

Ringe verraten das Wachstum

VERMESSUNG VON OBERFLÄCHEN-
STRUKTUREN DER BURGUNDERTRÜFFELN
(*TUBER AESTIVUM*)

*Die Oberfläche der Burgundertrüffel (*Tuber aestivum*) besteht aus vielen kleinen Warzen mit konzentrischen Ringstrukturen, die an Zuwachsringe von Bäumen erinnern. Das Ziel der Arbeit war die Entwicklung und Anwendung einer Messtechnik für diese Strukturen in Anlehnung an Methoden aus der Dendrochronologie. Die Resultate weisen darauf hin, dass es sich bei den Strukturen um synchrone, durch abiotische Faktoren gesteuerte Zuwachsmuster handelt.*

DIE JUNGFORSCHERIN



Flurina Rigling (1996)

Freies Gymnasium Zürich
CH-8008 Zürich

Eingang der Arbeit:
5.6.2017

Arbeit angenommen:
27.9.2017



Ringe verraten das Wachstum

VERMESSUNG VON OBERFLÄCHENSTRUKTUREN
DER BURGUNDERTRÜFFELN (*TUBER AESTIVUM*)

1. Einleitung

Die Trüffel wächst in einem komplexen System bestehend aus der Wirtspflanze (Baum), dem Boden und dem herrschenden Klima. Das Trüffelwachstum ist somit von unterschiedlichen Faktoren abhängig, etwa von der Feuchtigkeit und den Nährstoffen im Boden sowie der Art der Wirtspflanze und den Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen. Doch wie diese wachstumssteuernden Faktoren genau zusammenspielen, ist nach wie vor unklar. Unter anderem deshalb, weil für deren Untersuchung die im Boden wachsende Trüffel ausgegraben werden muss, und die Beprobung somit zwangsläufig destruktiv ist. Bei den oberirdisch fruktifizierenden Pilzen (*Epigäen*) hingegen konnte gezeigt werden, dass hohe Temperaturen bei feuchten Bedingungen während der Wachstumsperiode das Wachstum stimulieren, während Trockenheit und Kälte hemmend wirken [4]. Neuste Untersuchungen aus Spa-

nien zur Burgundertrüffel (*Tuber aestivum*) zeigen, dass beide Faktoren in einem bestimmten Verhältnis zu einander stehen müssen. Weder extreme Trockenphasen noch langandauernde Regenperioden sind förderlich für das Pilzwachstum [5, 7]. Der hemmende Einfluss der Trockenheit auf das Trüffelwachstum wird durch die langjährige Erntestatistik der Trüffelproduktion in Spanien belegt. Die Burgundertrüffelernte ist in den letzten Jahren stark rückläufig, was mit der außerordentlichen Trockenheit der vergangenen Jahre erklärt werden kann, die sowohl den Wirtsbaum, als auch das Wachstum der Trüffeln negativ zu beeinflussen scheint [2]. Über das Wachstum der Trüffeln im Jahresverlauf ist nach wie vor wenig bekannt. Burgundertrüffeln sind einjährig und haben ihre Haupternte- und vermutlich auch Wachstumszeit zwischen Juni und November [12]. Doch wie die Wachstumsdynamik innerhalb des Jahres tatsächlich ver-

läuft, wie schnell und auf welche Weise, ob kontinuierlich oder schubweise, die Fruchtkörper wachsen, ist bis heute nicht bekannt (Büntgen, persönliche Mitteilung). Einzelne Trüffelarten, wie die Burgunder- oder Perigordtrüffel (*Tuber melanosporum*), zeigen auf ihren Warzen ringartige Strukturen [8], die an Jahrringe von verholzten Pflanzen erinnern [11]. Diese ringartigen Strukturen sind bis heute kaum erforscht. So stellt sich die Frage, ob es sich bei den Ringen der Trüffelwarzen, wie in [8] beschrieben, tatsächlich um synchrone Wachstumsstrukturen handelt, analog der Jahrringe von Bäumen, mit vergleichbarer Abfolge der relativen Ringbreiten sowohl auf verschiedenen Seiten der Trüffelwarzen als auch zwischen verschiedenen Trüffelwarzen. Oder handelt es sich dabei um nichtsynchrone, zufällig dimensionierte, unregelmäßige und von Warze zu Warze unterschiedliche Ringstrukturen? Es ist anzumerken, dass Callots Hypothese [8] der Wachstumsringe lediglich auf Beobachtungen basierte und nicht auf Messdaten. Die Entwicklung einer Methode zur Vermessung der ringartigen Strukturen auf der Oberfläche der Burgundertrüffelwarzen ist daher Gegenstand dieser Arbeit. Dabei soll versucht werden, die Methoden der Jahrringforschung erstmals auf die Vermessung der Trüffelringe anzuwenden. Folgende Forschungsfragen sollen beantwortet werden:

- Verlaufen die Ringstrukturen an verschiedenen Stellen auf einer Trüffelwarze synchron, mit einer vergleichbaren Abfolge der relativen Ringbreiten?
- Falls ja, verlaufen auch die Wachstumsringe verschiedener Seiten der gleichen Warze und verschiedener Warzen der gleichen Trüffel synchron?
- Ist es möglich anhand der Resultate Rückschlüsse auf den Rhythmus der Ringbildung zu ziehen?

Das Hauptziel der Arbeit liegt in der Entwicklung einer neuen Methode zur Vermessung der Strukturen, indem die weitentwickelte und gut funktionierende Methodik der Jahrringwissenschaften auf die Erforschung des Pilzwachstums angewendet wird [3]. Anhand der Resultate soll das Potenzial der Vermessung der ringartigen Wachstumsstrukturen für die Erforschung des Trüffelwachstums geprüft werden. Die Ergebnisse der Arbeit sind somit unmittelbar für die Grundlagenforschung interessant. Auf der Basis dieser Untersuchungen könnten mit weiterführenden Analysen das Trüffelwachstum und die beeinflussenden Faktoren entschlüsselt werden. Trüffelplantagenbesitzer könnten so zukünftig, mit wissenschaftlich abgestütztem Wissen über das Wachstum der Trüffel, gezielt den Ertrag optimieren und somit den Gewinn der Plantage steigern. Nicht zuletzt wäre es interessant, die Trüffel als weiteres Umweltarchiv zu etablieren.

