

Für ein DNA-Polymer aus 242 Basenpaaren ermitteln die Autoren auf der Basis der Daten der Moa-Fossilien eine Halbwertszeit von 521 Jahren, was eine Nukleotid-Zerfallsrate von $5,5 \times 10^{-6}$ pro Jahr entspricht. Bei den entsprechenden geologischen Lagerungsbedingungen mit einer Temperatur von 13,1 °C ist diese Rate damit fast 400 mal langsamer als eine vergleichbare im Labor bestimmte Geschwindigkeit für Depurinierung (Abspaltung der Purin-Heterocyclen aus DNA-Molekülen) bei pH 5. Die Autoren diskutieren diese Diskrepanz und unterbreiten Vorschläge, wie der Unterschied zwischen den Zerfallsgeschwindigkeiten verringert werden könnte. Die Bedingungen im Labor sind im Vergleich zu den Gegebenheiten während der Fossilisation und Lagerungen sehr viel besser zu bestimmen und zu kontrollieren. Die Annahmen über die physikalisch-chemischen Randbedingungen und deren Änderungen während langer Zeiten sind dagegen mit großen Unsicherheiten behaftet.

ALLENTOFT et al. (2012) ziehen aus den kinetischen Daten ihrer Untersuchung an den Moa-Fossilien den Schluss, dass in Proben aus tiefgekühlten Lagerstätten auch nach mehr als einer Million Jahren noch sequenzierbare DNA-Fragmente vorhanden sein könnten.

Das von ORLANDO et al. (2013) vorgelegte fossile Pferdegenom passt in diesen von ALLENTOFT et al. (2012) aufgespannten Zeitrahmen (s. MILLAR & LAMBERT 2013). Die oben genannte

Feststellung, dass ein Verständnis der zugrundeliegenden chemischen Prozesse noch aussteht, ist durch weitere Genomdaten aus fossilen Proben nicht einfach vom Tisch zu wischen. Die verfügbaren sehr leistungsfähigen Methoden zur DNA-Sequenzierung lassen zukünftig weitere Untersuchungen dieser Art erwarten, die auch Hinweise liefern könnten zur Lösung der derzeitigen Diskrepanz zwischen chemischer Stabilität von DNA im Labor und wachsender Datenmenge zu Genomsequenzen aus alten Fossilien.

Für ein mechanistisches Verständnis der für die Erhaltung von Biomakromolekülen notwendigen Prozesse sind intensivere Bemühungen notwendig, vergleichbare Abläufe unter Laborbedingungen zu simulieren. Ob sie dazu führen, die Diskrepanz zwischen bisher bekannten Erfahrungen aus dem Labor und den Untersuchungen an Fossilien zu verringern, bleibt abzuwarten.

Literatur

- ALLENTOFT ME, COLLINS M, HARKER D, HAILE J, OSKAM CL, HALE ML, CAMPOS PF, SAMANIENGO JA, GILBERT MTP, WILLERSLEV E, ZHANG G, SCOFIELD RP, HOLDAWAY RN & BUNCE M (2013) The half-life of DNA in bone: measuring decay kinetics in 158 dated fossils. *Proc. R. Soc. B* doi:10.1098/rspb.2012.1745
- MILLAR CD & LAMBERT DM (2013) Towards a million year-old genome. *Nature* doi: 10.1038/nature12263
- ORLANDO L et al. (2013) Recalibrating *Equus* evolution using the genome sequence of an early Middle Pleistocene horse. *Nature* doi: 10.1038/nature12323

Das Sporangien-Katapult – ein miniaturisierter Schleudermechanismus

Die im Pflanzenreich als relativ ursprünglich geltenden Farne besitzen einen sehr effizienten, biomechanischen Verbreitungsmechanismus für ihre Sporen. Neuere Untersuchungen eröffnen einen detaillierten Einblick in eine ausgeklügelte Sporangien-Schleuder, gegen die mittelalterliche Steinschleudern ausgesprochen primitiv sind.

Winfried Borlinghaus

Die meisten Farne besitzen auf ihrer Blattunterseite deutlich erkennbare bräunliche Flecken (Sori), die sicher jedem aufmerksamen Naturbeobachter schon aufgefallen sind (Abb. 1, 2). Sie können sehr unterschiedliche Formen aufweisen. Bei dem in Deutschland verbreiteten Tüpfelfarn (*Polypodium vulgare*) sind es kreisrunde „Tüpfel“. Betrachtet man diese genauer, erkennt man bei entsprechender Vergrößerung, dass sie aus unzähligen Sporenbehältern bestehen. Diese als Sporangien bezeichneten

Miniatur-Behälter enthalten die der ungeschlechtlichen Fortpflanzung dienenden Sporen der Farne.

