

Dieser Artikel wird Ihnen  
präsentiert von



**Substance Detection**  
**Condition Monitoring**  
**Material Testing**

**KOMPASS**  
PIONEERING SENSOR SOLUTIONS  
**kompass-sensor.com**



# Den tribologischen Vorteilen von Fluorwachsen auf der Spur, Teil 2: Fluorwachspräparation, Selbstläufer oder kaum zu kontrollierender Prozess?

Marcel Münch, Rudolfstraße 12, 76131 Karlsruhe

## Kurzfassung

Dieser Beitrag zeigt, wie die im ersten Teil vorgestellten tribologischen Vorteile von Fluorwachsen – Verringerung des Saugeffekts sowie des Scherwiderstands – genutzt werden können. Der korrekten Präparation der Ski kommt hierbei große Bedeutung zu. Durch gezielten Wärmeeintrag kann bei Hartwachsen ein oberflächennaher PFAS-Anteil von 100 % erzeugt werden, wobei ein zu geringer wie auch ein zu großer Wärmeeintrag schädlich sind. Im ersten Fall gelangen zu wenig PFAS-Moleküle an die Wachs Oberfläche, während im zweiten Fall PFAS-Moleküle von der Oberfläche abdampfen. Beide Fälle reduzieren oben genannte Vorteile. Des Weiteren sollte die Präparation möglichst zeitnah zur geplanten Nutzung stattfinden, da die Konzentration der PFAS-Moleküle an der Oberfläche mit der Zeit abnimmt.

## Einführung

Im ersten Artikel des Zweiteilers wurden eingangs die Prämissen rund um das erneute Verschieben des Fluorverbotes durch die FIS auf die Saison 2023/2024 erläutert [1]. Seit einiger Zeit ist dieses Thema nun bereits in der Welt des Skisports präsent, doch gibt es große Bereiche, die wissenschaftlich wenig bis gar nicht verstanden sind. Hier soll dieser Zweiteiler ansetzen. Zunächst wurden die tribologischen Vorteile von Fluorwachsen diskutiert. Es wurde eine Theorie vorgestellt, wie durch Fluorwachs sowohl die Festkörper- als auch die Flüssigkeitsreibung verbessert und dadurch die Gleiteigenschaften im Bereich der Mischreibung optimiert werden. Nun soll es verstärkt um die Praxis des Wachsens gehen. Bei der Skipräparation gibt es keine allgemein akzeptierte Methode, mit der sich immer die besten Gleiteigenschaften erzielen lassen. Flexibilität ist hier das Stichwort. Einflussgrößen wie bspw. das Wetter, die Schneebedingungen und der Athlet selbst bestimmen die Anforderungen an die Präparationsmittel und die verwendeten Methoden. Eine weit verbreitete Variante die Ski zu präparieren, kommt bei der Nutzung von Hart-

sigkeitsreibung verbessert und dadurch die Gleiteigenschaften im Bereich der Mischreibung optimiert werden. Nun soll es verstärkt um die Praxis des Wachsens gehen. Bei der Skipräparation gibt es keine allgemein akzeptierte Methode, mit der sich immer die besten Gleiteigenschaften erzielen lassen. Flexibilität ist hier das Stichwort. Einflussgrößen wie bspw. das Wetter, die Schneebedingungen und der Athlet selbst bestimmen die Anforderungen an die Präparationsmittel und die verwendeten Methoden. Eine weit verbreitete Variante die Ski zu präparieren, kommt bei der Nutzung von Hart-

wachsen zum Einsatz. Die Präparation kann dabei in Wachsauftrag und Abzug des überschüssigen Materials eingeteilt werden. Der Auftrag erfolgt in der Regel mit einem Wachsbügeleisen und das Abziehen mit einer Plexiglassklinge. Häufig wird nach dem Abziehen noch gebürstet, um die Struktur des Schliffs freizulegen. Bei Fluorwachsen ist die Wirksamkeit der Präparation auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften der eingesetzten PFAS-Additive zurückzuführen [1]. Genau diese Eigenschaften wirken bereits, sobald der Skibelag mit dem Wachs bedeckt ist. Bei einem Hartwachs ist dies direkt nach simplem Aufbügeln der Fall. Anschließend durchgeführte Schritte, wie das Abziehen oder Bürsten, könnten im Fall von Fluorwachsen dazu führen, dass die Fluorkomponente abgetragen wird.