2. Material und Methoden

2.1 Die Auswahl der Trüffel

Für die Untersuchungen wurden drei Trüffelwarzen (U1, U2 und CH3) vermessen, deren ringartige Strukturen über weite Teile der Warze unter dem Binokular gut sichtbar waren. Die Warzen U1 und U2 liegen auf einer Trüffel, die von einer Plantage aus Zentralungarn (Jászivány, Koordinaten: 47°32'N 20°15'E) stammt und in Formaldehyd konserviert wurde. Vor Messbeginn wurde die Trüffel gründlich gewaschen und mit einer feinen Bürste vorsichtig von Erdrückständen befreit. Zudem wurde eine zweite, frisch geerntete Trüffel aus der Schweiz (Schlieren, Koordinaten: 47°23'N 8°26'E) ausgewählt, von der eine weitere Warze (CH3) vermessen wurde (siehe [Abb. 1a](#)).

2.2 Die Präparation der Trüffelwarzen

Für die Vermessung am Computer werden hochauflösende Fotos der ringartigen Strukturen benötigt. Dazu ist es zentral, die Oberflächen der Warzen unter

dem Binokular möglichst parallel zum Objektiv des Binokulars auszurichten, sodass keine perspektivische Verzerrung entsteht. Um die Warze gut ausrichten zu können, wird die Trüffel mit Knet oder ungekochtem Reis fixiert. Reis hat den Vorteil, dass keine Rückstände an der Oberfläche haften bleiben und die Warzen unbeschädigt bleiben. Die Strukturen sind am besten sichtbar, wenn die Trüffel nach dem Waschen etwas getrocknet wird. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit der Strukturen wurden verschiedene Methoden getestet. So wurde eine Trüffelwarze mit Safranin rot eingefärbt. Dieser Farbstoff wird in der Dendrochronologie verwendet, um die Holzzellen bei Dünnschnittpräparaten unter dem Mikroskop besser sichtbar zu machen [10]. Bei einer anderen Warze wurde die Oberfläche mit Kreide behandelt. Im Vergleich zur unbehandelten Warzenoberfläche waren die Strukturen jedoch beide Male nicht besser sichtbar.

2.3 Die Bilderfassung und -bearbeitung

Anschließend an die Behandlung der Trüffeloberfläche werden die Fotos digital bearbeitet: Weder die Erhöhung des Farbkontrastes noch die Verringerung der Lichtintensität führten zu einer verbesserten Sichtbarkeit der Strukturen. Die deutlichste Verbesserung konnte mit dem Weißabgleich, der die Farbtemperatur des Lichtes neutralisiert, erzielt werden. Diese Bearbeitung wurde deshalb bei allen Trüffelaufnahmen angewendet.

Als dritter Schritt wurden drei verschiedene Binokulare und Kameras getestet. Es wurden Aufnahmen mit einem herkömmlichen Laborbinokular (Leica MZ12) mit eingebauter Spiegelreflexkamera (Canon EOS 650D) gemacht. Die Auflösung und die Schärfe waren gut, jedoch war der Tiefenschärfenbereich für die unebene dreidimensionale Warzenoberfläche zu klein.

Aufnahmen mit hoher Tiefenschärfe lieferte ein spezielles Kamera-Binoku-

lar (VHX-Digital-Microscope; Keyence International, USA), das Serien von Fotos mit unterschiedlichem Schärfefokus hintereinander schießt und sie danach mittels Computerprogramms übereinanderlegt. Diese Kamera empfiehlt sich für unebene, stark strukturierte Warzen, wie U1 und U2, die nicht mit einer Aufnahme optimal erfasst werden können. Für flachere Warzen, wie CH3, wo keine hohe Tiefenschärfe benötigt wird, empfiehlt sich ein einfaches Binokular (MZ95; Leica, Germany) mit einer eingebauten Mikroskop-Kamera (DFC 290; Leica, Germany).

Zusammenfassend empfiehlt sich also die Trüffel vor den bildgebenden Verfahren leicht zu befeuchten. Bei der Kamera-Auswahl muss auf das Relief der Trüffelwarze geachtet werden und je nach benötigter Tiefenschärfe die entsprechende Kamera ausgewählt werden. Bei der Bildbearbeitung ist ein nachträglicher Weißabgleich wichtig.

2.4 Das Messen der Wachstumsringe

Die drei Fotos der Trüffelwarzen wurden zur Vermessung in ein dendrochronologisches Jahrringmessprogramm (WinDendro) importiert. In den Bereichen, in denen die Ringstrukturen über einen möglichst langen Bereich gut sichtbar sind, werden Messpfade gezogen, entlang welcher das Programm mittels Autoerkennung die Ringe einzeln markiert (siehe [Abb. 1c](#)) und die Abstände zwischen den Markierungen vermisst. Diese automatisch gesetzten Markierungen müssen visuell kontrolliert und nötigenfalls angepasst werden. Die Messpfade wurden mit der Nummer der Seite und der Anzahl der Messpfade dieser Seite nummeriert. S1.1 beispielsweise bedeutet der erste Messpfad auf der Seite 1. In Anlehnung an [8] wurde die Annahme getroffen, dass die Ringe an der Spitze der Warzen die ältesten sind. Die Pfade wurden immer von der Spitze zur Basis der Warze geführt, sodass also die ältesten Ringe bei allen Messpfaden oben sind. Das Pro-

gramm beschriftet, entsprechend seiner Verwendung in der Jahrringforschung, jeden Ring mit einer Jahreszahl. Bei den Trüffeln wurden diese Jahreszahlen durch Buchstaben ersetzt, da es sich bei den Ringstrukturen nicht um Jahrringe handelt. In dieser Arbeit wird die älteste

Struktur deshalb mit dem Buchstaben „A“ gekennzeichnet und nachfolgende mit den weiteren Buchstaben des Alphabets. Nach dem Buchstaben „Z“ beginnt das Alphabet von Neuem, jedoch erweitert, mit einer doppelten Buchstabenkombination („AA“, „AB“, „AC“, ...).

Da man die Vermessung der Strukturen weiter verbessern wollte, wurden die Strukturen bei der dritten Warze zuerst auf einem Computer mit hochauflösendem Display (Retina) mit Hilfslinien markiert (siehe [Abb. 1b](#)) und dann wurde dieses Foto ins WinDendro zur Vermessung importiert. Auf die Hilfslinien wurden dann die Messlinien des WinDendro-Programms gelegt (siehe [Abb. 1c](#)). Diese Methode ist für Warzen mit engen Ringabständen und schlechter Sichtbarkeit zu empfehlen. Auf den Warzen U1 und U2 wurden die Messpfade auf verschiedene Seiten gelegt. Bei CH3 wurden die Messpfade nicht nach Seiten gruppiert, sondern in verschiedene Zonen unterteilt (siehe [Abb. 1c](#)), da bei dieser Warze die Seiten nicht klar erkennbar waren (L für links, R für rechts und Lu für links unten).

