

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 145 (1994)
Heft: 3

Artikel: Einfluss von Mikrowellen auf Fichten und Buchen
Autor: Schmutz, Paul / Siegenthaler, Jürg / Bucher, Jürg B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-766586>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Einfluss von Mikrowellen auf Fichten und Buchen

Von Paul Schmutz, Jürg Siegenthaler, Jürg B. Bucher, David Tarjan und Christian Stäger

FDK 111.216: 181.26: 426

Einleitung

In den letzten Jahrzehnten erlebten wir einen gewaltigen Ausbau der Kommunikationstechnik. Die Verbreitung von Radar, Rundfunk, Fernsehen, Richtstrahl-, Satellitenverbindungen usw. führte zu einer drastischen Zunahme der nichtionisierenden Strahlungen in der Umwelt. Dazu gehören die Radiowellen mit Frequenzen bis zu 1 GHz und die Mikrowellen mit 1 bis 300 GHz (Wellenlängen von 30 cm bis 1 mm).

Als in den 80er Jahren in Mitteleuropa die Diskussion über das «Waldsterben» begann, wurde verschiedentlich postuliert, die Waldschäden seien auf den zunehmenden «Elektrosmog» zurückzuführen (zum Beispiel Volkrodt, 1987; Hommel, 1985). Auch in den Massenmedien erschienen bis in die jüngste Zeit dramatische Berichte über durch Mikrowellen verursachte Waldschäden (Hertel, 1991).

Volkrodt (1987) stellt die Hypothese auf, dass Blätter und benadelte Zweige als Empfänger natürlicher elektromagnetischer Wellen im cm-Bereich wirken. Da die künstlich erzeugten Mikrowellen heute vielerorts um ein Vielfaches stärker sind als der natürliche Hintergrund, könnten die pflanzlichen «Empfangssysteme» übersteuert werden und Schäden entstehen.

Bisher wurden nur wenige experimentelle Studien zur Wirkung von Mikro- und Radiowellen auf Pflanzen durchgeführt (Reviews: Basler & Hofmann, 1985; Diprose et al., 1984). Die dabei aufgetretenen Effekte werden häufig als thermisch bezeichnet, wenn die eingestrahlte Leistungsdichte mindestens einige mW/cm^2 beträgt und somit eine Erwärmung der biologischen Materie zu erwarten ist. Liegt die Leistungsdichte wesentlich tiefer, so spricht man oft von nichtthermischen Effekten. Diese sind allerdings umstritten.

Die Empfindlichkeit von Pflanzen gegenüber Mikrowellen ist sehr verschieden und hängt unter anderem vom Wassergehalt ab. Jonas (1983) setzte Maiskeimlinge kurzen Mikrowellen-Impulsen (0,6 sec.) von 2,45 GHz und 72 W/cm^2 aus. Die meisten Keimlinge überlebten mehrere dieser starken Impulse, wenn auch mit Nekrosen. Hingegen konnte Krug (1990) durch

gepulste Strahlung von nur $9 \cdot 10^{-4} \text{ mW/cm}^2$ (8–9 GHz, bis zu 10 min.) die Keimung von Fichten- und Föhrenpollen hemmen. *Kremer et al.* (1985) setzten die Spitzen wachsender Kressewurzeln Mikrowellen von 42–58 GHz aus. 2 mW/cm^2 genügten, um das Streckungswachstum der Wurzeln nach einigen Sekunden stark zu reduzieren. Da nur eine Erwärmung um $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen wurde und konventionelles Aufwärmen keinen Einfluss hatte, schien der Effekt nichtthermisch zu sein. Die gleiche Wirkung konnte jedoch durch selektives Erwärmen der Wurzelspitze durch Infrarot-Bestrahlung erreicht werden. Daraus schlossen die Autoren, dass die Mikrowellen durch Erzeugung eines Temperaturgradienten zwischen Wurzelspitze und Nachbargewebe das Wachstum hemmten.

Im Zusammenhang mit dem «Waldsterben» stellte sich auch in der Schweiz die Frage nach der Gefährdung des Waldes durch Sendeanlagen. Die PTT führten deshalb zusammen mit forstwissenschaftlichen Fachstellen beim UKW- und TV-Sender Bantiger (Frequenzbereich 50–800 MHz) zwei Fallstudien durch (*Joos et al.*, 1988; Joos 1989). Im Umkreis des Senders wurden Standorte verglichen, die sich nur durch die Leistungsdichte der einfallenden Radiowellen unterschieden (etwa $3 \cdot 10^{-6}$ vs. etwa 10^{-8} mW/cm^2). Die Bäume auf den «stark belasteten» Parzellen unterschieden sich von denen auf «schwach belasteten» weder durch die Kronenverlichtung (Infrarot-Luftbilder) noch durch den Zuwachs (Jahrringanalyse). In Ergänzung dazu verglich *Stäger* (1989) ein Waldgebiet beim Richtfunksender-Standort Mt. Gibloux (2, 6 und 11 GHz; etwa 10^{-5} mW/cm^2) mit einem entfernteren Vergleichsgebiet (etwa 10^{-12} mW/cm^2). Trotz der um 7 Zehnerpotenzen verschiedenen Mikrowellen-Belastung zeigten sich zwischen den zwei Standorten keine Unterschiede in der Kronenverlichtung.

Als Ergänzung zu diesen Untersuchungen regten die PTT an, Bäume in einer interdisziplinären Arbeit langfristig mit Mikrowellen hoher Leistungsdichte zu bestrahlen. Daraus entstand die vorliegende Fallstudie, die zum Ziel hat, die Wirkung von Mikrowellen auf junge Fichten und Buchen über einen breiten Intensitätsbereich zu untersuchen. Die Bedingungen wurden so gewählt, dass ein Teil der Bäume einer so hohen Leistungsdichte ausgesetzt waren, dass man thermische Effekte erwarten konnte. Die Wirkung der Exposition wurde auf möglichst breiter Basis erfasst.

Materialien und Methoden

Versuchsanordnung

Die vorliegende Studie diente dazu, an einem Fallbeispiel die Wirkung von Mikrowellen auf junge Buchen und Fichten zu untersuchen. Der Versuch

wurde im Garten der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf bei Zürich angelegt (*Abbildung 1*). Die wichtigsten Daten über das Gelände können aus *Abbildung 2* entnommen werden. Die Versuchsbäume wurden auf drei quadratische Felder (A, B und C) ausgepflanzt, die durch Freiflächen voneinander getrennt waren. Das Feld C wurde durch einen rund 2,5 m hohen Maschenzaun (Maschenweite etwa 5 cm) von der Mikrowellen-Quelle abgetrennt, um es vor Streustrahlung abzuschirmen (Faraday-Gitter). Das Gelände ist leicht nach Westen hin geneigt.