Im Folgenden wird die Präparation von Fluorwachsen kritisch untersucht. Ist der Vorgang ein Selbstläufer oder existieren bisher noch unbekannte Mechanismen, die das Ganze massiv erschweren? Um diese Frage zu beantworten, soll der Einfluss verschiedener Präparationsschritte sowie -werkzeuge auf den oberflächennahen Fluorgehalt ermittelt werden. Der oberflächennahe Fluorgehalt wird sowohl für Aussagen zu den tribologischen Eigenschaften des untersuchten Zustands, als auch zu den wirkenden Mechanismen während der Präparation herangezogen.

## Experimenteller Teil

Für die Untersuchungen wurden Belagsproben mit verschiedenen Wachsen und verschiedenen Methoden präpariert. Es wurden Hartwachs sowie ein Pulverwachs genutzt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich bei den fluorierten Hartwachsen um eine speziell angefertigte Charge mit quantifiziertem Anteil an PFAS (per- und polyfluorierte Alkylverbindungen) handelt. D.h. ein Wachs, das im weiteren Verlauf mit „5 % PFAS-Anteil“ bezeichnet wird, besteht laut Herstellerangaben zu 5 % aus solchen Molekülen. Die übrigen 95 %, also das Grundwachs, bestehen aus Paraffinen. Im zweiten Teil wurde die

präparierte Oberfläche auf den Fluorgehalt hin untersucht. Hier aufgeführt sind Ergebnisse der chemischen Oberflächenanalyse mit Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) sowie Kontaktwinkelmessungen. Die XPS eignet sich für quantitative Aussagen zu Fluorgehalten mit einer Auflösung im Bereich einiger Atomlagen. Die simple Versuchsmethode der statischen Kontaktwinkelmessung eignet sich aufgrund des hydrophoben Charakters von Fluorwachsen ebenfalls dazu, qualitative Aussagen über den Fluorgehalt einer Oberfläche zu tätigen.

### *Probenpräparation*

Um eine konsistente Präparation zu gewährleisten, wurden kleine, ski-ähnliche Proben eingesetzt. Als Basis hierfür diente jeweils ein metallischer Probenschuh mit Spannschrauben. Mittels der Schrauben wurde ein entsprechend zugeschnittener UHMWPE-Belag (engl. ultra-high-molecular-weight polyethylene) der PERLATECH GMBH & CO.KG (Bürgstadt, Deutschland) aufgespannt. Eine mit Belag bezogene Probe ist in Abb. 1 dargestellt. Die Beläge tragen keinen Schliff. Die Auflagefläche einer solchen Probe beträgt 65 x 40 mm. Der Auftrag der Wachsschicht wurde in verschiedenen Vorgehensweisen durchgeführt, die im Folgenden näher erläutert werden.

### Bügelaufrag (Kürzel -B-)

Die Präparationsmethode „Bügelaufrag“ entspricht der gängigen Vorgehensweise für Hartwachs im Feld. Zunächst wurde das Wachs mittels eines Wachsbügeleisens aufgeschmolzen und auf die Belagsoberfläche getropft. Bei einer Temperatur des Bügeleisens von 130 °C wurde das Wachs gleichmäßig verteilt und anschließend bei Raumtemperatur ausgehärtet. Das Bügeleisen wurde vor jeder Nutzung mit einem Cleaner gereinigt.



Abb. 1: Metallischer Probenschuh, bezogen mit UHMWPE-Belag.

### Handauftrag (Kürzel -H-)

Beim Handauftrag wurde darauf geachtet, dass lediglich das entsprechende Hartwachs mit der Belagsoberfläche in Kontakt kamen. Dazu wurde das Wachs per Hand auf den Belag aufgerieben. Durch den Abrieb und die eingebrachte Reibungswärme wurde auch mit dieser Präparationsmethode eine haftende Wachsschicht erzielt.

### Abzug (Kürzel -P; -S)

In der Praxis wird meist im letzten Schritt das überschüssige Wachs abgezogen. Das wurde hier auf zwei verschiedene Weisen durchgeführt. Zum Einsatz kamen Plexiglas- (Kürzel -P) sowie Stahlklingen (Kürzel -S). Plexiglas- und Stahlklingen sind hierbei das meist genutzte Werkzeug. In der Regel werden solche Klingen mehrfach genutzt und gelegentlich nachgeschliffen. Bei den eingesetzten Stahlklingen handelte es sich um handelsübliche Teppichmesserklingen, die vor der Nutzung mit Aceton in einem Ultraschallbad gereinigt wurden. Jede Stahlklinge wurde lediglich einmal genutzt, um eine Kontamination aus vorherigen Präparationsdurchgängen zu vermeiden. Die Plexiglas- und Stahlklinge wurde, ebenso wie das Bügeleisen, mit dem Cleaner gereinigt.