2.5 Das Kreuzdatieren der Messungen

Die Messdaten wurden in das TSAPWin (Frank Rinn; Germany), importiert, ein für die Kreuzdatierung und die Auswertung von Jahrringdaten entwickeltes Programm. Es stellt die Messdaten in Form von Kurven, sogenannten Serien, dar. Die Kreuzdatierung wurde in der Jahrringforschung entwickelt, um verschiedene Jahrringserien zu vergleichen und auf Fehler zu überprüfen [9, 11]. Bei den auftretenden Fehlern kann es sich einerseits um Messfehler handeln, andererseits ist es aber auch möglich, dass einzelne Jahrringe fehlen, also zum Beispiel aufgrund extremer Trockenheit nicht ausgebildet wurden [11]. Im Falle der Trüffeln gibt es Bereiche auf den Warzen, bei denen die Ringe deutlich sichtbar sind und solche, wo die Grenzen zwischen den Ringen sehr undeutlich sind – in diesen Bereichen können Messfehler entstehen, die es festzustellen gilt.

An einigen wenigen Messstellen mussten nach Begutachtung des Bildmaterials nächtliche Korrekturen ausgeführt werden: Bei der ersten ungarischen Warze (U1) wurde beim Messpfad S1.1 „P“ und „Q“ zu einem Ring zusammen-

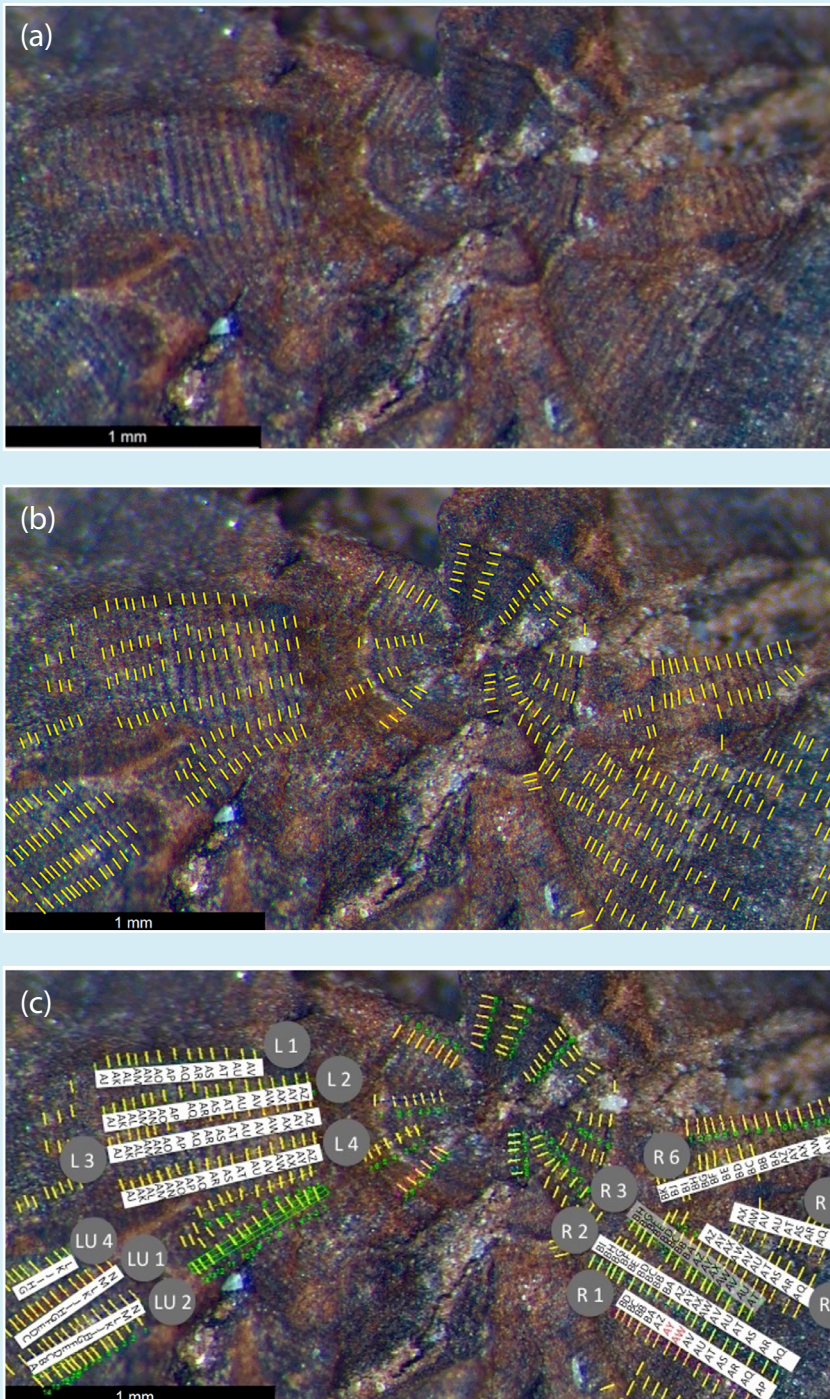


Abb. 1: Die verschiedenen Schritte zur Vermessung der Warze CH3. Die Originalaufnahme (a), die Hilfslinien auf dem Foto (b) und die Messpfade auf den Hilfslinien (c).



gefasst, da dort ein Ring zu viel markiert worden war. Bei S3.1 findet sich genau das gegenteilige Beispiel. Der Ring „I“ musste in zwei Ringe aufgeteilt werden (aus „I“ wurde „I“ und „J“), da dort ein Ring übersehen worden war. Diese Messfehler konnten aufgrund des Kreuzdatierens erkannt und korrigiert werden.

2.6 Statistische Auswertung der Datensätze

Nach der Kreuzdatierung, wurde überprüft, wie gut die einzelnen Messserien in der Abfolge ihrer relativen Ringbreiten übereinstimmen. Dazu wurden in Excel Korrelationsanalysen berechnet. Es wurden sinnvollerweise nur jene Serien korreliert, die aufgrund der vollzogenen Datierung einen gemeinsamen Bereich von mindestens fünf Ringen aufwiesen. Die Pearson-Korrelation untersucht, ob ein linearer Zusammenhang zwischen zwei Messreihen besteht. Der Korrelationskoeffizient wird dabei wie folgt berechnet:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Wobei

x_i = Wert der ersten Messreihe;

y_i = Wert der zweiten Messreihe;

\bar{x} = arithmetisches Mittel der ersten Zeitreihe;

\bar{y} = arithmetisches Mittel der zweiten Zeitreihe [11].

