermeidung:

Eine korrekte und stabile Klimaführung berücksichtigt den Abstand von Lufttemperatur zum Taupunkt. Praxisnahe Strategien hierfür sind:

- **Entfeuchten über Heizung:** Relative Feuchtigkeit sinkt, ohne dass T_{air} zu stark sinkt
- **Preheat:** Vor Licht an kurzes Vorheizen, um den Taupunktabstand zu vergrößern
- **Sunrise/Sunset:** Sanfte Übergänge bei Lichtwechsel durch Sonnenauf- und Untergang
- **Umluft aktiv halten:** Zur gleichmäßigen Durchströmung des Blätterdaches, auch in der Nacht
- **Sensorplatzierung:** Auf Höhe/innerhalb des Canopy, fern von Wänden/feuchten Flächen
- **ΔT -Monitoring:** Erfassung von T_{air} und T_{leaf} , Abweichungen $>3^{\circ}\text{C}$ umgehend prüfen

Ein effektives Management zur Vermeidung des Taupunktes basiert auf einer vorausschauenden Einstellung des Controllers. Die Änderung der Parameter ist physikalisch absehbar und kann daher direkt in die Regelung integriert werden. Mit diesem Hintergrundwissen können die Klimawerte der GrowBase Pro so eingestellt werden, dass der Taupunkt nicht erreicht wird und sich kein Kondenswasser auf Blüten oder Blättern bildet.



Strategien für ein größeres Tag-Nacht-Delta:

In der Blütephase kann ein bewusst höher geführtes Tag-Nacht-Delta genutzt werden, um generative Prozesse zu fördern. Das höhere Temperatur-Delta wirkt als zusätzliches Signal zur Reifung.

Daraus kann eine erhöhte Blütendichte resultieren und die Harzproduktion kann gefördert werden. Eine Voraussetzung hierfür ist aktives und präzises Management der Feuchtigkeit und des Taupunktes.

Beispiel für stärkere Nachtabkühlung (ΔT 6-7°C):

- **Tag:** 26-27°C, 55-60% rF $\rightarrow VPD_{\text{leaf}} \approx 1,4-1,6$ kPa
- **Nacht:** 19-21°C, 60-65% rF $\rightarrow VPD_{\text{leaf}} \approx 1,1-1,3$ kPa

Um solche Temperaturdifferenzen sicher umsetzen zu können, sind die genannten Maßnahmen zur Vermeidung des Taupunktes zu berücksichtigen. Insbesondere Funktionen wie „Preheat“ und Entfeuchten über Heizung helfen, den Abstand zum Taupunkt über 2°C zu halten und Kondensation zu vermeiden. Ein Taupunktabstand von 2°C gilt als Mindestanforderung. Eine Differenz Unter 1°C führt sehr wahrscheinlich zur Kondensation.

Praxiswerte und Sicherheitsabstände:

Parameter	Optimal	Kritisch ab
ΔT (Tag/Nacht)	2-4°C	> 5°C
Nacht rF%	60-65%	> 70%
Abstand Luft - Taupunkt	>2°C	< 1°C
ΔT (Blatt/Luft)	1-2°C	> 3°C

Durch die Kombination aus kontrolliertem „Temperatur-Ramping“ (Preheat) und präziser Feuchterege lung lässt sich das Klima auch bei größeren Tag/Nacht-Unterschieden stabil und kondensationsfrei regeln. Es wird eine fein abgestimmte, reproduzierbare Umgebung geschaffen, die die Transpiration und den Gasaustausch der Pflanze aufrecht erhält und dabei gleichzeitig mikrobiologische Risiken minimiert.

VPD im Kontext zu Licht, CO₂, Nährstoffen & Bewässerung



Kurz:

Der VPD fungiert gleichzeitig als zentrale Stellgröße und als zuverlässiges Diagnosesignal des Systems. Der Wert zeigt, ob die Regelemente harmonisch und konstant arbeiten. Das Zusammenwirken der Umweltreize ermöglicht die aktive Steuerung einer Kultur.

Um die maximale Leistung der Pflanze zu erreichen, muss der VPD-Wert auch im Zusammenspiel zu Beleuchtung, Bewässerung und Düngestrategie betrachtet werden. Gemeinsam wirken diese Parameter auf den Wasserfluss, die Photosyntheseleistung und den Energiehaushalt der Pflanze ein und beeinflussen so die Menge und Qualität der Ernte.

In diesem Zusammenhang übernimmt der VPD eine Funktion als Indikator. Er gibt einen Eindruck, ob das gesamte System im physiologischen Gleichgewicht der Kultur läuft. Jede Veränderung in einem dieser Bereiche kann die biologische Balance verschieben.