### Präparation des Pulverwachses

Entsprechende Proben wurden zunächst mit einer fluorfreien Grundwachsschicht versehen. Nach dem Aushärten dieser Schicht wurde das

Pulver aufgestreut und mit dem Bügeleisen kurz angedrückt. Im Anschluss wurde das Pulver mit einem Kork in die Grundwachsschicht eingerieben.

## Ergebnisse

### *Allgemeine Wachsuntersuchungen*

In Tab. 1 sind Ergebnisse zur chemischen Zusammensetzung der Wachsfläche dargestellt. Hier aufgeführt sind ausschließlich Werte von Hartwachsen. Es wurde ein fluorfreies Wachs, das frei erhältlich ist, untersucht. Zusätzlich wurden zwei Wachse aus der bereits erwähnten speziellen Charge mit quantifiziertem PFAS-Anteil gemessen. Hier ist bei allen Proben der Fokus auf die verschiedenen Präparationsmethoden gelegt worden. Bei der als fluorfrei spezifizierten Probe konnte bei der gängigsten Präparation mit Bügeleisen und Plexiglas- und Stahlklinge ein Fluorgehalt von 7,4 At.-% gemessen werden. Bei einer per Hand aufgeriebenen Probe dagegen 0 At.-%. Die Probe mit 100 % PFAS-Anteil zeigte beim Auftrag per Hand Fluorgehalte von ca. 38 At.-%. Wurde das Wachs dagegen mit dem Bügeleisen aufgetragen, konnte nur noch ein Fluorgehalt von 5,8 At.-% gemessen werden. Auch bei der Probe mit 5 % PFAS-Anteil ist ein signifikanter Unterschied der Messergebnisse zu beobachten. Hier konnte für die aufgebügelte Probe ein um ca. 9 At.-% höherer Fluorgehalt gegenüber der aufgeriebenen Probe gemessen werden.

Bezeichnung	Art der Präparation	C [At. %]	F [At. %]	Rest [At. %]
fluorfrei	B+P	91,5	7,4	1,1
fluorfrei	H	99,7	0,0	0,3
100 % PFAS	H+S	58,0	37,7	4,3
100 % PFAS	B+S	86,8	5,8	7,4
100 % PFAS	H	55,2	37,8	7,1
5 % PFAS	H	94,9	4,0	1,1
5 % PFAS	B	85,0	13,2	1,8

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung verschiedener Hartwachse unter Anwendung vordefinierter Präparationsmethoden.

### Auslagerung des Pulverwachses

Die Präparation des Pulverwachses mit einem PFAS-Anteil von 100 % gilt als gängige Methode im Profibereich, um bestmögliche Gleiteigenschaften zu erzielen. Es wurde untersucht, inwieweit eine Auslagerung einer solchen Probe den Kontaktwinkel und somit das Maß der Hydrophobie, also die Hydrophobizität, beeinflusst. Die Auslagerung wurde über einen Zeitraum von 14 Tagen bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse sind Abb. 2 zu entnehmen. Um einer potentiell inhomogenen Präparation und damit nicht belastbaren Ergebnissen vorzubeugen, wurden jeweils drei Messungen an drei verschiedenen Stellen der Probenoberfläche durchgeführt. Zur korrekten Einordnung hinsichtlich der Hydrophobizität ist zusätzlich das Kontaktwinkelniveau einer unbehandelten Belagsprobe auf Polyethylenbasis dargestellt.

Die Ergebnisse im Ausgangszustand liegen bei ca. 120°. Nach einer Auslagerungsdauer von sieben Tagen konnten nur noch Kontaktwinkel von ca. 90° ermittelt werden. Nach weiteren sieben Tagen wurden Winkel von ca. 80° gemessen. D.h. es ist ein Rückgang der Hydrophobizität zu beobachten, der zu Beginn der Auslagerung deutlich größer ist, als im späteren Verlauf.