3. Resultate

3.1 Die Warze CH3

Da die Trüffelwarze CH3 nicht klar abgrenzbare Seiten aufwies, wurden verschiedene Zonen ausgeschieden (L, LU, R) (siehe Abb. 1c). L und R lagen etwa auf gleicher Höhe. LU lag unterhalb von L und war durch einen Bereich von L abgegrenzt, wo die Strukturen nicht sichtbar und somit auch nicht messbar waren. Betrachtet man die Kurvenverläufe innerhalb der einzelnen Zonen, so kann eine gute Übereinstimmung zwischen den einzelnen Messserien festgestellt werden (siehe Abb. 2). Die Kurven bei RE

zeigen äußerst synchrones, wenn auch nicht identisches Wachstum mit klaren gemeinsamen Minima bei AS-AT, AX, AZ, BC und BG. Die Kurven stimmen auch in den Maxima gut überein.

Die Kurven bei L zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf und stimmen in den Minima AN, AR und AX sowie auch in den Maxima bei AP, AU und AY gut überein. In den überlappenden Bereichen von L und R stimmen die Messreihen gut überein, was besonders gut an den Mittelkurven zu sehen ist. Bei AU und AY zeigen die Kurven einen breiten Ring und bei AX laufen beide in ein Minimum. Bei AS sieht es so aus, als ob die Mittelkurven um einen Ring verschoben sind. Auf den Bildern mit den Messpfaden ist jedoch kein Fehler sichtbar.

Auch in der Zone LU verlaufen die Kurven ähnlich. Bei E, G, J und M zeigen alle drei Messreihen Maxima und auch in den Minima stimmen die Messreihen überein. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass der Abstand zum Bereich L nicht exakt quantifizierbar ist, da die Ringstrukturen kaum sichtbar sind.

3.2 Die Warze U1

Bei dieser Warze ist der Verlauf der Kurven der verschiedenen Seiten nur über kurze Strecken ähnlich, so weisen die

Messreihen bei J, V und Y gemeinsame Maxima und bei AC ein Minimum auf (siehe Abb. 3). Bei R und AF zeigen die Kurven eine geringe Ähnlichkeit, die einzelnen Messreihen verlaufen sogar teilweise komplementär. Im Bereich des Ringes O scheint es, als wäre die Messreihe von S2.1 um ein Jahr verschoben. Schaut man die Messungen auf dem Foto an, ist jedoch keine Fehlerquelle zu erkennen. Insgesamt stimmen die Messreihen im Bereich O bis AC am besten überein, da diese Ringe in der Mitte der Warze liegen und gut sichtbar sind. Ganz oben und ganz unten an der Warze ist die Sichtbarkeit meist schlechter, und somit sind die Messungen unzuverlässiger. Das Wachstum der Messreihen S1.1 und S1.2, welche auf der gleichen Seite liegen, ist ähnlich. Bei S, V und Y haben beide Graphen ihre Maxima und auch die Minima N und AC sind bei beiden vorhanden. Beim Minimum im Bereich Q und R sind die Messreihen um einen Ring verschoben, so auch bei W und X. Das Prüfen der Fotos ergab keine Korrekturmöglichkeit.

Die Resultate von U1 decken sich mit denen von U2.

3.3 Die Warzen U1 und U2 im Vergleich

Der Vergleich des Wachstums der zwei Warzen U1 und U2 derselben Trüffel,

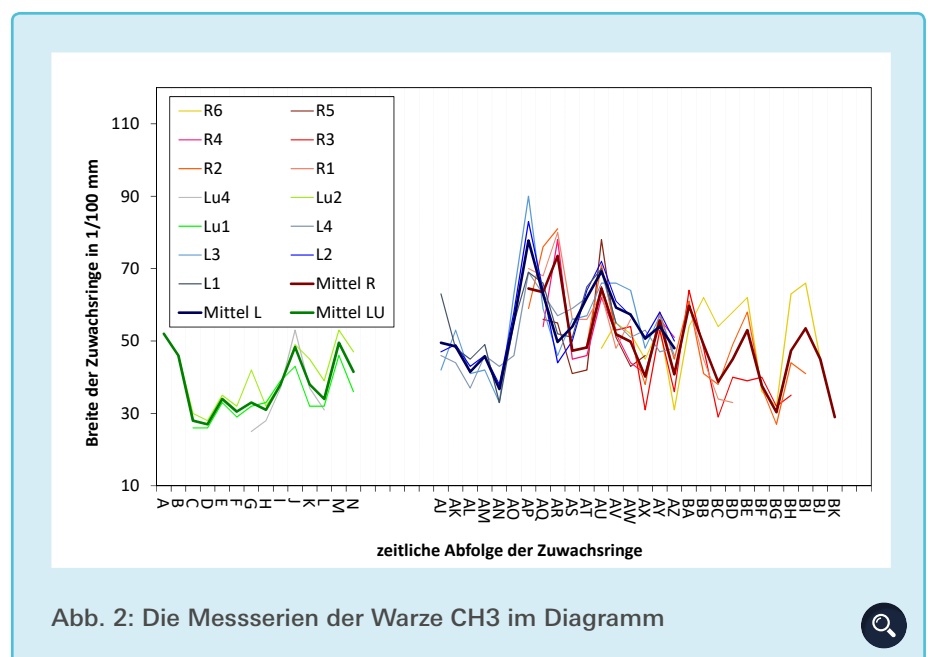


Abb. 2: Die Messreihen der Warze CH3 im Diagramm

anhand ihrer Mittelkurven, zeigt weitgehend eine große Ähnlichkeit (siehe [Abb. 4](#)). Bei D, H, J, P und V finden sich bei beiden Mittelkurven übereinstimmende, speziell breite Ringe, bei den Maxima um R und AF scheinen die Kurven aber um einen Ring verschoben. Im Bereich zwischen W und AA stimmen die Kurven nicht gut überein, da dieser Bereich auf der ersten Warze (U1) schlecht sichtbar ist und somit Fehlmessungen wahrscheinlich sind.