Als Versuchsobjekte wurden Sämlinge von Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*) verwendet. Die Fichten wurden 1984, die Buchen 1985 in einer Baumschule im Schweizerischen Mittelland nachgezogen. Im Frühjahr 1988 wurden insgesamt 405 Sämlinge in das Versuchsgelände umgesetzt. Fichten und Buchen wurden alternierend in einem Schachbrettmuster angeordnet.

Ende Mai 1988 begann die Mikrowellen-Bestrahlung. Die Mikrowellen wurden von einem Magnetron-Sender erzeugt und durch eine Hornantenne gerichtet ausgestrahlt. Die Frequenz betrug 2,45 GHz, was einer Wellenlänge von 12,2 cm im Vakuum entspricht. Das elektrische Feld war horizontal, das magnetische vertikal polarisiert. Die Trägerwelle hatte eine unbeabsichtigte Modulation von 50 Hz und Vielfachen davon bis zu einigen kHz. Die Sende-

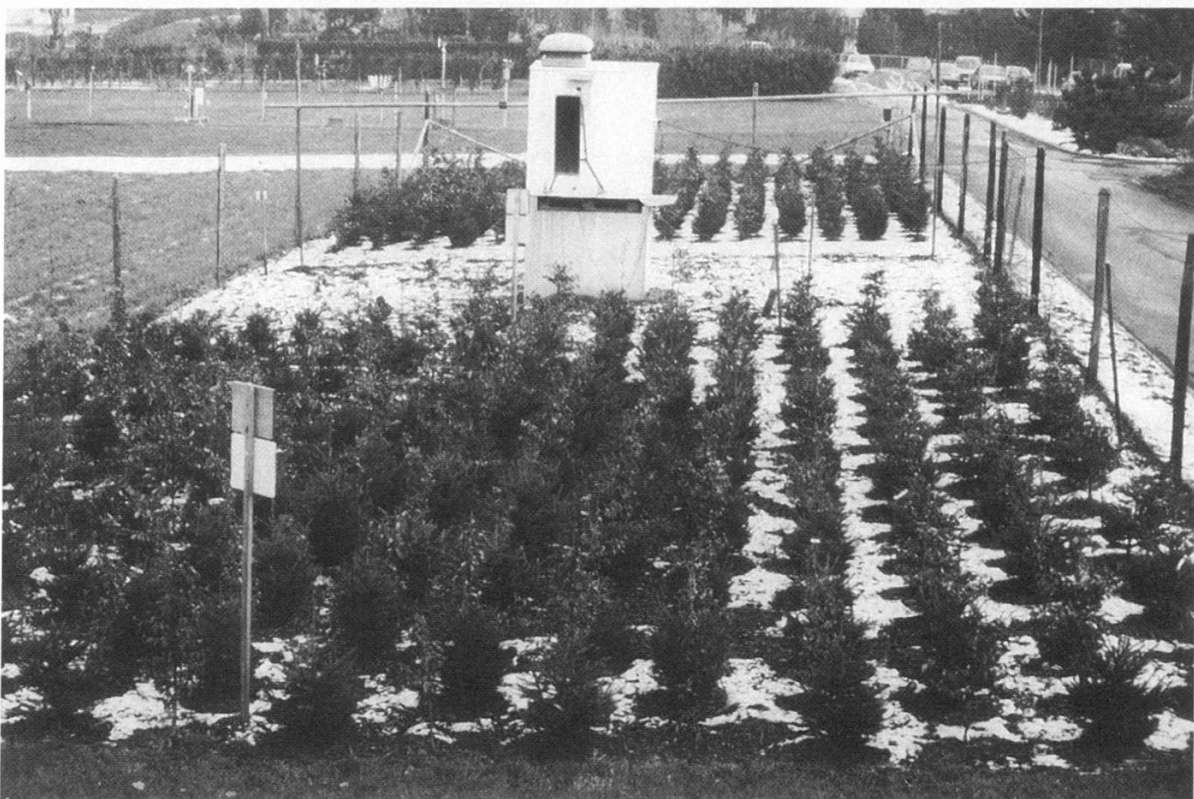


Abbildung 1. Blick auf einen Teil der Mikrowellen-Bestrahlungsanlage. Der Hornsender ist direkt zum Betrachter hin gerichtet. In der Zone höchster Leistungsdichte im Feld A (Vordergrund) ist die Schneedecke weggeschmolzen, was auf Erwärmung durch die Mikrowellen schliessen lässt. Die Aufnahme stammt aus dem ersten Jahr der Exposition.

leistung wurde während der gesamten Versuchsdauer auf 600 W konstant gehalten, was in den bestrahlten Feldern zu Leistungsdichten von 0,01 bis 30 mW/cm² führte (1 m über Boden). Im abgeschirmten C-Feld hinter dem Sender lag der Mittelwert der Leistungsdichte bei etwa $7 \cdot 10^{-4}$ mW/cm² und überstieg nirgends 10⁻³ mW/cm² (Abbildung 2). Die Leistungsdichte wurde bei Versuchsbeginn bei jedem Baum mit einem Leistungsdichte-Messgerät gemessen (1 m über Boden) und später periodisch überprüft. Die Bestrahlung lief permanent über 3½ Jahre, mit Ausnahme unterhaltsbedingter Unterbrüche, die zusammen etwa 4,5 % der Versuchsdauer ausmachten.

Messung der exponentiellen Mitteltemperatur

Die Methode beruht auf der temperaturabhängigen langsamen Hydrolyse von Saccharose in Lösung zu Glucose und Fructose (Invertzucker-Methode; Pallmann et al., 1940).