## Diskussion

### Kontamination

In den Daten aus Tab. 1 sind signifikante Unterschiede im Fluorgehalt zu erkennen, selbst wenn bei der Präparation das gleiche Wachs genutzt wurde. In diesem Abschnitt soll der Fokus auf den Ergebnissen des fluorfreien Wachses liegen. Die hier vorliegenden Unterschiede sind auf eine Kontamination durch die eingesetzten Werkzeuge zurückzuführen. Wachsbugelisen und Plexiglasklingen sind im Standardrepertoire eines jeden Wachsstechnikers und ambitionierten Hobbysportlers enthalten. Genau dieser Tatsache ist es geschuldet, dass die Kontamination durch diverse Wachsrückstände aus vorangegangenen Präparationsschritten nicht zu vermeiden ist. Besonders relevant ist, dass auch die Nutzung

eines speziellen Fluorwachsreinigers keine Garantie für eine kontaminationsfreie Präparation bietet. Werden die Skier also bewusst fluorfrei präpariert, mit Werkzeugen, die bereits mit Fluorwachsen in Kontakt kamen, so könnten an diesen trotz Reinigung PFAS-Rückstände vorhanden sein. Diese Kontamination ist ebenso umgekehrt möglich, also wenn Fluorwachs präpariert werden soll, aber noch fluorfreie Wachsrückstände auf den Werkzeugen vorliegen.

### Sublimation von PFAS-Molekülen

Bereits in den 1990er Jahren wurde festgestellt, dass während des Wachsens PFAS-beladene Aerosole entstehen [2, 3]. Diese werden über die Atemwege aufgenommen und können verschiedene gesundheitliche Folgen nach sich ziehen. Stets wurde dieser Sachverhalt nur aus Blickrichtung der Kontamination der Luft betrachtet, doch die Anreicherung von Partikeln in der Umgebung muss, simpel ausgedrückt, auch irgendwo einen Ursprung haben. Werden die Ergebnisse des Wachses mit 100 % PFAS-Anteil aus Tab. 1 herangezogen, fällt ein erheblicher Unterschied im gemessenen Fluorgehalt auf.

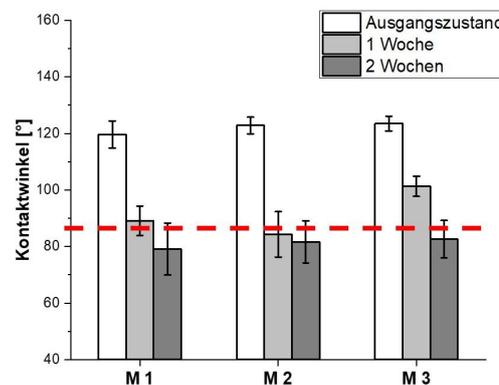


Abb. 2: Kontaktwinkel einer Probe mit Pulverwachs nach Auslagerung bei Raumtemperatur. In Rot dargestellt ist das Kontaktwinkelniveau einer unbehandelten Belagsprobe.

Während bei dem per Hand aufgetriebenen Wachs ein Fluorgehalt über 37 At.-% gemessen werden konnte, wurde beim aufgebügelten Wachs ein Wert von lediglich 5,8 At.-% bestimmt. Da zu diesem Zeitpunkt die Problematik der bidirektionalen Kontamination bereits bekannt war, kann bei allen hier vorgestellten Daten, mit Ausnahme der fluorfreien Proben, eine solche Verunreinigung als sehr unwahrscheinlich angesehen werden. Viel eher ist hier dies zu beobachten, was bereits Hämeri *et al.* [3]

in ihren Experimenten zeigen konnten. Sie untersuchten Fluorwaxse auf die Bildung von PFAS-Partikeln in der Umgebungsluft in Abhängigkeit der Zeit und der Temperatur hin. Bei Versuchstemperaturen von bereits 120 °C konnte eine beträchtliche Beladung der Luft gemessen werden.

Da der Auftrag per Bügeleisen hier stets bei 130 °C durchgeführt wurde, muss davon ausgegangen werden, dass für einige PFAS-Additive die Siedetemperatur erreicht wurde. Da das erwähnte Hartwachs mit 100 % PFAS-Anteil bereits im festen Zustand eher pulverartige Konsistenz mit schlechter Belagsanbindung aufwies, ist es denkbar, dass nach längerem Wärmeeintrag durch das Bügeleisen PFAS-Moleküle verdampften oder sublimierten und lediglich geringe Mengen auf der Belagsoberfläche zurückblieben. Dies lässt sich anhand der XPS-Daten bestätigen. Trotz der Präparation eines Wachses mit 100 % Anteil an PFAS, kann es daher bei zu hohem Wärmeeintrag zu einem geringem Fluorgehalt an der Probenoberfläche kommen.