Licht:

Die Lichtintensität treibt die Photosynthese an, erzeugt aber auch Wärme in der Blattstruktur. Je höher die PPFD (Photosynthetische Photonenflussdichte), desto stärker steigt die Temperatur im Gewebe und damit auch der VPD_{leaf} . Dieser Effekt ist nicht linear, sondern hängt von Spektrum, Lampentyp, Strahlungsdichte (PPFD) und Abstand der Leuchte ab. Unter LED-Systemen mit hohem Photonenfluss kann die Blatttemperatur teilweise 1-2°C über der Raumluft liegen (hohe Strahlung bei geringer Transpiration). Im Durchschnitt liegt die Blatttemperatur jedoch 1-2°C unter der Raumluft (bei ausreichender Belüftung und starker Transpiration).

Ein zu niedriger VPD-Wert bei zu hoher Lichtintensität führt dazu, dass die Blätter nicht genug Wasser verdunsten und die Photosynthese stagniert. Die Transpiration wird durch den niedrigen VPD physikalisch limitiert, obwohl die Stomata geöffnet sind. Unter der hohen Strahlung steigt die Blatttemperatur schneller an. Der kühlende Effekt durch die Verdunstung bleibt jedoch aus. Dadurch erhöht sich lokal der VPD_{leaf} bei gleichem oder niedrigerem VPD_{air} . Die Effizienz der Photosynthese nimmt ab, auch wenn genügend Licht und CO₂ verfügbar sind.

Bei zu hohem VPD schließen die Stomata, um übermäßigen Wasserverlust durch die hohe Transpirationsrate zu vermeiden. Dadurch wird weniger CO₂ aufgenommen und die hohe Lichtleistung kann weniger effizient verwertet werden. Dies hemmt die Photosynthese und führt ebenfalls zu Stagnation im Wachstum. Gleichzeitig steigt der Wasserverbrauch und es zeigen sich Stresssymptome.

CO₂-Supplementierung:

Durch die Anreicherung des Grow-Raums mit CO₂ kann die maximale Photosyntheseleistung gesteigert werden, allerdings nur, wenn die Stomata geöffnet sind und der Wassertransport optimal funktioniert.

In CO₂-angereicherten Räumen kann der VPD-Zielwert moderat höher eingestellt werden (z.B. +0,1-0,2 kPa), da die Pflanze mit einer höheren Blatttemperatur effizienter arbeitet und die Stomata geöffnet bleiben. CO₂-Düngung verschiebt also auch die Wärmetoleranz der Pflanze leicht nach oben, sodass unter Idealbedingungen Temperaturen über 30°C gefahren werden können.

Dies ist jedoch auch von der gewählten Kultur und Genetik abhängig. Auch das jeweilige Wachstumsstadium ist hierbei zu berücksichtigen, da sich zu hohe Temperaturen negativ auf die Qualität auswirken können.

Eine ausreichend geregelte Umluft ist bei der Supplementierung mit CO₂ wichtig, da das Gas eine höhere Dichte als Luft besitzt. Die Luftbewegung sorgt für eine Durchmischung des CO₂ mit der Raumluft. So kann gewährleistet werden, dass der gewünschte CO₂-Gehalt innerhalb des Blätterdaches gehalten wird. Die Wirkung der Supplementierung hängt stark von der Luftverteilung ab.

Eine homogen durchmischte Raumluft stellt sicher, dass alle Zonen der Pflanze die gleiche CO₂-Konzentration erhalten. Andernfalls kann es zu erhöhten Gaskonzentration in der unteren Ebene des Raums kommen, während diese jedoch im oberen Bereich benötigt wird, da hier die Lichtintensität am stärksten ist.

In Kombination mit einem stabilen VPD kann die Pflanze das zusätzliche CO₂ effizient verwerten, da der Gasaustausch ungehindert abläuft. Geöffnete Stomata sind hierfür entscheidend. Verschließen sich diese (z.B. durch zu hohen VPD), bleibt das CO₂ im Raum ungenutzt.



Wichtig:

CO₂-Zufuhr stoppen, sobald die Beleuchtung ausgeschaltet wird, da Pflanzen in der Dunkelphase kein CO₂ assimilieren. Ein zu hoher CO₂-Gehalt in inaktiven Phasen kann den Sauerstoffaustausch hemmen und das Wurzelmilieu belasten.