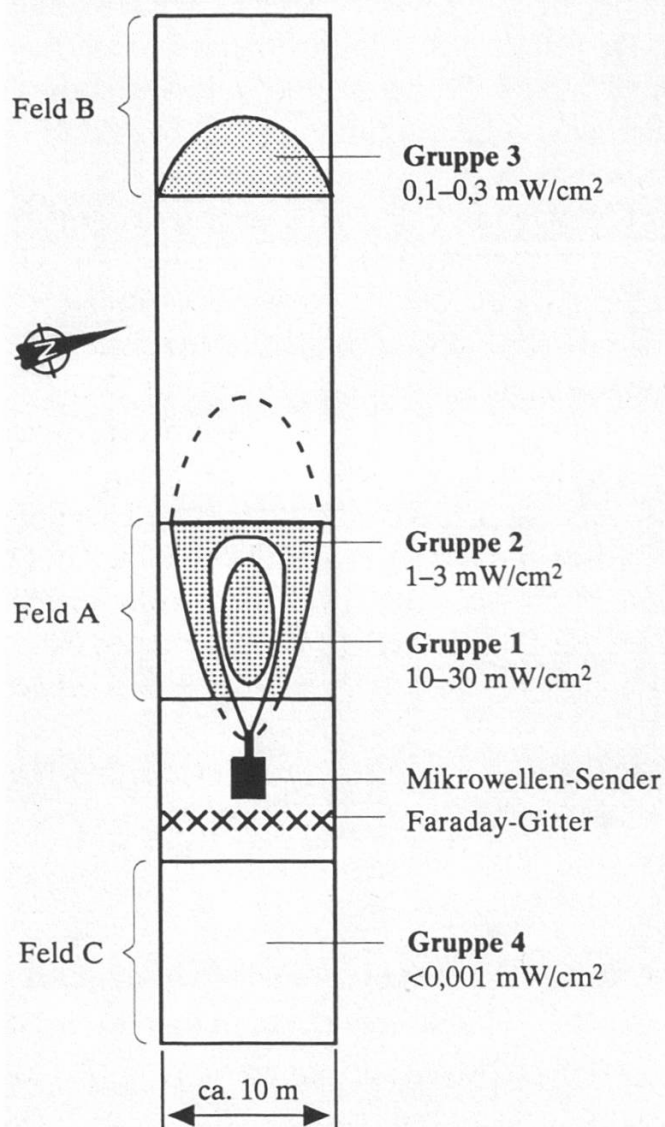


Abbildung 2. Situationsplan der Mikrowellen-Bestrahlungsanlage. Die Felder A, B und C wurden mit Fichten und Buchen bepflanzt.

In unserem Versuch wurden 78 Ampullen mit je 16 ml Saccharose-Lösung an verschiedenen Orten in der Versuchsanlage in 1 m Höhe an Holzleisten aufgehängt. An jedem Expositionsort wurde vorgängig die Leistungsdichte bestimmt. Nach 35 Tagen Exposition wurde das Ausmass der Hydrolyse bestimmt. Die daraus berechnete Temperatur ist nicht das arithmetische, sondern das exponentielle Mittel über die Expositionsperiode. Dies bedeutet, dass Perioden hoher Temperatur stärker gewichtet werden als solche tiefer Temperatur.

Untersuchungen an den Bäumen

Einige einfache Untersuchungen wurden an allen Versuchsbäumen durchgeführt (visuelle Bonitierung, Austrieb und Längenwachstum). Für alle anderen Untersuchungen wurden vier deutlich verschiedene Belastungsgruppen gebildet (*Abbildung 2*) :

Gruppe 1 : 10–30 mW/cm² (in Feld A)

Gruppe 2 : 1–3 mW/cm² (in Feld A)

Gruppe 3 : 0,1–0,3 mW/cm² (in Feld B)

Gruppe 4 : < 0,001 mW/cm² (in Feld C)

Um Randeffekte zu vermeiden, wurden die Bäume der zwei äussersten Reihen und Kolonnen nicht in die Gruppen integriert. Aus den so definierten vier Belastungsgruppen wurden für die Untersuchungen je 10 Buchen und je 10 Fichten zufällig ausgewählt. Dabei wurde das von *Sachs* (1974) beschriebene Verfahren mit Zufallszahlen-Tafeln angewandt. Die Daten wurden mit Varianzanalyse (STATGRAPHICS) statistisch ausgewertet. Als Kriterium für einen signifikanten Unterschied wurde ein Signifikanzniveau von 0,05 festgelegt.

Bei der visuellen Bonitierung wurden an allen Bäumen folgende Erscheinungen erfasst: Chlorosen und Nekrosen von Blättern und Nadeln, kahle Stellen, Wipfeldürre, Tod des Baumes und Insektenbefall. Die Bonitierung wurde an Buche insgesamt 8mal, an Fichte 10mal durchgeführt. An allen Bäumen wurde jedes Frühjahr der Austriebstermin nach der Methode von *Volkert* und *Schnelle* (1966) bestimmt.

Für die Bestimmung der Benadelungsdichte bei den Fichten wurden die Äste des drittobersten Wirtels am Ende der Exposition geerntet. Die Triebe wurden nach Jahrgängen aufgeteilt und getrocknet (6 Tage bei 65° C). Am getrockneten Material wurde das Trockengewichtsverhältnis Nadeln : Zweige und das Trockengewicht der Nadeln pro Zweiglänge bestimmt.

Am Beginn (Frühjahr 1988) und Ende (Herbst 1991) der Exposition wurde die Höhe der Bäume gemessen.

Von den 40 ausgewählten Buchen wurde jeweils im Sommer je ein Blatt entnommen. Es wurde darauf geachtet, dass die Blätter von ähnlichen

Positionen am Baum stammten. Von jedem Blatt wurde eine Scheibe von 1,3 cm Durchmesser für die Messung der Chlorophyll-Fluoreszenz ausgestanzt (siehe *Strasser et al.*, 1987). 1990 (2jährige Exposition) wurde an den Blattscheiben auch der Chlorophyllgehalt nach *Lichtenthaler* und *Wellburn* (1983) bestimmt. An den gleichen Blättern wurde die Blattfläche gemessen. (Leaf Area Meter von Delta T Devices). Dann wurden die Blattunterseiten mit farblosem Nagellack bestrichen, der nach dem Eintrocknen abgezogen wurde. An diesen Abzügen wurde unter dem Lichtmikroskop mit Hilfe eines graduieren Okulars die Stomatadichte bestimmt.

Zur Bestimmung der Elementgehalte wurden von den Buchen im Sommer von Zweigen gleicher Exposition je 15 bis 20 Blätter geerntet. Von den Fichten wurden im Spätherbst Zweige gleicher Exposition geerntet. An den getrockneten und gemahlenen Blättern und Nadeln wurde pro Baum eine einfache Elementbestimmung (ICP–AES, Trockenveraschung bei 480° C) sowie eine doppelte C/N-Analyse (Carlo Erba NA 1500) durchgeführt. Bei der Aufbereitung geht ein Teil des organisch gebundenen Schwefels verloren. Erfahrungsgemäss liegen die Schwefel-Werte um rund 30 % tiefer als mit anderen Verfahren. Die Konzentrationen der Elemente wurden auf das Trockengewicht bezogen.

Am 11. Februar 1991 wurden Fichtennadeln von Zweigen gleicher räumlicher Ausrichtung geerntet. Mittels HPLC (High Performance Liquid Chromatography) wurden die winterlichen Konzentrationen von Kohlehydraten (Zucker und Cyclite) bestimmt (*Landolt und Krause-Lüthy*, 1989) und auf das Frischgewicht bezogen.