Nun wurde bereits angesprochen, dass bei einer Temperatur von 120 °C beträchtliche Mengen der untersuchten PFAS in die Gasphase übergehen [3]. Allerdings kann bei einer solchen Temperatur nicht davon ausgegangen werden, dass die Siedetemperatur bei allen für Fluorwaxse genutzten PFAS überschritten ist. Es muss noch ein weiterer Prozess berücksichtigt werden.

Um diesen zu erläutern, werden die Ergebnisse der Auslagerung des Pulverwachses herangezogen. In dem bei Raumtemperatur und in offener Laborumgebung durchgeführten Auslagerungsversuch wurde ein erheblicher Rückgang der Kontaktwinkel in Abhängigkeit der Zeit bestimmt. Ein Rückgang des Kontaktwinkels um einen solchen Betrag kann mit einem Rückgang des PFAS-Anteils an der Probenoberfläche erklärt werden. Anders als oben beschrieben, wurde bei diesem Versuch keine übermäßige Wärmemenge zugeführt.

Spezielle chemische- sowie phy-

sikalische Eigenschaften, wie bspw. Schmelz- und Siedetemperatur, sind nur den Wachsherstellern bekannt. Allerdings können Informationen zu PFAS aus der Literatur genutzt werden, um Aussagen über Fluorwaxse zu treffen. So merken Riedel *et al.* [4] in ihrer Arbeit zu FTOHs (Fluortelomerkohole) an, dass bei dieser Gruppe der PFAS, aufgrund der Höhe des Dampfdruckes, bereits bei Raumtemperatur signifikante Mengen in der Gasphase vorliegen.

In Abb. 3 ist vereinfacht dargestellt, wie der Dampfdruck  $p$  einer Komponente A einzuordnen ist. Abgebildet ist ein geschlossenes System, in dem einzig die Komponente A bei einer bestimmten Temperatur  $T$  vorliegt. Zwischen Flüssigkeit A und Dampf A bei Dampfdruck  $p$  herrscht thermodynamisches Gleichgewicht. Gleichgewicht darf hier allerdings nicht mit Stillstand verwechselt werden. Tatsächlich halten sich Kondensations- und Verdunstungsprozess die Waage. Die schematische Darstellung wurde aus Gründen der besseren Nachvollziehbarkeit bewusst mit der Kombination aus flüssigem und festem Aggregatzustand gewählt. Ein bekanntes Beispiel aus dem Alltag, bei dem dieser Prozess auftritt, ist die Schale mit Wasser, die im Winter der trockenen Heizungsluft etwas entgegenwirken soll.

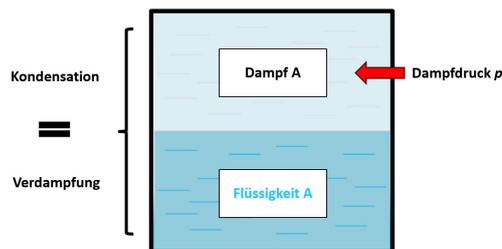


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung eines geschlossenen Systems bei einer bestimmten Temperatur  $T$ .

Auch ohne das Erreichen der Siedetemperatur des Wassers, erhöht sich nach einiger Zeit die Luftfeuchtigkeit. Dieser Prozess ist, wenn auch in schwächerem Ausmaß, auf Festkörper, also die Probe mit Pulverwachs übertragbar. Wird die Probe ausgelagert, so bildet sich oberflächennah eine gasförmige Schicht des PFAS-Additivs mit einem gewissen Partialdruck aus. In einem geschlossenen System würde irgendwann das thermodynamische Gleichgewicht erreicht sein. In der offenen Laborumgebung kann die Gasschicht aber

permanent abtransportiert werden. Somit entsteht eine Folge aus Bildung und Abtransport, die darin resultiert, dass nach einigen Tagen vermutlich nur noch ein geringer PFAS-Anteil an der Probenoberfläche vorliegt. Die Möglichkeit, dass sich bspw. eine Staubschicht auf der Probenoberfläche befand, kann durch die gewählte Methode der Kontaktwinkelmessung ausgeschlossen werden.

Es muss also berücksichtigt werden, dass es sowohl durch das Erreichen des Siede- oder Sublimationspunkts, als auch durch den eben beschriebenen Prozess zum Übergang der Additive in die Gasphase kommen kann. Resultat in einer typischen Umgebung wäre die Kontamination der Umgebungsluft, bei gleichzeitig sehr geringen Fluorgehalten auf der Skioberfläche. Dies ist abhängig von der Zeit und der Temperatur.