3.4 Korrelation der Messdaten

Die Korrelation der einzelnen Messserien der Warzen CH3, U1 und U2 hat sehr unterschiedliche Werte ergeben (siehe [Tab. 1](#)). Der höchste Korrelationskoeffizient beträgt 0,93, der tiefste 0,01 und einige weisen sogar negative Werte auf. Alle Werte, welche über 0,50 liegen, sind in der Abbildung blau eingefärbt. Die Korrelation der Messserien innerhalb der gleichen Zone bei CH3 oder innerhalb der gleichen Seite bei U1 und

U2 sind größtenteils positiv und stimmen mit Korrelationskoeffizienten größer 0,50 gut überein. Die Korrelation bei Warze CH3 von R1 mit R3 ist mit dem Wert von 0,90 sehr hoch und zeigt die gute Übereinstimmung des Wachstums an diesen zwei Stellen. Der Messpfad R6 fällt auf, da hier alle Werte der Korrelation innerhalb der Zone sehr niedrig sind, mit einem Höchstwert von lediglich 0,32 (R6–R2) und sogar einem negativen Wert (R6–R1). Da die Überlappung von R5 und R6 weniger als fünf Ringe betrug, wurde keine Korrelation gerechnet. Die Korrelationskoeffizienten der Messreihen L untereinander sind durchweg hoch, mit einem Höchstwert von 0,93 zwischen L2 und L3. Die Korrelationswerte der Zone LU sind ebenfalls hoch, mit Werten zwischen 0,70 bis 0,86.

Bei der Warze U1 konnte nur eine Korrelation von Messpfaden derselben Seiten berechnet werden, nämlich S1.1 mit S1.2. Diese weisen mit 0,58 einen guten Wert auf. Auch bei U2 konnten nur wenige Korrelationswerte von Messreihen derselben Seiten berechnet werden, diese sind jedoch auch alle um 0,60. Ausnahme bildet der Vergleich von S3.2 mit S3.3 mit dem Wert von 0,44.

Vergleicht man die Korrelationskoeffizienten verschiedener Seiten bzw. Zonen untereinander, so sind die Werte meist tiefer, in der Regel kleiner 0,50 oder sogar negativ. Ausnahmen sind hauptsächlich bei den Korrelationen der Zone rechts mit der Zone links der Warze CH3 zu finden. Hier sind R3 mit L1, L2, L3 und L4, sowie R5 mit L1, L2 und L4 gut korreliert, mit Werten größer 0,50. Die Korrelation von L1 mit R6 wurde nicht berechnet, da zu wenig gemeinsame Werte vorliegen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Korrelationen der Messserien innerhalb einer Seite bzw. einer Zone meist sehr hoch sind, diejenigen zwischen verschiedenen Seiten bzw. Zonen meist geringer oder gar negativ sind.

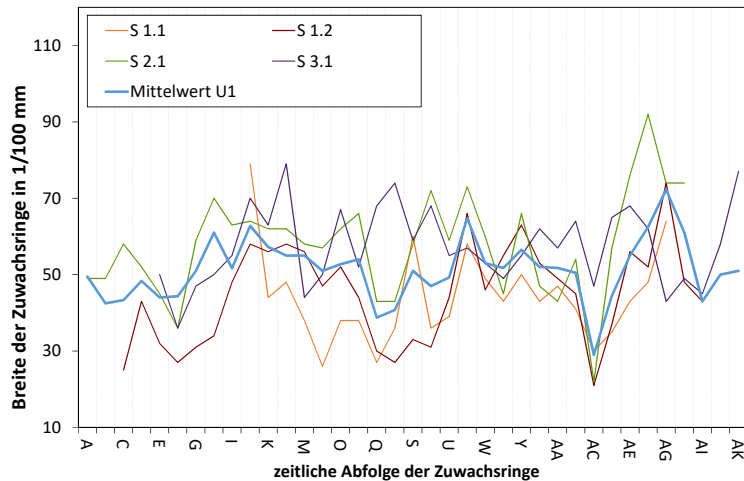


Abb. 3: Die Messserien der Warze U1 im Diagramm

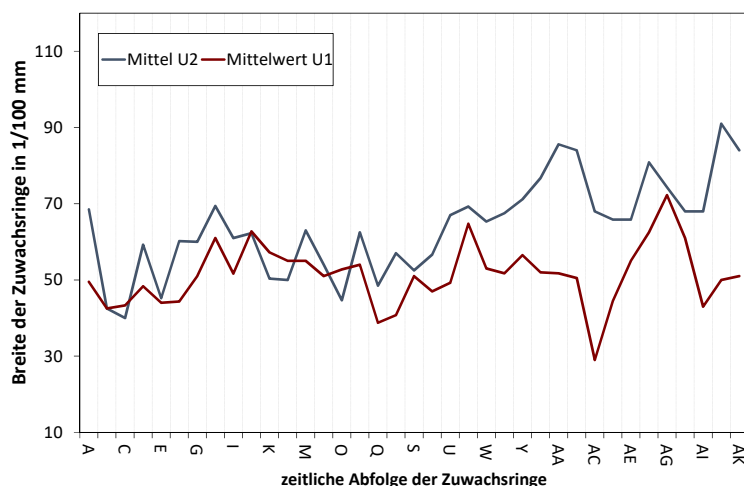


Abb. 4: Die Mittelkurven der Warzen U1 und U2 im Diagramm

Tab. 1 bis 3: Die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Messserien der drei Warzen (U1, U2 und CH3).



CH3	R1	R2	R3	R4	R5	R6	L1	L2	L3	L4	LU1	LU2	LU4
R1		0,86	0,90	0,72	0,37	-0,02	0,11	0,17	0,20	0,54			
R2			0,80	0,84	0,63	0,32	-0,13	0,12	0,09	0,48			
R3				0,69	0,65	0,24	0,54	0,86	0,91	0,53			
R4					0,60	0,11	-0,12	-0,11	-0,17	0,23			
R5						-	0,58	0,54	0,31	0,70			
R6							-	0,49	0,76	0,16			
L1								0,84	0,70	0,77			
L2									0,93	0,79			
L3										0,69			
L4													
LU1												0,83	0,86
LU2													0,70
LU4													

U1	S1.1	S1.2	S2.1	S3.1
S1.1		0,58	0,42	0,01
S1.2			0,53	0,01
S2.1				0,11
S3.1				

U2	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S3.3
S1.1		0,50	-0,25	-0,04	0,48	0,38	0,09
S1.2			0,23	0,18	0,10	0,17	0,19
S2.1				0,56	0,32	0,11	0,67
S2.2					0,24	0,30	0,14
S3.1						0,81	0,51
S3.2							0,44
S3.3							