Das einzelne Sporangium entpuppt sich unter dem Mikroskop als ausgefeilte Schleudervorrichtung – ein regelrechtes Miniatur-Katapult! Die ausgeklügelte Mechanik sorgt dafür, dass die Sporen des Farns mit hoher Geschwindigkeit weggeschleudert werden. Die Schleuderkraft des miniaturisierten Katapultes bewirkt gemeinsam mit dem Wind eine effiziente Verbreitung der



Abb. 1 Tüpfelfarn mit runden Sporangienhaufen im Gegenlicht.
(Foto: W. BORLINGHAUS)

Sporen, die wiederum die Vermehrung der Pflanze ermöglichen.

Die Details dieser Einrichtung sind an Genialität kaum zu überbieten und wurden anhand des Goldtüpfelfarns (*Phlebodium aureum*) u. a. von Xavier NOBLIN und seinen Kollegen von der französischen Forschungsorganisation CNRS (*Centre National de la Recherche Scientifique*) genauer untersucht (NOBLIN et al. 2012).

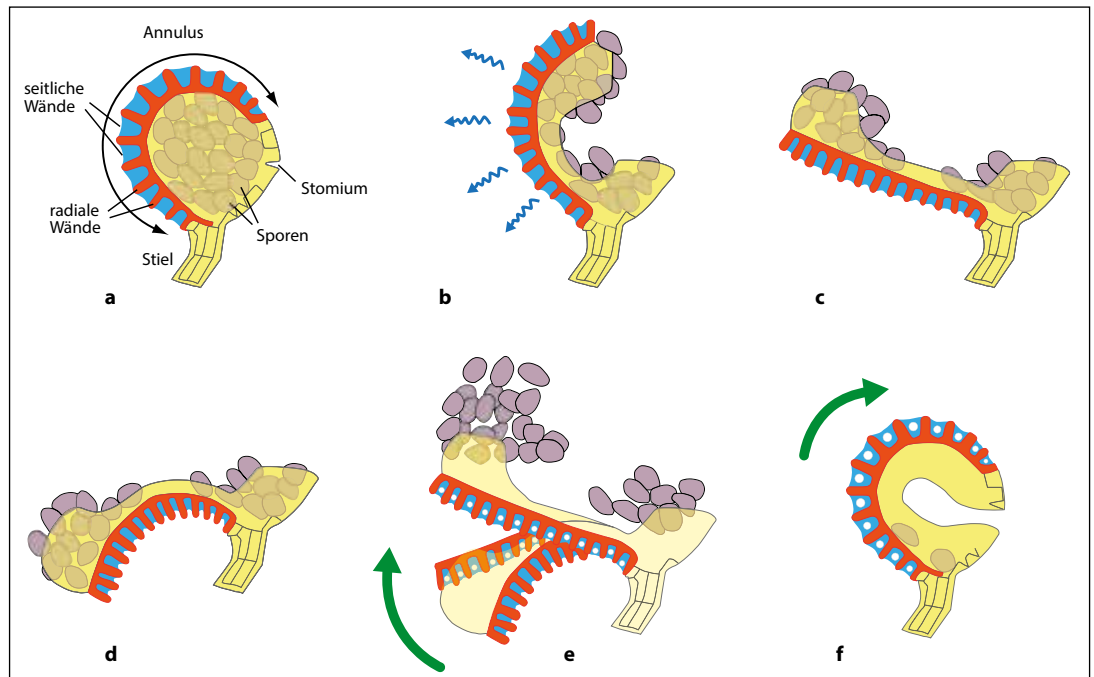
Die Sporen befinden sich in einer geschlossenen Kapsel, die von einem zunächst stark nach innen, um die Kapsel gekrümmten Zellenstrang, dem Anulus (oder Annulus), umgeben sind (Abb. 3a). Die Zellen dieses Strangs sind speziell konstruiert. Sie besitzen relativ starre und feste Zellwände. Eine Ausnahme bildet die äußere, von der Sporenkammer abgewandte, Zellwand. Sie ist vergleichsweise dünn und durchlässig gestaltet. Bei entsprechenden klimatischen Bedingungen nach der Reife der Sporen kann durch Verdunstung das Wasser im Inneren der Anuluszellen recht schnell entweichen. Dabei baut sich im Zellinneren kurzfristig ein starker Unterdruck auf. Gleichzeitig verdunstet Wasser in der Sporenkammer. Diese reißt auf und die Sporen liegen wie in einer hohlen Hand frei, ohne dass sie herausfallen können (Abb. 3b-d). Gleichzeitig falten sich bei zunehmendem Unterdruck in den Anuluszellen die dünnen Außenwände ein. Die starken Zelltrennwände werden dadurch an den äußeren Enden zusammengezogen. In der Folge biegt sich der gesamte Anulusstrang, der aus 12 bis 13 solcher Zellen besteht, wie eine gespannte Feder zurück. Dies geschieht, bis der Unterdruck bei ca. -9 MPa einen kritischen Punkt erreicht,

bei dem es zu dramatischen Kavitationseffekten kommt.¹ Dadurch bilden sich in Sekundenbruchteilen Gasbläschen in den Zellen, die zu einem schlagartigen Volumenzuwachs führen. Im Ergebnis schnellt der Anulusstrang innerhalb von etwa 10 Mikrosekunden mit enormer