#### Entmischung der PFAS-Additive

Der nun folgende Abschnitt steht im Zeichen der tribologischen Eigenschaften von Fluorwachsen. Interessanterweise könnten die hier erwähnten Punkte bereits seit Jahren sowohl der Wissenschaft als auch der Sportwelt bekannt sein.

In diesem Kapitel wird der Prozess der Entmischung von Grundwachs und PFAS-Additiv vorgestellt. Die These wird dabei mit eigenen sowie Daten aus der Literatur gestützt. Weiterhin wird erwähnt, wie in der Praxis bereits unbewusst genau dieser Prozess genutzt wird.

Werden die Ergebnisse der Probe mit 5 % PFAS-Anteil aus Tab. 1 betrachtet, fällt eine erhebliche Steigerung im Fluorgehalt des aufgebügelten Wachses auf. Durch die Nutzung des Bügeleisens, wurde ein um ca. 9 At.-% höherer Fluorgehalt gegenüber dem Auftrag per Hand gemessen. Auch hier war das Problem der Kontamination bekannt, weshalb zuvor äußerst gründlich gereinigt wurde. Eine Verschmutzung durch Wachsrückstände ist somit zwar möglich, aber als unwahrscheinlich einzuschätzen. Auch auf moderate Nutzung des Bügeleisens wurde geachtet. D.h. die Differenz der Messergebnisse ist auf die Präparationsmetho-

de, genauer gesagt die zugeführte Wärmemenge zurückzuführen.

Dieser Aspekt wurde bereits von Rogowski *et al.* [5] in den Messergebnissen einer Arbeit aus dem Jahr 2007 festgehalten. Es wurden XPS-Daten dreier Wachse auf Paraffinbasis präsentiert, die jeweils einen herstellungsbedingten Anteil von 4 %, 8 % und 50 % eines PFAS-Additivs aufwiesen. Alle Proben zeigten nach der Herstellung allerdings einen Fluorgehalt von ca. 50 At.-% an der Oberfläche. Bei der Vorbereitung der Wachse wurden Mischungen aus Paraffin und PFAS-Komponente hergestellt. Dabei wurden die Komponenten aufgeschmolzen. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass es bereits während der Herstellung zu einer Entmischung der PFAS-Moleküle und zur Diffusion an die Oberfläche gekommen ist.

Durch die oberflächennahe Anreicherung kann somit ein deutlich höherer Fluorgehalt erreicht werden, als der initiale Mischungsanteil vermuten lässt. Es ist wahrscheinlich, dass durch den Wärmeeintrag während des Aufbügelns die Diffusionsfähigkeit des Wachses stark zunimmt. Die Beweglichkeit der PFAS-Moleküle ist dann so groß, dass, selbst im kurzen Zeitraum des Wachsauftrags, signifikante Strecken innerhalb des Grundwachses zurückgelegt werden können.

Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung der Entmischung bei den erwähnten Wachsen ist davon auszugehen, dass neben der Wärmeeinwirkung auch der chemische Aufbau der PFAS-Verbindungen den Prozess erheblich beeinflusst. Nach jetzigem Stand ist es durchaus denkbar, dass bei frei erhältlichen fluorierten Hartwachsen durch Entmischung PFAS-Anteile von bis zu 100 % an der Oberfläche realisiert werden können. Das ist schematisch in Abb. 4 dargestellt.

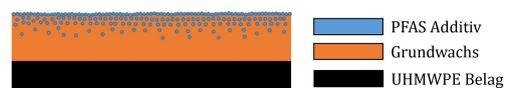


Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Wachsschicht.

Um Unklarheiten zu vermeiden, sollte stets beachtet werden, dass ein PFAS-Anteil von 100 % nicht mit einem Fluorgehalt von 100 At.-% gleichzusetzen ist. Da davon auszu-

gehen ist, dass verschiedene Wachshersteller auch verschiedene Additive nutzen, kann hier keine allgemeingültige Aussage zur Beziehung zwischen PFAS-Anteil und Fluorgehalt getroffen werden. Ein Richtwert bietet allerdings das Ergebnis der XPS-Messung des Hartwachses mit 100 % PFAS-Anteil in Tab. 1. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Wanderung der PFAS-Moleküle zur Oberfläche zu einem gewissen Grad bei jedem fluorierten Hartwachs auftreten kann. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende Wärmezufuhr, um die Molekülbeweglichkeit und somit die Diffusionsneigung zu erhöhen. Es ist allerdings nicht bekannt, wie die Wärmezufuhr die eben beschriebenen Prozesse im Detail beeinflusst.