4. Diskussion

4.1 Wachstumsstrukturen – Eigenschaften und Gemeinsamkeiten

Callot (1999) beschreibt in seinem Buch „*La truffe, la terre, la vie*“ [8] u. a. die ringartigen Strukturen auf den Warzen der Burgundertrüffel als Wachstumsstrukturen. Die Messungen, welche im Rahmen dieser Untersuchungen gemacht wurden, können Callots Hypothese unterstützen. Bei allen drei Warzen (U1, U2 und CH3) haben die Messungen ergeben, dass die räumliche Anordnung der Ringstrukturen und die Abfolge der relativen Ringbreiten innerhalb einer Seite und zwischen verschiedenen Seiten über weite Teile gut übereinstimmen und sich die Messserien kreuzdatieren lassen. Aufgrund dieser hohen Übereinstimmung, auch in den Extremwerten, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei diesen Strukturen auf der Oberfläche der Trüffelwarzen höchstwahrscheinlich um Wachstumsringe handelt. Die gemeinsamen Wachstumssignale kommen aufgrund von übergeordneten, das Wachstum bestimmenden Umweltfaktoren zustande. Die Haupterntezeit der Trüffel ist zwischen Juni und November [12]. Auf einer Warze sind meist 40 bis 50 Ringe zu zählen. Unter der Annahme, dass sich einerseits der Trüffelfruchtkörper innerhalb von rund zwei Monaten bildet und andererseits das Wachstum von Trüffelfruchtkörper und Warzen gekoppelt ist, lässt sich schließen, dass es sich um Tagesringe handeln könnte.

In den Messungen gibt es jedoch Bereiche, in denen die Kurven nicht gut übereinstimmen, da dort die Strukturen nur undeutlich sichtbar waren. Meist sind die Ringe in der Mitte der Warze am besten sichtbar. Dies deckt sich mit den Beobachtungen in [8], in der die Seiten einer Warze in drei Gebiete unterteilt werden: Die „*zone apicale*“ befindet sich im Gebiet der Spitze, wo die Ringe nahe zusammenliegen und nicht gut zählbar

sind. Die mittlere Zone wird „*zone intermédiaire*“ genannt, in der die Strukturen etwas weiter auseinanderliegen und klar erkennbar sind. Am Grund der Warze liegt die „*zone basale*“, welche gewölbt ist und dadurch verzerrte Ringe aufweist.

In [8] wurde die Hypothese aufgestellt, dass das Wachstum der Strukturen auch von den Nährstoffen beeinflusst wird. Dies würde wiederum darauf hinweisen, dass die Wachstumsstrukturen auf allen Warzen einer Trüffel miteinander kreuzdatiert werden können, da die Nährstoffsituation für sämtliche Warzen der Trüffel vergleichbar ist. Dies stimmt mit dem ähnlichen Wachstumsverlauf der Mittelkurven der beiden Warzen U1 und U2 überein.

Wieso die Strukturen nicht überall gut sichtbar sind oder wieso sie nicht gut zwischen verschiedenen Bereichen auf der Warze übereinstimmen, kann mit dem vorliegenden Untersuchungsmaterial nicht beantwortet werden. Unterschiede im Mikrostandort wie Bodenbeschaffenheit, Skelettgehalt, Bodenfeuchte und Nährstoffverfügbarkeit kommen als mögliche Ursachen in Frage, doch müsste dies insitu, also an Ort und Stelle im Boden, untersucht werden. Diese Informationen standen in dieser Arbeit aber nicht zur Verfügung.

4.2 Korrelationsanalysen

In der Dendrochronologie wird die Ähnlichkeit und Qualität von Jahrringserien mittels verschiedener statistischer Kenngrößen ermittelt, unter anderem auch mit Korrelationsanalysen [11]. Werte größer 0,6 gelten in der Regel als gut, Werte über 0,8 als sehr gut. Die Korrelationsanalysen der Messserien an den Trüffelwarzen sind also vergleichbar mit Jahrringdaten und bestätigen die weitgehend ähnlichen Wachstumsmuster der verschiedenen Seiten. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Messserien, welche auf der gleichen Seite liegen, sind meist deutlich größer als 0,50. Die wenigen Ausnahmen sind durchweg mit schlechter Sichtbarkeit

der Wachstumsstrukturen erklärbar, wie beispielsweise auf Warze CH3 bei der Messserie R6.

4.3 Limitierungen der Methodik

Die größte Schwierigkeit beim Messen liegt in der schlechten Sichtbarkeit der Ringe über weite Bereiche der Warze. Dadurch, dass die Warzen uneben sind und Risse und Verletzungen aufweisen, werden exakte Messungen örtlich zusätzlich erschwert. Zudem sind die Messreihen, im Vergleich zu Jahrringzeitreihen vergleichsweise kurz – einzelne mögliche Messfehler fallen somit stärker ins Gewicht und erschweren eine zuverlässige Kreuzdatierung. Dies zeigt sich auch bei den Korrelationsrechnungen, wo ein einzelner Fehler in einer kurzen Messserie die Koeffizienten drastisch verkleinert oder gar zu negativen Werten führt. Deshalb wurden nur die Korrelationen von Messserien, bestehend aus mindestens fünf gemeinsamen Ringen, berechnet.

Aufgrund der stellenweise sehr schmalen Wachstumsstrukturen ist es wichtig, die Ringe im Messprogramm exakt zu markieren, da schon minimalste Verschiebungen in den Werten große relative Unterschiede zwischen den Ringen verursachen. Die Sichtbarkeit der Ringstrukturen ist also zentral, weshalb es sich empfiehlt, sie vor dem Vermessen mit Hilfslinien an einem Bildschirm mit hoher Bildauflösung zu markieren.

Für weitere Messungen ist zu empfehlen, eher flache Warzen zu vermessen, da diese sich besser unter der Kamera ausrichten lassen und weniger perspektivische Verzerrung entsteht.

Da die Wachstumsstrukturen teilweise nicht gut erkennbar sind, müsste die Bilderfassung verbessert werden, sei dies durch manuelle oder digitale Bearbeitung. Eine möglichst hohe Auflösung kombiniert mit großer Tiefenschärfe wäre optimal, damit die Strukturen auch bei großem Zoom deutlich sichtbar sind. Eine weitere Möglichkeit wä-

ren Analysen mit dem Rasterelektronenmikroskop, die wie in [8] gezeigt, die Wachstumsringe deutlich sichtbar machen. Erfolgversprechend könnte auch der kürzlich in der Fachzeitschrift „Dendrochronologia“ von Van den Bulcke et al. (2014) für Jahrringe publizierte Ansatz sein [13]: Jahrringproben werden geröntgt und die Bilder zu einem 3D-Modell zusammengefügt. Diese Methode, die sich für Jahrringe zu eignen scheint, wäre eventuell auch für Trüffelwarzen einsetzbar und sie hätte den entscheidenden Vorteil, dass die Fruchtkörper nicht aufwendig präpariert werden müssten. Eine weitere Möglichkeit wäre die Behandlung der Warzen mit fluoreszierenden Farbstoffen, welche nur bestimmte Bestandteile eines Präparats einfärben und unter dem Lichtmikroskop Dank verbessertem Kontrast besser sichtbar machen, wie es oft in der medizinischen Forschung gemacht wird [1].

5. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit kommt zu dem Schluss, dass es sich bei den Ringstrukturen auf den Trüffelwarzen um synchrone Wachstumsringe handelt. Die Daten weisen darauf hin, dass die Ringstrukturen auch auf verschiedenen Seiten einer Trüffel mit einer vergleichbaren Abfolge der relativen Ringbreiten verlaufen. Diese Aussage basiert auf der Vermessung der Ringbreiten, auf Korrelationsanalysen und auf Analogieschlüssen. Um diesen Befund einwandfrei belegen zu können, sollte in einem nächsten Schritt das Wachstum der Warzen im Tagesrhythmus erfasst werden. In Kombination mit zeitlich hochaufgelösten Klimadaten könnten dadurch Rückschlüsse auf den Wachstumsrhythmus der Ringbildung und beeinflussende Faktoren gezogen werden. Dabei wäre zu untersuchen, in welcher Weise welche Umweltparameter das Trüffelwachstum direkt beeinflussen. Da die Trüffeln aber jeweils in Symbiosen mit Wirtspflanzen leben, gilt es, auch den Effekt derselben auf die Trüf-

eln zu erfassen, denn dadurch können die direkten Umweltfaktoren „umgeleitet“, „abgeschwächt“ oder „verstärkt“ werden [4].

Neben der Umsetzung der technischen Verbesserungsvorschläge für die Messmethodik müsste bei weiterführenden Studien unbedingt die Stichprobengröße erhöht werden, damit die Resultate statistisch besser abgesichert werden können. Dies hätte den Rahmen dieser Pilotstudie gesprengt, die sich auf die Entwicklung der Messmethodik konzentrierte. Es wäre daher sinnvoll, einerseits mehr Warzen an einer Trüffel und andererseits mehrere Trüffeln desselben Standortes zu vermessen. Mit der Vermessung von mehreren Trüffeln desselben Standortes wäre gewährleistet, dass die Fruchtkörper während der gleichen Zeitspanne unter denselben klimatischen Bedingungen und unter vergleichbaren Nährstoffvoraussetzungen gewachsen sind, und somit wären Rückschlüsse auf die wachstumsbeeinflussenden Faktoren möglich.

Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) für die Benutzung der Laborinfrastruktur der Forschungsgruppen Dendroökologie und Mykorrhiza bedanken. Spezieller Dank geht an meine wissenschaftlichen Betreuer Prof. Dr. Ulf Büntgen und Dr. Simon Egli sowie an Loïc Schneider und Anne Versteegen, welche mich in die Technik der Jahrringforschung eingeführt haben. Großer Dank geht auch an die Lehrpersonen Carmel Peterhans und Luzian Reinhardt für die Betreuung der Arbeit am Freien Gymnasium Zürich und die Unterstützung im Wettbewerb „Schweizer Jugend forscht“, sowie an Lenz Mosbacher für die künstlerische Gestaltung des Titelblattes.

Literaturverzeichnis

- [1] Anonym (2009) Method of the Year 2008. In: *Nature Methods*. 6, 2009, S. 1–1, doi:10.1038/nmeth.f.244
- [2] Büntgen U, Egli S, Schneider L, von Arx G, Rigling A, Camarero JJ, Sangüesa-Barreda G, Fischer CR, Oliach D, Bonet JA, Colinas C, Tegel W, Ruiz Barbarin JJ, Martínez-Peña F (2015). Long-term irrigation effects on Spanish holm oak growth and its black truffle symbiont. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202: 148–159
- [3] Büntgen U, Egli S (2014). Breaking new ground at the interface of dendroecology and mycology. *Trends in Plant Science* 19: 613–614
- [4] Büntgen U, Kauseurud H, Egli S (2012a). Linking mushroom productivity and phenology to climate variability. *Frontiers in Ecology and the Environment*: 14–19
- [5] Büntgen U, Egli S, Camarero JJ, Fischer EM, Stobbe U, Kauseurud H, Tegel W, Sproll L, Stenseth NC (2012b). Drought-induced decline in Mediterranean truffle harvest. *Nature Climate Change* 2: 827–829
- [6] Büntgen U, Egli S, Tegel W, Stobbe U, Sproll L, Elburg R, Peter M, Nievergelt D, Cherubini P, Stenseth NC (2012c). Illuminating the mysterious world of truffles. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10: 462–463
- [7] Boddy L, Büntgen U, Egli S, Gange A, Heegaard E, Kirk P, Mohammad A, Kauseurud H (2014). Climate variation effects on fungal distribution and fruiting. *Fungal Ecology* 10: 20–33
- [8] Callot G (1999). *La truffe la terre la vie*. INRA, Paris, Frankreich
- [9] Fritts H (1976). *Tree Rings and Climate*. The Blackburn Press, Caldwell, New Jersey, USA
- [10] Gärtner H, Schweingruber F H (2013). *Microscopic preparation techniques for plant stem analysis*. Kessel Publishing House, Remagen, Deutschland
- [11] Schweingruber F H (1983). *Der Jahrring*. Birrmenndorf, Zürich, Schweiz: Verlag Kessel.
- [12] Stobbe U, Egli S, Tegel W, Peter M, Sproll L, Büntgen U (2013 a). Potential and limitations of Burgundy truffle cultivation. *Applied Microbiology and Biotechnology* 97: 5215–5224
- [13] Van den Bulcke, J, Wernerson E L G, Dierick M, Van Loo D, Masschaele B, Brabant L, Boone M N, Van Hoorebeke L, Haneca C, Brun A, Luengo Hendriks C L, Van Acker J (2014). 3D tree-ring analysis using helical X-ray tomography. *Dendrochronologia* (32): 39–46

Publiziere auch Du hier!

FORSCHUNGSARBEITEN VON
SCHÜLER/INNE/N UND STUDENT/INN/EN

In der Jungen Wissenschaft werden Forschungsarbeiten von SchülerInnen, die selbstständig, z. B. in einer Schule oder einem Schülerforschungszentrum, durchgeführt wurden, veröffentlicht. Die Arbeiten können auf Deutsch oder Englisch geschrieben sein.

Wer kann einreichen?

SchülerInnen, AbiturientInnen und Studierende ohne Abschluss, die nicht älter als 23 Jahre sind.

Was musst Du beim Einreichen beachten?

Lies die [Richtlinien für Beiträge](#). Sie enthalten Hinweise, wie Deine Arbeit aufgebaut sein soll, wie lang sie sein darf, wie die Bilder einzureichen sind und welche weiteren Informationen wir benötigen. Solltest Du Fragen haben, dann wende Dich gern schon vor dem Einreichen an die Chefredakteurin Sabine Walter.