Abb. 2 Geöffnete Sporangienhaufen (Sori) auf der Unterseite eines Wedels des Wurmfarne (*Dryopteris filix-mas*). (Foto: R. JUNKER)



Abb. 3 Verschiedene Stadien des Katapultmechanismus beim Farnsporangium. Erläuterungen im Text. Unter <http://www.youtube.com/watch?v=mDIHGrINPE> wird der Katapultmechanismus auch mit bewegten Bildern gezeigt. (Nach einem Poster von C. LLORENS, M. ARGENTINA, J. DUMAIS & X. NOBLIN; <http://tinyurl.com/lezho3n>)



Geschwindigkeit zurück in Richtung seiner ursprünglichen Position (Abb. 3e und f).

Als echtes Katapult benötigt die Vorrichtung nun noch einen Stopper. Dieser muss verhindern, dass die offene Sporenkapsel quasi an der Befestigungsstelle des Annullustranges aufschlägt und somit die Schleuderwirkung sinnlos verpuffen würde. Bei mittelalterlichen Katapulten wurde dieser Stopper in Form eines starken, gepolsterten Querbalkens eingebaut, gegen den der Hebelarm des Katapultes nach Entspannung des

Mit nur wenigen Pflanzenzellen wird ein perfektes Miniatur-Katapult verwirklicht, dessen Details an Genialität kaum zu überbieten sind.

Federmechanismus prallte. Der Hebelarm wurde abrupt gestoppt und die Kugel, bedingt durch ihre Massenträgheit, in einem optimalen Winkel weggeschleudert. Beim Sporangien-Katapult werden hierbei immerhin Geschwindigkeiten von 10 m/s erreicht! Der notwendige Stoppmechanismus ist dabei erstaunlicherweise gleich in den Hebelarm des Annullus integriert, so dass kein zusätzliches Bauteil benötigt wird. Beim Zurückschnellen kann das durch die Kavitationsbläschen verdrängte Wasser nicht schnell genug aus den umliegenden Zellwänden ergänzt werden. Durch diese „Hydraulikbremse“ wird der zurückschnellende Annullus-Hebelarm stark abgestoppt, bis der Wasservolumenausgleich innerhalb von ca. einer halben Sekunde erfolgt ist und sich der Annullus zu ca. 85 % wieder schließt (Abb. 3f).

Insgesamt ist mit nur wenigen Pflanzenzellen ein perfektes Katapult verwirklicht und der Gedanke liegt sehr nahe, dass solche Genialität nicht alleine durch Selbstorganisationsmechanismen

erklärt werden kann. Man kann hier durchaus Ernst KULLMANN und Horst STERN (1981, S. 242) beipflichten, die vor etlichen Jahren angesichts vergleichbar fantastischer Einblicke in die Spinnenbiologie bemerkten: „Es sind noch am ehesten Maschinen wie das Elektronenmikroskop, die einen verengten Spezialisten wieder transzendieren lassen. (...) Fabre jedenfalls, da bin ich sicher, hätte in solchen Bildern Gott nicht mehr gesucht. Er hätte ihn gesehen.“ Was spricht angesichts solcher Entdeckungen wie beim Sporangien-Katapult dagegen, eine solche Schlussfolgerung selbst zu ziehen, wie sie der im Zitat erwähnte französische Insektenkundler Jean-Henri FABRE, ein evolutionskritischer Zeitgenosse von Charles DARWIN, gezogen hat?

Anmerkung

¹ http://www.pro-physik.de/details/news/1113287/Kuenstlicher_Baum_laesst_die_Saeften_schiessen.html. Unter einem Kavitationseffekt versteht man das Wechselspiel plötzlicher Verdampfung und Kondensation von Flüssigkeiten bei einem kritischen Unterdruck. Hierbei bilden sich im Wasser entsprechende Wasserdampfblasen. Kurzzeitig können dabei, insbesondere beim Kollaps einer Kavitationsblase, erhebliche Drücke und Temperaturen auftreten, die bei technischen Geräten sogar Schäden an Metallteilen verursachen können.

Quellen

KULLMANN E & STERN H (1981) Leben am seidenen Faden. Kindler.
NOBLIN X, ROJAS NO, WESTBROOK J, LLORENS C, ARGENTINA M & DUMAIS J (2012) The fern sporangium: a unique catapult. *Science* 335, 1322.
POLLMANN M (2012) Sporenkatapult des Farns ergründet <http://www.spektrum.de/alias/biophysik/sporenkatapult-des-farns-ergruendet/1145522>