

Meine Idee war von Anfang an, Forschung auf breiter Basis zu betreiben, mit motivierten fröhlichen Mitarbeitern, mit alle paar Jahre neu gesetzten Zielen und Projekten. Und das Abenteuer zu wagen, **neue Methoden** auf alte Fragestellungen anzusetzen, manchmal nur um des Reizes des Neuen willen. Ich meine, Forschung soll ein Abenteuer sein, sonst wird sie zur Routine, der Physiker/die Physikerin in der Forschung mit öffentlichen Mitteln sollten Abenteurer sein, sonst sind sie ihr Geld nicht wert, viel Geld, das der Staat ihnen zur Verfügung stellt. Einer meiner Berliner Mitarbeiter sagte einmal: „Früher haben die waghalsigen Menschen neue Länder entdeckt. Das ist vorbei, alles ist entdeckt in der großen Welt. Wir entdecken jetzt in's immer Kleinere hinein. Das sind die Abenteuer unserer Zeit.“

Immer wieder neue Zielsetzungen sind allerdings heute für einen Naturwissenschaftler, der Experimente macht, nicht einfach. Moderne Experimente sind kostspielig, und die Begeisterung der Geldgeber hält sich in Grenzen, wenn immer wieder eine Richtung neu angepeilt wird und neue immer aufwändigere Geräte gebaut oder gekauft werden. Denn das kostet immer wieder neues Geld. Bei uns war das Geld für den Eigenbau von Kryostaten, Öfen, Ultrahochvakuum-Kammern, Röntgenanlagen und vor allem für die Nutzung der teuren europäischen Großforschungsgeräte.

Bei meiner Dissertation befasste ich mich, betreut von Brigitte Weiß am Institut von Erich Schmid an der Philosophischen Fakultät der Universität Wien, mit der Veränderung aushärtender Aluminium-Legierungen unter Bestrahlung [1]. Das Ergebnis: sie veränderten sich kräftig, viel mehr konnte ich nicht sagen.

Ich hatte dann das Glück, dass mir Heinz Maier-Leibnitz, dessen Schüler Rudolf Mößbauer nicht lange vorher den ersten Physik-Nobelpreis nach dem Krieg für einen Deutschen erhalten hatte, nach meiner Promotion schon im Alter von 25 Jahren eine Assistentenstelle am Physik-Department der TU München in Garching anbot. Ob ihm klar war, wie wenig ich konnte und wusste? Vielleicht suchte er das Abenteuer auf dem Personalsektor: neue Leute bringen neue Ideen. Bald war ich Leiter der von Werner Schilling aufgebauten Tieftemperaturbestrahlungsanlage. An dieser weltweit einmaligen Apparatur konnten durch höchsten Neutronenbeschuss bei Temperaturen von 4 Kelvin Strahlenschäden, also Gitter-Fehlstellen in Metallen erzeugt und studiert werden. Deren Verständnis sollte die Grundlagen für die weitere Entwicklung von geeigneten Materialien ermöglichen, die bei der Energieerzeugung mittels Kernspaltung und Kernfusion eingesetzt werden können. Ich war eigentlich viel zu jung für diese Aufgabe, betreute Studenten, die älter waren, und hatte kräftig nachzulernen. Das wunderbare menschliche Klima in dieser Arbeitsgruppe, für das nicht zuletzt mein Kollege Klaus Böning verantwortlich war, half mir über die Anfangsschwierigkeiten hinweg. Bald führten wir zusammen die gar nicht kleine Arbeitsgruppe und setzten mit unseren Diplomanden und Doktoranden verschiedenste Methoden ein, die es ermöglichten, Wachstum und Wiedervernichtung (die „Ausheilung“) der Fehlstellen in Metallen zu verfolgen.

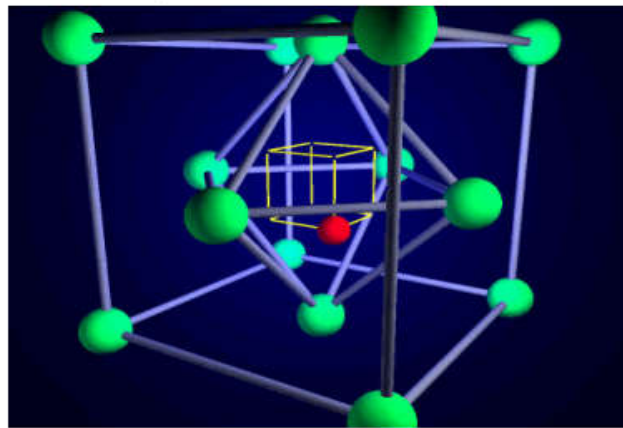
Das Garchinger Physik-Department erschien mir der geeignete Ort, eine Brücke zu betreten, die mir neu erschien, nämlich die Nukleare Festkörperphysik zu betreiben. Eine riskante Brücke, denn die Idee war, **Kernphysik einsetzen, um Information über Festkörper zu erhalten**, daher der Name, den wohl Maier-Leibnitz erfunden hatte. Ich verstand von beiden Gebieten, der Kernphysik und der Festkörperphysik, herzlich wenig – weniger als die jeweiligen viel besser und länger ausgebildeten Spezialisten am Physik-Department, aber die Möglichkeit, diese Brücke zu beschreiten, und dann auf beiden Hochzeiten zu tanzen, schien mir höchst attraktiv. Das war eine neue Chance, um zum **Verständnis der Dynamik des einzelnen Atoms** vorzudringen. Der Anfang war holprig, die jeweiligen Spezialisten, denen zuerst genau das unheimlich und suspekt war, was mich an dieser Verbindung gerade faszinierte, mussten erst überzeugt werden.