Resultate

Temperaturerhöhung durch Mikrowellen

Es erwies sich als unmöglich, die Temperatur von Pflanzenteilen direkt zu bestimmen. Thermoelemente wurden durch die Mikrowellen gestört, und Infrarot-Messgeräte erbrachten wegen der grossen zeitlichen und räumlichen Streuung der Temperatur im Feld kein Resultat. Hingegen wurde mit der Invertzucker-Methode eine deutliche Erwärmung der Lösungen durch Mikrowellen mit einer Leistungsdichte von mehr als 5 mW/cm² nachgewiesen (*Abbildung 3*). Im mit 10 bis 30 mW/cm² bestrahlten Bereich betrug sie +1,5 bis +4 °C (Regressionsgerade: $T = 11,1 + 0,15 \cdot P$, wobei T = Exponentialtemperatur und P = Mikrowellen-Leistungsdichte in mW/cm²; Korrelationskoeffizient = 0,907). Diese Resultate lassen sich nicht direkt auf die Bäume übertragen. Sie machen es jedoch sehr wahrscheinlich, dass bei einer

Leistungsdichte von über 5 mW/cm^2 auch die Bäume eine deutliche Erwärmung erfuhren.

Visuelle Bonitierung und Austrieb

Im Sommer 1988 traten an vielen Bäumen Chlorosen auf, gelegentlich auch Wipfeldürre an Fichte. Die Symptome waren – ungeachtet der unterschiedlichen Mikrowellen-Belastung – in allen Feldern ungefähr gleich verbreitet und können durch einen Pflanzschock erklärt werden. In den folgenden Vegetationsperioden traten nur noch vereinzelt Chlorosen auf. Es wurde keine Häufung von Symptomen bei bestimmten Belastungsstufen gefunden. Da die Daten auf Schätzungen beruhen, wurde auf eine quantitative Auswertung verzichtet. Der gelegentlich an Buchen aufgetretene Wollaus-Befall im Frühsommer war nicht von der Leistungsdichte abhängig. Die vier Belastungsklassen zeigten keine signifikanten Unterschiede im Austriebstermin.

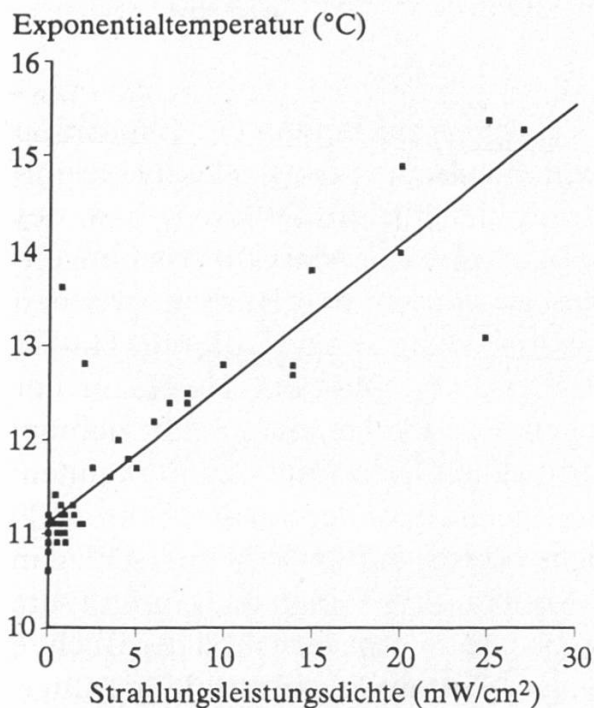


Abbildung 3. Exponentialtemperatur vs. MW-Leistungsdichte. Die Saccharose-Lösungen wurden vom 2. Oktober bis zum 6. November 1990 exponiert. Die ausgezogene Linie ist die Regressionsgerade.

Benadelungsdichte der Fichten

Nur bei den dies- und vorjährigen Nadeln war genügend Material für eine Analyse vorhanden. Die Mikrowellen-Belastung hatte weder auf das Trockengewichtsverhältnis Nadel/Zweig (*Tabelle 1*) noch auf das spezifische Nadelgewicht (*Abbildung 4*) einen Einfluss.

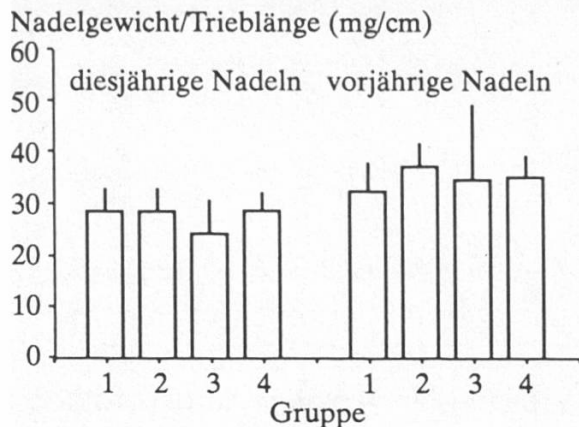


Abbildung 4. Spezifisches Nadelgewicht (Nadelgewicht pro Trieblänge) für Fichte. Die Balkenhöhe entspricht den Mittelwerten, die darauf gezeichnete Linie den Standardabweichungen für die Belastungsgruppen 1 bis 4 (1 = höchste, 4 = niedrigste Leistungsdichte; vergl. Text).

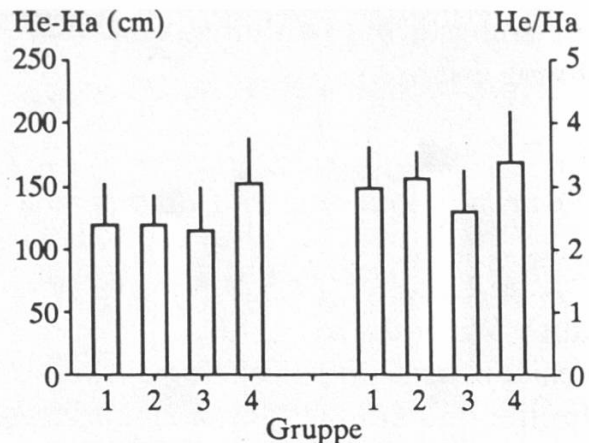


Abbildung 5. Längenzunahme während der Exposition bei Buche. Vergleich der Belastungsgruppen 1 bis 4. Dargestellt ist die Differenz (links) und der Quotient (rechts) von Anfangs- und Endlänge der Triebe.