Die Darstellung in Abb. 4 wurde bewusst so gewählt, dass ein Gradient des PFAS-Additivs entsteht. Die Ergebnisse des Wachses mit 5 % Anteil an PFAS lassen vermuten, dass hier keine vollständige Entmischung erfolgte. Bei einer vollständigen Entmischung wäre ein deutlich höherer Fluorgehalt zu erwarten, als das Messergebnis von 13,2 At.-% belegt. Ein vergleichbares Ergebnis zu Abb. 4, könnte auch bei der Präparation eines Pulverwachses mit 100 % PFAS-Anteil erzielt werden.

Eine Wachsschicht wie in Abb. 4 wird als essentiell eingeschätzt, um die im ersten Artikel vorgestellten tribologischen Vorteile zu erlangen [1]. Mittels Tricks aus der Praxis, wie bspw. die Ski in die Sauna zu stellen oder mit einer Infrarotleuchte zu bestrahlen, konnten in der Vergangenheit bereits der optimale Aufbau der Wachsschicht eingestellt oder zumindest der Zustand verbessert werden.

Nun stellt sich noch die Frage, inwieweit eine Wachsschicht mit gleichmäßig verteilten PFAS-Additiven, d.h. ohne Entmischung, vergleichend zum in Abb. 4 vorgestellten Aufbau, abschneiden würde. Es soll also eine Wachsschicht mit homogener Verteilung bei gleichzeitig guter Belagsanbindung betrachtet werden. Da während der Probenpräparation eine signifikant schlechtere Belagsanbindung mit steigendem PFAS-Anteil festgestellt wurde, wären für eine solche Schicht Hartwachse mit

PFAS-Anteilen zwischen 5 % und 15 % geeignet. In diesem Bereich sind allerdings gegenüber der reinen UHMWPE-Oberfläche nur leicht erhöhte Kontaktwinkel gemessen worden, so dass die Vorteile, die sich aus einem hohen Maß an Hydrophobie ergeben, hier kaum merklich sind [1].

Auch der mit dem leichten Abscheren verbundene tribologische Vorteil wäre vermindert [1]. Da die guten Gleiteigenschaften von Fluorwachsen aus der Kombination von leichtem Abscheren und einem hohen Maß an Hydrophobie resultieren, ist eine Wachsschicht, wie sie in diesem Absatz beschrieben wird, aus tribologischer Sicht als weniger wirksam einzuschätzen.

## Fazit

Die Fluorwachspräparation ist ein komplexer Prozess, der ohne spezielles Wissen nur schwer zu kontrollieren ist. Sollen die tribologischen Vorteile optimal genutzt werden, muss eine Wachsschicht mit einem oberflächennahen PFAS-Anteil von 100 % angestrebt werden. Um dies zu erreichen, ist die korrekte Wachsauswahl sowie Präparation essentiell.

Im Fall von Hartwachsen ist die Auswahl so zu treffen, dass eine möglichst starke Oberflächenanreicherung erzielt wird. Gleichzeitig sollte der Grundgehalt an PFAS hoch sein, d.h. es sollte ein hochfluoriertes Hartwachs genutzt werden. Die Diffusionsneigung des Wachses muss während des Auftrags durch Wärmezufuhr für eine gewisse Dauer erhöht werden, um die Anreicherung an der Oberfläche zu bewirken.

Bei Pulverwachs kann durch Kombination von fluorfreiem Grundwachs und Pulverwachs mit 100 % PFAS-Anteil ein vergleichbares Ergebnis erzielt werden. Der Auftrag des Pulvers sollte über kurzes Anschmelzen und anschließendem Einkorken erfolgen. Bei beiden Wachstypen ist die Wärmezufuhr auf ein Minimum zu beschränken. Weiterhin ist die Präparation zeitnah zur beabsichtigten Nutzung durchzuführen. Beide Punkte sind essentiell, um die oben diskutierten Effekte zu vermeiden.

Werden all diese Voraussetzungen

erfüllt, ist der Fakt zu berücksichtigen, dass Fluorwaxse einem hohen Abrieb unterliegen [6]. Da der Abrieb direkt mit dem Anteil an Schneekontakt korreliert, ist eine Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur gegeben. Selbst bei Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt, d.h. theoretisch geringem Anteil an Festkörperreibung, ist mit raschem Abrieb der oberflächennahen PFAS-Schicht zu rechnen. Der Abrieb ist mit dem bloßen Auge allerdings nicht zu erkennen, da das Grundwachs weitgehend zurückbleibt und erst nach weit größeren Distanzen merklichem Verschleiß unterliegt.