Nährstoffe & Bewässerung:

Durch den VPD wird die Transpirationsrate bestimmt und damit, wie schnell Wasser durch das Xylem fließt. Der Wasserfluss innerhalb der Pflanze kann nur konstant bleiben, wenn VPD, Wurzeltemperatur und Substratfeuchte (VWC) im Gleichgewicht stehen. Mit dem Wasserstrom bewegen sich die gelösten Nährstoffe als Kationen (+) und Anionen (-).

Ein zu niedriger VPD-Wert bremst diesen Wasserfluss. Es kann zu Mangelercheinungen kommen (häufig Kalzium/Magnesium), obwohl genügend Nährstoffe in der Nährlösung oder im Substrat vorhanden sind.

Liegt der VPD oberhalb des Optimums erhöht sich der Ionentransport innerhalb der Pflanze und es kommt zur Akkumulation von Salzen in den Zellen. Im Blattgewebe führt dies zu einer Überkonzentration an Nährstoffen, was sich typischerweise als „Verbrennung“ der Blattspitzen zeigt (Nutrient-Burn).

Nährstoff- und Klimamanagement gehen Hand in Hand und werden in den meisten Fällen aufeinander angepasst. Als Faustformel für den EC-, im Bezug auf den VPD-Wert gilt:

- Hoher VPD → EC senken (Nährlösung verdünnen, Bewässerungsintervall erhöhen)
- Niedriger VPD → EC erhöhen (konzentriertere Nährlösung, Bewässerungsintervall verringern)

Beispiel: +-0,1 mS/cm je 0,2 kPa Drift (abhängig von Substrattyp, Dünger- & Bewässerungsstrategie)

Spontane Drifts im VPD-Verlauf können auch ein Indikator für Fehler in der Bewässerung sein. Bei einem stabilen VPD-Trend verläuft die Transpiration synchron zur Irrigation. Abweichungen nach oben (Trendspitzen) können bedeuten, dass das Substrat zu trocken oder die Wurzelaktivität gehemmt war.

Drifts nach unten können auf Überwässerung oder geringe Wurzelatmung hinweisen. Im professionellen Betrieb wird der VPD (oder auch die Blatttemperatur) als indirekter „Sensor“ für die Bewässerungsqualität genutzt. Hier signalisiert eine stabile Trendlinie, dass Transpiration, Wurzelatmung und Substrat-VWC harmonisieren (VWC = volumetric water content, volumetrischer Wassergehalt im Substrat).

Zusammenhänge im gesamten System:

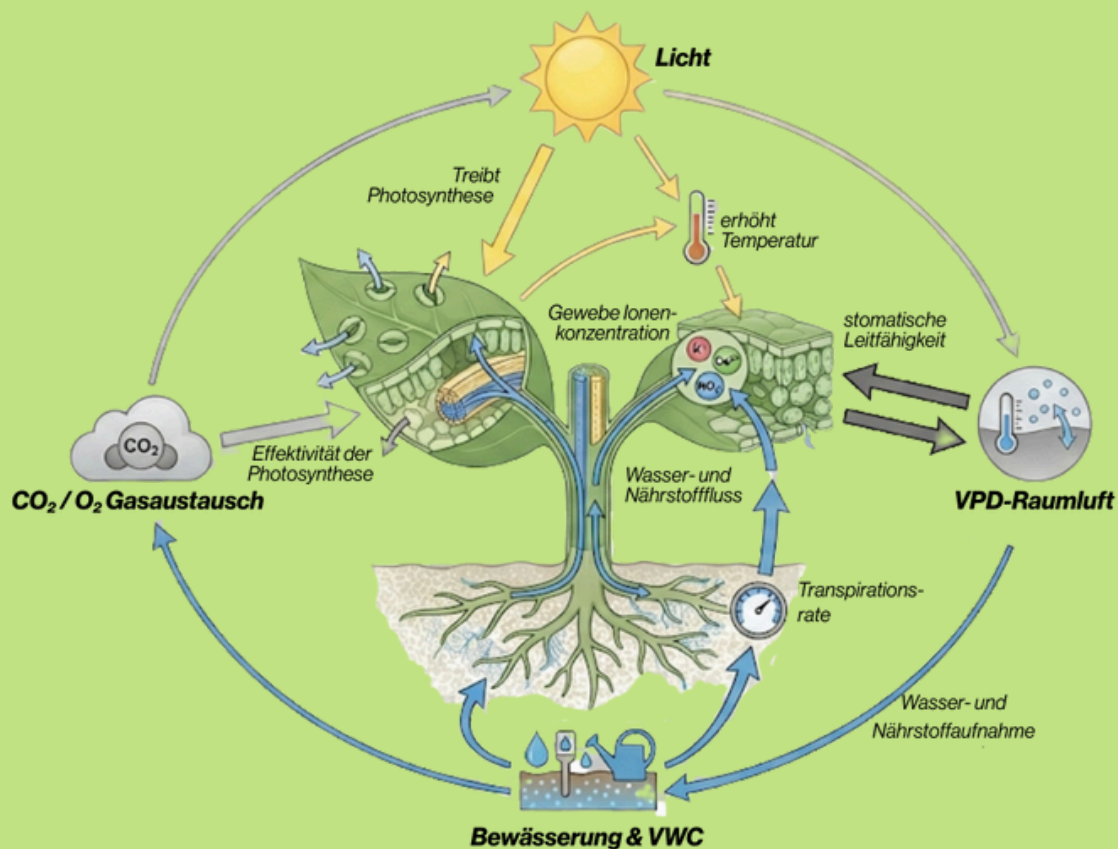
Licht, CO_2 , VPD, Bewässerung und Düngestrategie bilden ein geschlossenes Regelnetz um die Biologie der Pflanze. Das Licht treibt die Photosynthese an, erhöht aber die Blatttemperatur, was wiederum den VPD_{leaf} verändert.