Wachstumsparameter

Die Höhe der Buchen und Fichten war schon bei Beginn der Exposition (Ha) zwischen den vier Belastungsgruppen (alle Bäume der Kollektive) signifikant verschieden (*Tabelle 1*). Deshalb soll hier nur die Differenz bzw. der Quotient der Anfangs- und Endhöhen (Ha und He) als Mass für das Längenwachstum betrachtet werden. Beide Grössen sind bei den Buchen zwischen den vier Gruppen signifikant verschieden (*Abbildung 5*). Die Differenz Ha-He unterscheidet sich in der Gruppe 4 (höher), der Quotient He/Ha in der Gruppe 3 (tiefer) von den übrigen Gruppen. Es ist keine einfache Beziehung zwischen Längenwachstum und Mikrowellen-Belastung zu erkennen: Zwischen den Gruppen 1, 2 und 3 zum Beispiel ist trotz der um den Faktor 100 verschiedenen Mikrowellen-Leistungsdichte kein signifikanter Unterschied in He-Ha vorhanden. Wir sind daher der Ansicht, dass Geländefaktoren (zum Beispiel unterschiedliche Bodenmächtigkeit) das Wuchsverhalten der Buchen beeinflussten und allfällige Wirkungen der Mikrowellen-Bestrahlung überdeckten. Bei Fichte war He-Ha in der Gruppe 3 (0,1–0,3 mW/cm²) signifikant niedriger als in den anderen Gruppen (*Tabelle 1*; Daten für die 40 ausgewählten Bäume). Auch hier ist ein Einfluss des Geländes wahrscheinlich.

Blatt- und Nadelparameter

Die Chlorophyll-Fluoreszenz (Induktionskinetik) erlaubt Aussagen über die Funktionsfähigkeit des Photosynthese-Apparats. Dunkeladaptierte Blatt-

Tabelle 1. Messwerte (Mittelwerte über 10 Bäume/Gruppe).

Buche

		Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	P
Ha	(cm)	64	58	75	68	***
He	(cm)	185	179	191	220	***
Blattflächen	(cm ²)	23	20	17	18	n.s.
Stomatadichte	(cm ⁻²)	35900	32 700	35 100	35 600	n.s.
Chlorophyll	(µg/cm ²)	20,9	24,2	30,9	23,8	**
Chlorophyll-Fluoreszenz (2 Jahre)						
Rfd1		3,12	3,1	2,91	2,98	n.s.
Rfd2		1,69	1,64	1,61	1,64	n.s.
Ap		0,342	0,352	0,329	0,333	n.s.
Elementkonzentrationen (ppm des Trockengewichts)						
Calcium (1 Jahr)		15 500	15 800	18 600	20 100	**
Calcium (2 Jahre)		9900	11 700	13 900	14 800	**
Calcium (3 Jahre)		13 300	11 300	13 100	13 400	n.s.
Schwefel (1 Jahr)		700	719	746	787	***
Schwefel (2 Jahre)		555	591	689	781	**
Schwefel (3 Jahre)		660	642	697	728	n.s.
Phosphor (2 Jahre)		2070	1830	2030	1740	n.s.
Stickstoff (2 Jahre)		17 300	16 700	18 100	17 800	n.s.
Magnesium (2 Jahre)		2070	2000	2090	2560	n.s.
Kalium (2 Jahre)		5050	4930	4860	4540	n.s.

Fichte

		Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	
Ha	(cm)	40	38	40	45	*
He	(cm)	165	153	143	168	*
He-Ha	(cm)	124	114	103	123	*
He/Ha		4,13	4,02	3,63	3,74	n.s.
Trockengewicht (Nadeln)/Trockengewicht (Zweig)						
diesjährige Triebe		2,76	2,38	2,44	2,46	n.s.
letztjährige Triebe		0,96	1,06	1,49	0,95	n.s.
Trockengewicht (Nadeln)/Zweiglänge (mg/cm)						
diesjährige Triebe		28,6	28,6	24,1	28,5	n.s.
letztjährige Triebe		32,7	37,3	34,7	35,2	n.s.
Elementkonzentrationen (ppm des Trockengewichts)						
Calcium (2 Jahre)		13 600	13 400	13 300	12 300	n.s.
Schwefel (2 Jahre)		544	578	536	574	n.s.
Phosphor (2 Jahre)		1900	2000	1900	1800	n.s.
Phosphor (3 Jahre)		2360	2320	1990	2120	*
Stickstoff (2 Jahre)		15 800	15 200	15 700	15 900	n.s.
Stickstoff (3 Jahre)		16 000	15 000	11 000	15 000	***
Magnesium (2 Jahre)		790	810	770	780	n.s.
Kalium (2 Jahre)		5300	5600	4600	5700	*
Kalium (3 Jahre)		6510	6420	4930	6830	**
Zuckerkonzentrationen in Nadeln am 11. 2. 91 (mg/g Frischgewicht)						
Raffinose		12,2	12,5	13	13,2	n.s.
Saccharose		23,8	23,7	26,9	26,2	n.s.
Pinit		8,2	7,5	8,3	8,4	n.s.

Signifikanzen: *** P < 0,001

** P < 0,01

* P < 0,05

n.s. P > 0,05, nicht signifikant

Werte in Klammern: Expositionsdauer bis zum Zeitpunkt der Probenahme

segmente werden schlagartig starkem Licht ausgesetzt; dabei wird der zeitliche Verlauf der auftretenden Chlorophyll-Fluoreszenz bei zwei Wellenlängen gemessen. Bei unserem Versuch berechneten wir daraus drei Grössen: Die Vitalitätsindices bei 685 und 730 nm (Rfd1 und Rfd2) sind ein Mass für die photosynthetische Lichtnutzung. Der Adaptationsindex (Ap) zeigt an, wie gut sich das System wechselnden Lichtverhältnissen anpassen kann (Strasser *et al.*, 1987).

Die Messungen wurden nach 1, 2 und 3 Jahren Exposition im Sommer an Buche durchgeführt. In keinem der 3 Jahre wurden Unterschiede zwischen den Belastungsgruppen gefunden (Daten für 2 Jahre Exposition: *Tabelle 1*).