## Kommentar des Autors

Viele sehen Fluorwaxse als unabdingbar an, um beste Gleiteigenschaften zu erzielen. Doch auch wenn hier theoretische Ansätze zur Erklärung der überlegenen Eigenschaften vorgebracht wurden, konnten diese praktisch in über 500 selbst durchgeführten Gleitexperimenten auf eigens erzeugten Eis- und Schneoberflächen nicht eindeutig nachge-

wiesen werden. Sehr gute Wettkampfergebnisse könnten ebenfalls auf psychologische Aspekte, wie bspw. den Placebo-Effekt zurückgeführt werden [7].

Wer dennoch von den tribologischen Vorteilen von Fluorwachsen überzeugt ist, sollte sich besonders den Punkt des starken Abriebs nochmals vor Augen führen. Nicht nur wird hierdurch die reibungsreduzierende Wirkung auf sehr kurze Distanzen begrenzt, es wird auch der vollständige Abtrag des umwelt- sowie gesundheitsschädlichen Fluoradditivs akzeptiert. Noch ist das Ausmaß der Auswirkungen nicht vollständig bekannt und umfassende Untersuchungen auf nur wenige PFAS beschränkt. Wer sich selbst und die Umwelt also nicht weiter gefährden möchte, der sollte Vorsicht, statt Nachsicht walten lassen.

Aus Sicht des Autors wird die tribologische Wirksamkeit von Fluorwachsen überschätzt. Wer diese also in Zukunft entgegen des Verbotes einsetzen möchte, sollte sich die Frage stellen, ob die persönlichen Vorteile die für die Allgemeinheit wirksamen Nachteile tatsächlich überwiegen.

## Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an Dr. Thomas Muesmann für seine fachlich sehr fundierten Hinweise!

## Über den Autor



Marcel Münch ist Doktorand am Institut für Angewandte Materialien-Werkstoffkunde (IAM-WK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Er ist seit seiner frühen Jugend leidenschaftlicher Ski- und Snowboardfahrer. Im Rahmen seiner Masterarbeit am MikroTribologie Centrum (µTC) beschäftigte sich Marcel intensiv mit den tribologischen und optischen Eigenschaften von Fluorwachsen.

## Quellen

- [1] Marcel Münch. Den tribologischen Vorteilen von Fluorwachsen auf der Spur, Teil 1. *Gliding*, 7(5):37–43, 2022.
- [2] J. LIESIVUORI, H. KIVIRANTA, J. LAITINEN, A. HESSO, M. HÄMEILÄ, J. TORNAEUS, P. PFÄFFLI, and H. SAVOLAINEN. AIRBORNE AEROSOLS IN APPLICATION OF POLYFLUORO POLYMER-BASED SKI WAXES. *The Annals of Occupational Hygiene*, 38(6):931–937, 1994.

- [3] Kaarle Hämeri, Pasi Aalto, Markku Kulmala, Esko Sammaljärvi, Erik Spring, and Pekka Pihkala. Formation of respirable particles during ski waxing. *Journal of Aerosol Science*, 27(2):339–344, 1996.
- [4] Theran P. Riedel, M. Ariel Geer Wallace, Erin P. Shields, Jeffrey V. Ryan, Chun Wai Lee, and William P. Linak. Low temperature thermal treatment of gas-phase fluorotelomer alcohols by calcium oxide. *Chemosphere*, 272:129859, 2021.
- [5] Isabelle Rogowski, Didier Leonard, Jean-Yves Gauthier, and Pierre Lanteri. Influence of fluorine-based additive content on the physical and physicochemical properties of ski gliding wax. *Cold Regions Science and Technology*, 49(2):145–150, 2007.
- [6] Merle M. Plassmann and Urs Berger. Perfluoroalkyl carboxylic acids with up to 22 carbon atoms in snow and soil samples from a ski area. *Chemosphere*, 91(6):832–837, May 2013.
- [7] Bojan Blumenstein, Frank Eirik Abrahamsen, and Thomas Losnegard. Placebo and nocebo in sports: Potential effects of hypothetical differences in roll resistance on roller ski performance. *TRANSLATIONAL SPORTS MEDICINE*, 4(3):401–408, 2021.