Der VPD steuert die Transpiration der Pflanze und beeinflusst ihren Wasser- und Nährstofffluss, was die Ionenkonzentration im Gewebe bestimmt. Durch CO_2 ist die Effizienz der Photosynthese definiert, der Gasaustausch ist jedoch von der Aktivität der Stomata abhängig.

Ob die Stomata geöffnet oder geschlossen sind, wird klimatisch durch den VPD bestimmt. Weitere Faktoren für die stomatische Leitfähigkeit sind unter anderem der Zustand der Wurzeln oder die hormonelle Aktivität der Pflanze.

Die Bewässerung und der VWC im Substrat bestimmen dazu den realen Transpirationsdruck der Pflanze. Über die Wasseraufnahme wird zudem der Energiehaushalt beeinflusst, der die Synthese von Glukose mitbestimmt und sich indirekt auf den Transpirationsdruck auswirkt.

In größeren Anlagen wird daher das gesamte Regelnetz über Trendanalysen ausgewertet und gesteuert. So werden alle Korrelationen zwischen Licht, Klima und Bewässerung berücksichtigt und Fehler können jederzeit zurückverfolgt werden.



Troubleshooting - Symptome, Ursachen, Maßnahmen



Kurz:

Fehler in der Klimaführung zeigen sich im Trendverlauf und direkt an der Pflanze. Die frühzeitige Interpretation der Symptome hilft, die Ursache einzugrenzen und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Ein effektives Troubleshooting setzt die korrekte Interpretation der Daten und Trends voraus. Schäden sollen vermieden werden, bevor sie entstehen. Hierfür müssen kurzfristige Schwankungen und systemische Abweichungen erkannt und unterschieden werden.

Einzelne Spitzen sind meist unkritisch, wiederkehrende Drifts deuten allerdings auf strukturelle Fehler in der Sensorik, der Regelung oder den Geräten hin.

Viele Probleme im Klimasystem zeigen sich zunächst in subtilen Veränderungen des VPD-Verlaufs oder in unstetigen Werten. Dies geschieht, bevor sich Symptome an den Blättern zeigen, da die Pflanze auf die Reize und Signale ihrer Umgebung reagiert.

VPD-Regelung, Sensorik und Klimaführung sind komplex gekoppelt. Fehler im gesamten System zeigen sich meistens nicht sofort an den Daten. Die ersten Anzeichen sind physiologische Reaktionen an der Pflanze. Ziel dieses Kapitels ist nicht, jeden Einzelfall zu katalogisieren, sondern die systemischen Ursachen zu erkennen, die durch klimatische Probleme entstehen können.

Eine methodische Analyse folgt dem Prinzip „vom Symptom zur Ursache“. Zuerst wird geprüft, ob der Messwert plausibel ist, danach die Regelkette aus Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Umluft. Häufig liegen die Fehlerquellen in der falschen Synchronisierung der Geräte.

Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl der häufigsten Symptome, ihre wahrscheinlichsten Ursachen und Maßnahmen zur sofortigen Anpassung.