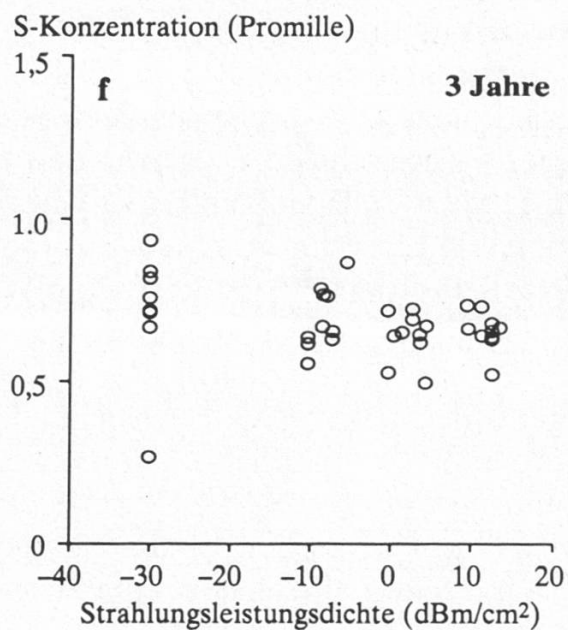
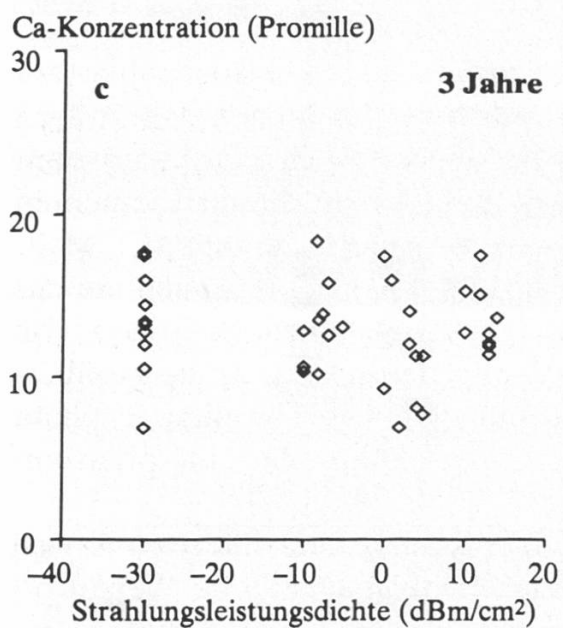
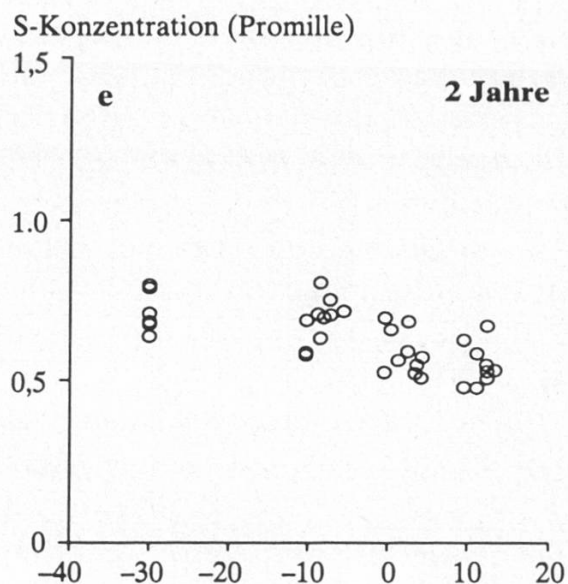
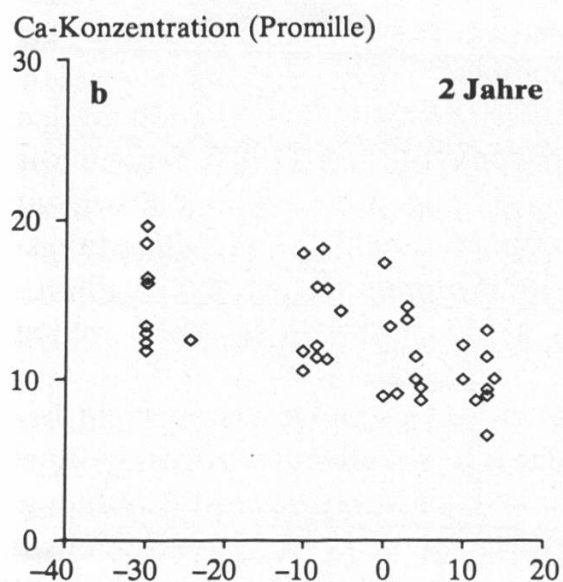
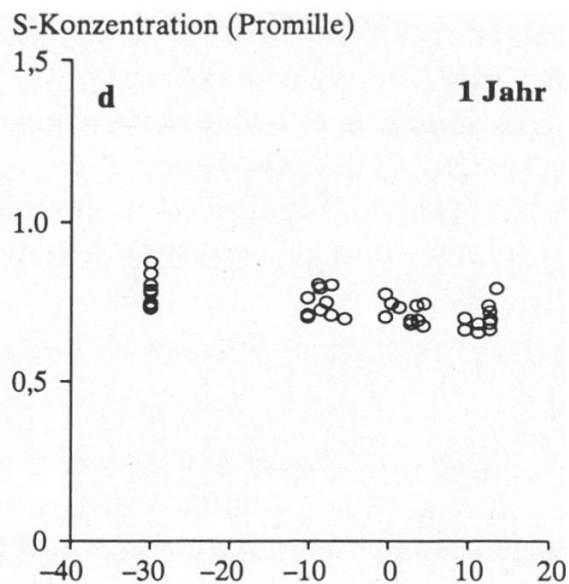
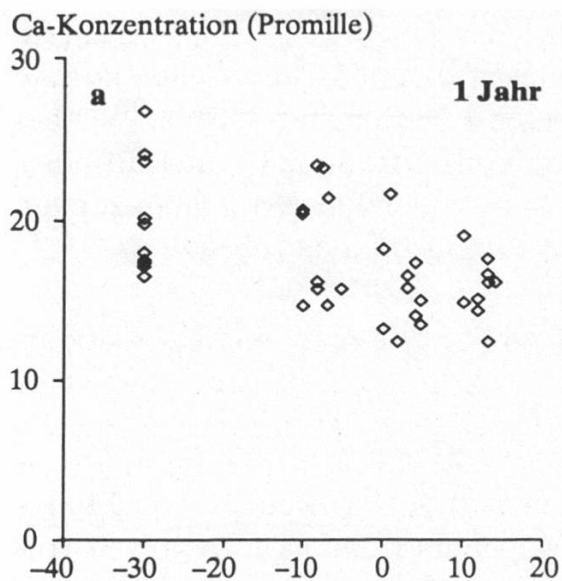
Die flächenspezifische Blattkonzentration an Chlorophyll a und b war in der Belastungsgruppe 3 (0,1–0,3 mW/cm²) signifikant höher als in den anderen Gruppen, die sich nicht voneinander unterschieden. Wie die Resultate der Chlorophyll-Fluoreszenz zeigten, wirkten sich diese Unterschiede jedoch nicht auf die Funktionsfähigkeit des Photosynthese-Apparats aus. Die Stomatadichten und die Flächen der untersuchten Blätter waren zwischen den vier Belastungsgruppen nicht verschieden (*Tabelle 1*).

Elementkonzentrationen in Buchenblättern: Die Konzentrationen von Calcium (Ca) und Schwefel (S) waren nach 1 und 2 Jahren Exposition zwischen den vier Belastungsgruppen signifikant verschieden und negativ mit der Mikrowellen-Leistungsdichte korreliert (*Abbildung 6*). Nach 2 Jahren Exposition betrugen die durchschnittlichen Gehalte der Gruppe 1 (10–30 mW/cm²) an Ca bzw. S nur 67 % bzw. 71 % der Gehalte der Gruppe 4 (< 0,001 mW/cm²). Überraschenderweise waren diese Unterschiede nach 3 Jahren Exposition nicht mehr vorhanden; nur bei S blieben sie als Trend bestehen. Die Konzentrationen von Kalium, Magnesium, Stickstoff und Phosphor waren in keinem Jahr von der Mikrowellen-Belastung abhängig (Daten für 2 Jahre Exposition: *Tabelle 1*).