Lade die [Erstveröffentlichungserklärung](#) herunter, drucke und fülle sie aus und unterschreibe sie.

Dann sende Deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung per Post an:

Chefredaktion Junge Wissenschaft

Dr.-Ing. Sabine Walter
Paul-Ducros-Straße 7
30952 Ronnenberg
Tel: 05109 / 561508
Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de

Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter, der die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird den Euch, den AutorInnen zugeschickt und Du erhältst gegebenenfalls die Möglichkeit, Hinweise des Fachgutachters einzuarbeiten.

Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie **Jugend forscht** die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und als Open-Access-Beitrag veröffentlicht.

Was ist Dein Benefit?

Deine Forschungsarbeit ist nun in einer Gutachterzeitschrift (Peer-Review-Journal) veröffentlicht worden, d. h. Du kannst die Veröffentlichung in Deine wissenschaftliche Literaturliste aufnehmen. Deine Arbeit erhält als Open-Access-Veröffentlichung einen DOI (Data Object Identifier) und kann von entsprechenden Suchmaschinen (z. B. BASE) gefunden werden.

Die Junge Wissenschaft wird zusätzlich in wissenschaftlichen Datenbanken gelistet, d. h. Deine Arbeit kann von Experten gefunden und sogar zitiert werden. Die Junge Wissenschaft wird Dich durch den Gesamtprozess des Erstellens einer wissenschaftlichen Arbeit begleiten – als gute Vorbereitung auf das, was Du im Studium benötigst.



Richtlinien für Beiträge

FÜR DIE MEISTEN AUTOR/INN/EN IST DIES DIE ERSTE WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNG. DIE EINHALTUNG DER FOLGENDEN RICHTLINIEN HILFT ALLEN – DEN AUTOR/INNEN/EN UND DEM REDAKTIONSTEAM

Die Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger AutorInnen bis zum Alter von 23 Jahren.

- Die Beiträge können auf Deutsch oder Englisch verfasst sein und sollten nicht länger als 15 Seiten mit je 35 Zeilen sein. Hierbei sind Bilder, Grafiken und Tabellen mitgezählt. Anhänge werden nicht veröffentlicht. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zählen nicht mit.
- Formulieren Sie eine eingängige Überschrift, um bei der Leserschaft Interesse für Ihre Arbeit zu wecken, sowie eine wissenschaftliche Überschrift.
- Formulieren Sie eine kurze, leicht verständliche Zusammenfassung (maximal 400 Zeichen).
- Die Beiträge sollen in der üblichen Form gegliedert sein, d. h. Einleitung, Erläuterungen zur Durchführung der Arbeit sowie evtl. Überwindung von Schwierigkeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Diskussion, Liste der zitierten Literatur. In der Einleitung sollte die Idee zu der Arbeit beschrieben und die Aufgabenstellung definiert werden. Außerdem sollte sie eine kurze Darstellung schon bekannter, ähnlicher Lösungsversuche enthalten (Stand der Literatur). Am Schluss des Beitrages kann ein Dank an Förderer der Arbeit, z. B. Lehrer und Sponsoren, mit vollständigem Namen angefügt werden. Für die Leser kann ein Glossar mit den wichtigsten Fachausdrücken hilfreich sein.
- Bitte reichen Sie alle Bilder, Grafiken und Tabellen nummeriert und zusätzlich als eigene Dateien ein. Bitte geben Sie bei nicht selbst erstellten Bildern, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. die genauen und korrekten Quellenangaben an (siehe auch [Erstveröffentlichungserklärung](#)). Senden Sie Ihre Bilder als Originaldateien oder mit einer Auflösung von mindestens 300 dpi bei einer Größe von 10 · 15 cm! Bei Grafiken, die mit Excel erstellt wurden, reichen Sie bitte ebenfalls die Originaldatei mit ein.
- Vermeiden Sie aufwendige und lange Zahlentabellen.
- Formelzeichen nach DIN, ggf. IUPAC oder IUPAP verwenden. Gleichungen sind stets als Größengleichungen zu schreiben.
- Die Literaturliste steht am Ende der Arbeit. Alle Stellen erhalten eine Nummer und werden in eckigen Klammern zitiert (Beispiel: Wie in [12] dargestellt ...). Fußnoten sieht das Layout nicht vor.
- Reichen Sie Ihren Beitrag sowohl in ausgedruckter Form als auch als PDF

ein. Für die weitere Bearbeitung und die Umsetzung in das Layout der Jungen Wissenschaft ist ein Word-Dokument mit möglichst wenig Formatierung erforderlich. (Sollte dies Schwierigkeiten bereiten, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung, damit wir gemeinsam eine Lösung finden können.)

- Senden Sie mit dem Beitrag die [Erstveröffentlichungserklärung](#) ein. Diese beinhaltet im Wesentlichen, dass der Beitrag von dem/der angegebenen AutorIn stammt, keine Rechte Dritter verletzt werden und noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht wurde (außer im Zusammenhang mit **Jugend forscht** oder einem vergleichbaren Wettbewerb). Ebenfalls ist zu versichern, dass alle von Ihnen verwendeten Bilder, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. von Ihnen veröffentlicht werden dürfen, also keine Rechte Dritter durch die Verwendung und Veröffentlichung verletzt werden. Entsprechendes [Formular](#) ist von der Homepage www.junge-wissenschaft.ptb.de herunterzuladen, auszudrucken, auszufüllen und dem gedruckten Beitrag unterschrieben beizulegen.
- Schließlich sind die genauen Anschriften der AutorInnen mit Telefonnummer und E-Mail-Adresse sowie Geburtsdaten und Fotografien (Auflösung 300 dpi bei einer Bildgröße von mindestens 10 · 15 cm) erforderlich.
- Neulingen im Publizieren werden als Vorbilder andere Publikationen, z. B. hier in der Jungen Wissenschaft, empfohlen.

Impressum

[JUNGE]
wissenschaft



Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische
Bundesanstalt (PTB)
www.junge-wissenschaft.ptb.de

Redaktion

Dr. Sabine Walter, Chefredaktion
Junge Wissenschaft
Paul-Ducros-Str. 7
30952 Ronnenberg
E-Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de
Tel.: 05109 / 561 508

Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,
Pressesprecher der PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
E-Mail: jens.simon@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 3006
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)

Design & Satz

Sabine Siems
Agentur „provieler werbung“
E-Mail: info@provieler-werbung.de
Tel.: 05307 / 939 3350