Symptom/Befund	Mögliche Ursache	Lösung
Instabile oder schwankende Werte	<ul style="list-style-type: none"> • Zu enge Hysterese • Ausfall der Umluft • Sensor zu nah an Wärme- oder Feuchtequelle • Kondensation 	<ul style="list-style-type: none"> • +/- 0,08-0,1 kPa • Luftführung prüfen • Sensorplatzierung prüfen • Taupunkt beachten
VPD zu niedrig, träge Pflanze, weiche Blätter	<ul style="list-style-type: none"> • rF% zu hoch • Entfeuchtung zu schwach • Überwässerung • Stehende Luft • Lichtleistung zu gering 	<ul style="list-style-type: none"> • rF% Sollwert senken • Entfeuchtung anheben • Rücktrocknung des Substrates (Dryback) • Umluft erhöhen • Leistung erhöhen oder Abstand verringern
VPD zu hoch, Trockenstress, Blattspitzen verbrannt	<ul style="list-style-type: none"> • rF% zu niedrig • Blatttemperatur zu hoch • Zu starke Lichtleistung • Luftstrom zu stark (>1m/s) • EC zu hoch für VPD 	<ul style="list-style-type: none"> • rF% Sollwert erhöhen oder VPD-Setpoint senken • Blatttemperatur prüfen • Lichtleistung anpassen • Umluft unter 1m/s halten • EC der Nährlösung senken
rF%-Peak (nachts), Kondenswasser (morgens)	<ul style="list-style-type: none"> • Starker Temperaturabfall • Entfeuchtung zu spät aktiv • Umluft Intervall aus • Fehlendes Vorheizen • Unterschreitung des Taupunktes 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachheizen nach Licht aus • Entfeuchter/Abluft früher schalten • Umluft nachts auf z.B. 60% der Tagesleistung • Vorheizen vor Licht an • ΔT (Blatt/Raum) über 3°C halten
Unterschiedliche Klimazonen, ungleichmäßiges Wachstum	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroklimata durch dichtes Canopy • Wärmegradienten • Sensorplatzierung • Ungleichmäßige Luftverteilung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zu wenig Sensoren verteilt • Luftstrom korrigieren • Sensorplätze rotieren • rF% auf Drifts prüfen

Klima-Checklisten



Diese Liste dient der standardisierten Einrichtung, Kontrolle und Wartung einer VPD-geführten Klimaregelung im Indoor-Anbau. Ziel ist ein reproduzierbares und stabiles Klima, das die Transpiration, den Nährstofftransport und den Gasaustausch einer Kultur dauerhaft im biologisch-physiologischen Optimum hält.

Setup Grundprüfung (bei Start, Umbau oder Neuinstallation)

- ☐ Sensoren korrekt platziert
- ☐ Quellen für Messfehler beseitigt
- ☐ Umluft vorhanden/aktiv
- ☐ Keine „toten Zonen“
- ☐ VPD-Regelung aktiv (Einheit korrekt eingestellt)
- ☐ Zielbereiche nach Stadium definiert
- ☐ Werte eingestellt
- ☐ Preheat vorhanden/aktiv
- ☐ Temperatur-Ramping vorhanden/aktiv
- ☐ CO₂-Regelung vorhanden/aktiv
- ☐ Referenzmessung erfolgt/plausibel

Täglicher Check - Wachstumsphase

- ☐ VPD im Zielbereich (0,8-1,2 kPa)
- ☐ VPD-Trend stabil (+- 0,1 kPa)
- ☐ rF% Schwankung prüfen (+- 1-3%)
- ☐ Blatttemperatur überprüft/plausibel
- ☐ Lichtleistung passt zu VPD
- ☐ Sichtprüfung Blattspannung (Turgordruck)

Täglicher Check - Blütephase

- ☐ **VPD im Zielbereich (1,1-1,8 kPa)**
- ☐ **Nacht rF% prüfen (<65%)**
- ☐ **VPD-Trend stabil**
- ☐ **Keine Kondensation an Blütenständen**
- ☐ **Blatttemperatur überprüft/plausibel**
- ☐ **Symptome für Trockenstress prüfen**

Tag/Nacht-Übergänge

- ☐ **Entfeuchtung vor Licht aus aktiv**
- ☐ **Temperatur sinkt kontrolliert ab**
- ☐ **Keine rF% Sättigung**
- ☐ **Preheat aktiv**
- ☐ **Abstand zum Taupunkt > 2°C**

Wöchentlicher Check

- ☐ **VPD-Trend über mehrere Tage stabil**
- ☐ **Wiederholende Verlaufsspitzen oder -drifts erkannt**
- ☐ **Sensorposition prüfen (nicht überwachsen)**
- ☐ **Keine „toten Zonen“**
- ☐ **IR-Messung validiert (Stichprobe)**
- ☐ **EC:VPD eingestellt**
- ☐ **Prüfung auf systemische Symptome (Mängel, Infekte, etc.)**
- ☐ **Luftverteilung geprüft**