Elementkonzentrationen in Fichtennadeln: Die Konzentrationen waren mit wenigen Ausnahmen zwischen den vier Belastungsgruppen nicht verschieden. Die Ausnahmen betrafen nur einzelne Gruppen und waren nicht von der Mikrowellen-Belastung abhängig (*Tabelle 1*). Es ist unwahrscheinlich, dass die Mikrowellen dafür verantwortlich sind.

Hommel (1985) erwartet eine Reduktion der Frostresistenz durch elektromagnetische Wellen bei Koniferen. Wir achteten daher jedes Frühjahr auf mögliche Frostschäden an den Fichten, konnten aber keine finden, obwohl vor allem der Winter 1990/91 gemäss Wetterdaten der WSL (Birmensdorf) frostreich war. Fichten akkumulieren im Herbst Raffinose und andere Kohle-

Abbildung 6. Konzentration von Calcium (linke Reihe) und Schwefel (rechte Reihe) in Buchenblättern versus Mikrowellen-Leistungsdichte (dBm/cm²). Für die Gruppe 4 wurde 10⁻³ mW/cm² (= -30 dBm/cm²) angenommen. Dargestellt sind die Konzentrationen nach 1, 2 und 3 Jahren Exposition (Einzelbaum-Werte).



hydrate als Frostschutz in den Nadeln (*Kandler et al.*, 1979). Eine reduzierte Bildung dieser Stoffe unter dem Einfluss elektromagnetischer Wellen könnte nach Hommel (1985) zu einer ungenügenden Frosthärtung führen. Wir bestimmten daher im Winter 90/91 die Nadelkonzentrationen von Raffinose, Saccharose und Pinit in den diesjährigen Nadeln der Fichten. Dabei zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Belastungsgruppen (*Tabelle 1*).

Diskussion

Mit der vorliegenden Fallstudie wurden bewusst Wirkungen von Mikrowellen untersucht, deren Leistungsdichte gegenüber den in der Umwelt vorkommenden Werten hoch war. Die Bäume der Belastungsgruppe 1 (10–30 mW/cm²) waren einer thermischen Belastung ausgesetzt; dies zeigte die Erhöhung der Exponentialtemperatur um einige °C.

Die Mikrowellen-Bestrahlung bewirkte keine sichtbaren Schäden an den Bäumen. Im Gegensatz zu den Berichten von Volkrodt (1987) fanden wir weder durch Mikrowellen bewirkte Blattvergilbungen noch Kleinblättrigkeit bei der Buche. Die Bäume erholten sich vielmehr auch bei hoher Leistungsdichte vollständig von ihrem anfänglichen Pflanzchock. Auch bei der Photosynthese (Chlorophyll-Fluoreszenz) war kein Einfluss der Mikrowellen erkennbar.

Die beim Längenwachstum festgestellten Unterschiede waren nicht belastungsabhängig und können auf Einflüsse des Geländes zurückgeführt werden. Es gibt keine Hinweise für einen Einfluss der Mikrowellen-Bestrahlung.

Wir fanden auch bei hoher Mikrowellen-Belastung keine Frostschäden an den Bäumen. Auch die Einlagerung von Raffinose als Frostschutz wurde nicht beeinträchtigt.

Die Konzentrationen von Calcium und Schwefel waren in Buchenblättern bei hohen Mikrowellen-Leistungsdichten reduziert. Im letzten Jahr waren diese Unterschiede verschwunden bzw. stark abgeschwächt. Es kann somit nicht von einer allmählichen Verarmung der Blätter an diesen Elementen unter Mikrowellen-Einfluss gesprochen werden. Es herrschte kein Ca-Mangel: Selbst bei Gruppe 1 (10–30 mW/cm²) lagen die Konzentrationen um das 1,8fache über dem von *Fiedler et al.* (1973) angegebenen Richtwert von 5500 ppm. Die Reduktion von Ca und S interpretieren wir als eine vorübergehende Reaktion der Buchen auf die Bestrahlung mit Mikrowellen. Es bleibt offen, ob eine geringere Aufnahme, eine Auswaschung oder eine pflanzeninterne Umlagerung die Ursache war.

Der Mikrowellen-Einfluss auf das Calcium ist besonders interessant, weil Säugerzellen auf niederfrequent modulierte elektromagnetische Wellen oft mit erhöhtem Ca-Efflux reagieren (*Blackman et al.*, 1985). Jonas (1979) ist der

Ansicht, dass das bei Mikrowellen-Bestrahlung (2,45 GHz, Modulation 16 und 60 Hz) beobachtete Zusammenklappen der Fiederblätter von *Mimosa pudica* ebenfalls durch einen Membrantransport von Ca ausgelöst wird. Es wäre lohnend, den Ca-Stoffwechsel in Pflanzen unter Mikrowellen-Belastung eingehender zu untersuchen.

Verschiedentlich wurden Sender im Radio- und Mikrowellen-Bereich für Bodenversauerung im Wald verantwortlich gemacht (Volkrodt, 1990; Hertel, 1991). Deshalb wurde am Ende der Exposition bei je zwei Buchen der Gruppen 1, 3 und 4 der pH-Wert des Bodens gemessen (A-Horizont; Messung in 0,01 M CaCl_2). Der Wert lag überall zwischen 6,9 und 7,1 (P. Lüscher, interne Mitteilung). Wir konnten somit keinen Einfluss der Mikrowellen-Bestrahlung auf den pH-Wert des Bodens finden.

Trotz der zum Teil enorm hohen Mikrowellen-Belastung konnten weder an Buchen noch an Fichten Schädigungen erkannt werden. Die Resultate stützen die Annahme nicht, dass die im Wald vorkommenden Mikrowellen-Leistungsdichten grossräumige Waldschäden auslösen. Inwiefern Waldschäden durch engbegrenzte Leistungsdichte-Bereiche («Wirkungsfenster», vgl. Dutta et al., 1984) erklärt werden können, liegt ausserhalb der Rahmenbedingungen unserer Fallstudie.

Angeichts des geringen Kenntnisstandes wäre die weitere Erforschung der Wirkung von Radio- und Mikrowellen auf Pflanzen sehr wünschenswert. Im erster Linie geht es darum, die fehlenden Grundlagen auf diesem Gebiet zu erarbeiten. Erfolgsversprechend wäre ein experimenteller Ansatz im Labor an physiologisch gut bekannten krautigen Pflanzen. Neben Breitbandbestrahlungen wäre beispielsweise die Untersuchung von Frequenz-Wirkungsbeziehungen und des Einflusses von Modulationen interessant. Eine Testgrösse wäre dabei der Ca-Stoffwechsel. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse würden dann eine bessere Beurteilung des Risikos von Radio- und Mikrowellen für Pflanzen erlauben.

Danksagungen

Frau Ilse Pfenninger und Herrn Dr. Werner Landolt danken wir für die Bestimmung der Zuckergehalte in Fichtennadeln. Unser Dank gilt auch Herrn Dr. Erwin Schäffer für die Bestimmung der Exponentialtemperatur und Herrn Dr. Peter Lüscher für die pH-Messungen. Den Herren Ernst Frehner und Anton Burkart danken wir für das Einpflanzen und die Pflege der Pflanzen und Herrn Daniele Pezzotta für die durchgeführten Analysen.

Résumé

Influence des micro-ondes sur les épicéas et les hêtres

De jeunes épicéas et hêtres situés en plein champ ont été exposés en permanence pendant trois ans et demi à des micro-ondes d'une fréquence de 2,45 GHz. La densité de rayonnement passe de $7 \cdot 10^{-4}$ à 30 mW/cm^2 . Les températures obtenues dans le champ à micro-ondes de 30 mW/cm^2 pourraient avoir dépassé jusqu'à 4°C la température ambiante. Les arbres soumis à cette expérience ne présentent aucun dégât visible. La densité des aiguilles aux branches reste la même et les mesures de fluorescence de chlorophylle montrent que la photosynthèse dans les feuilles de hêtres n'a pas été influencée dans son efficacité. Après un et deux ans d'exposition, les feuilles de hêtres soumises à de fortes densités de puissance ont diminué leurs taux de concentrations en calcium et en soufre. Mais comme le phénomène ne s'est pas renouvelé après trois ans, les micro-ondes n'ont pas provoqué un appauvrissement cumulatif de ces substances. Les résultats de l'étude ne confirment pas l'hypothèse que les émetteurs de micro-ondes provoquent d'amples dégâts aux forêts.

Traduction: Monique Dousse

Literatur

- Basler & Hofmann, Firma, 1985: Radio- und Mikrowellen als mögliche Ursache für Waldschäden. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 44, (BUWAL), 72 S.
- Blackman, C. F., Benane, S. G., House, D. E., Joines, W. T., 1985: Effects of ELF (1–120 Hz) and modulated (50 Hz) RF fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 6: 1–11.
- Diprose, M. F., Benson, F. A., Willis, A. J., 1984: The effect of externally applied electrostatic fields, microwave radiation and electric currents on plants and other organisms, with special reference to weed control. *Bot. rev.* 50: 171–223.
- Dutta, S. K., Subramoniam, A., Ghosh, B., Parshad, R., 1984: Microwave radiation-induced calcium ion efflux from human neuroblastoma cells in culture. *Bioelectromagnetics* 5: 71–78.
- Fiedler, H. J., Nebe, W., Hoffmann, F., 1973: Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart: 174.
- Hertel, H. U., 1991: Ein riesiges Waldgebiet im Kanton Bern stirbt vor unseren Augen, und die Wissenschaftler bleiben tatenlos. *Journal Franz Weber* Nr. 17, Juli–Sept. 1991: 5–10.
- Hommel, H., 1985: Elektromagnetischer Smog – Schadfaktor und Stress? Frequenzganganalyse am Koniferen-Nadelkollektiv. *Forstarchiv* 56: 227–233.
- Jonas, H., 1979: Circadian response to microwaves by *Mimosa pudica* L. *Z. Pflanzenphysiol.* 91: 95–101.
- Jonas, H., 1983: Responses of maize seedlings to microwave irradiation. *Environ. pollut. Ser. B*, 6: 207–219.
- Joos, K., 1989: Untersuchung über mögliche Einflüsse hochfrequenter elektromagnetischer Wellen auf den Wald. *Techn. Mitt. PTT* 67: 136–145.
- Joos, K., Masumy, S., Schweingruber, F. H., Stäger, Ch., 1988: Untersuchung über mögliche Einflüsse hochfrequenter elektromagnetischer Wellen auf den Wald. *Techn. Mitt. PTT* 66: 2–11.

- Kandler, O., Dover, C., Ziegler, P., 1979: Kälteresistenz der Fichte. Ber. Dtsch. bot. Ges. 92: 225–241.
- Kremer, F., Poglitsch, A., Santo, L., Sperber, D., Genzel, L., 1985: The influence of low-intensity millimeter-wave radiation on the growth of cress roots. Z. Naturforsch. 40c: 336–343.
- Krug, E., 1990: Pollenkeimung unter Einfluss elektromagnetischer Wellen und Felder. Eur. j. for. path. 20: 251ff.
- Landolt, W., Krause-Lüthy, B., 1989: NFP 14+ «Waldschäden und Luftverschmutzung in der Schweiz», Teilprojekt «Negativbegasung», Schlussbericht vom 30.6.89, 120 S.
- Lichtenthaler, H. K., Wellburn, R., 1983: Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochem. soc. trans. 11: 591–592.
- Pallmann, H., Eichenberger, E., Hasler, A., 1940: Eine neue Methode der Temperaturmessung bei ökologischen oder bodenkundlichen Untersuchungen. Ber. Schweiz. bot. Ges. 50: 337–362.
- Sachs, L., 1974: Angewandte Statistik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 4. Auflage: 43–44.
- Stäger, Ch., 1989: Felduntersuchung über eventuelle Schadenwirkungen von Mikrowellen auf den Wald. Techn. Mitt. PTT 67: 517–526.
- Strasser, R. J., Schwarz, B., Bucher J. B., 1987: Simultane Messung der Chlorophyll-Fluoreszenz-Kinetik bei verschiedenen Wellenlängen als rasches Verfahren zur Frühdiagnose von Immissionsbelastungen an Waldbäumen: Ozoneinwirkungen auf Buchen und Pappeln. Eur. j. for. path. 17: 149–157.
- Volkert, E., Schnelle, F., 1966: Erläuterungen zur Beobachtung des phänologischen Termins «Nadelentfaltung» bei der *Picea abies*. Arboreta Phaenologica 1966, Nr. 8.
- Volkrodt, W., 1987: Wer ist am Waldsterben schuld ? raum&zeit 26: 53ff.
- Volkrodt, W., 1990: Neuartige Waldschäden als Folge des «Kalten Krieges». Bericht erhältlich bei Dr.-Ing. W. Volkrodt, Walsiedlung 8, W-8740 Bad Neustadt, BRD.

Gedruckt mit Unterstützung der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.

Verfasser: Dr. Paul Schmutz, Dr. Jürg B. Bucher und David Tarjan, dipl. Forsting., Eidg., Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.
Jürg Siegenthaler, Ing. HTL, und Christian Stäger, Ing. HTL, Generaldirektion PTT, Abteilung Forschung und Entwicklung, CH-3000 Bern.