In Wolfgang Mansel fand ich einen Doktoranden mit großem experimentellen Geschick, allein hätte ich auch experimentell wenig Erfahrener die schwierigen Experimente

(Kernreaktor, für damalige Zeiten sehr tiefe Temperaturen, erste kernphysikalische Experimente an Proben, die ohne Aufwärmung aus dem Reaktorkern ins Labor transferiert werden mussten) kaum gewagt und sicher nicht geschafft.

Und dann die ersten Erfolge mit der Entdeckung des „Zwischengitter-Käfigs“ in Aluminium mit Hilfe der **Mößbauer-Spektroskopie** an $^{57}\text{Co}/^{57}\text{Fe}$ -Fremdatomen. Diesen Käfig bilden bestrahlungserzeugte, also aus ihren Gitterplätzen herausgeschlagene Atome zusammen mit den Fremdatomen, sozusagen als Fluchtort. Durch ihre Nichtzugehörigkeit zum umgebenden wohlgeordneten Kristallgitter befinden sie sich aber in einem dauernden Unruhezustand und hüpfen schon bei sehr tiefen Temperaturen in ihrem Käfig umher, ohne diesen vorerst verlassen zu können. Erst bei erheblich höheren Temperaturen gelingt ihnen die Befreiung.

Käfig für Eisenatom in Aluminium (1 ppm Fe in Al)



Das Fe-Atom (rot) springt im Zwischengitteratom-Käfig (gelb), der eingebettet ist im Gitter der Al-Atome (grün).

Die Arbeiten sind u.a. in [2] beschrieben, Peter H. Dederichs lieferte die erste Theorie (und taufte etwas spöttisch den Käfig auf meinen Namen), und Linus Pauling ehrte uns, indem er unseren Käfig mit seinen Hybridorbitalen beschrieb [3]. Man kann die Dynamik im Käfig als eine **lokalisierte Diffusion** des Zwischengitteratoms betrachten. Das war mein Einstieg in ein Gebiet, das ich heute „Subnano-Materialforschung“ nennen würde (in Anlehnung an das Modewort „Nanomaterialien“).

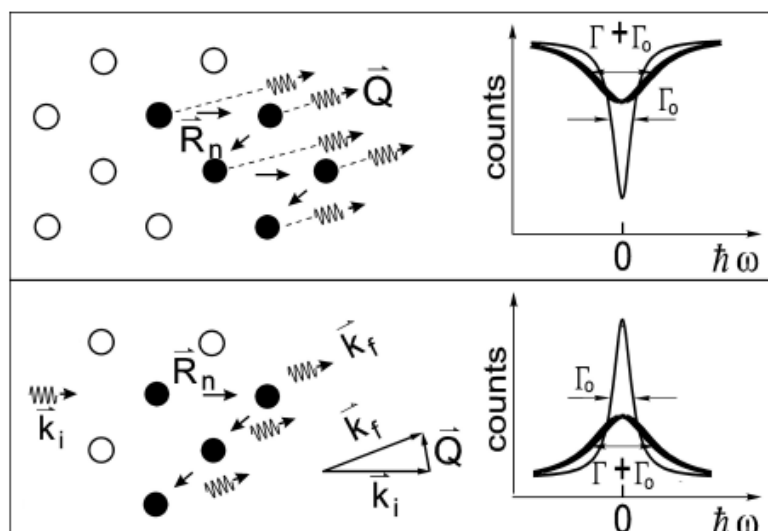
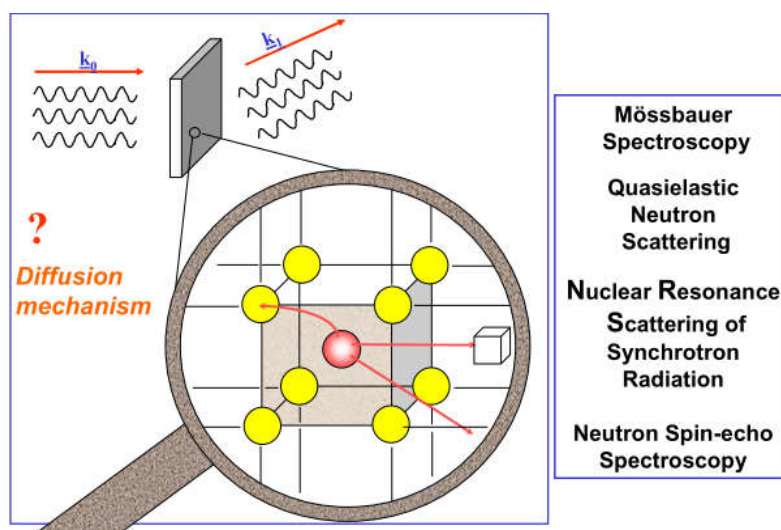
Nach meiner Berufung an die Freie Universität Berlin und das Hahn-Meitner-Institut (HMI) musste ich mein Arbeitsgebiet verändern. Eine interessante Abwechslung, wie sie – so meine ich - ungefähr alle sieben Jahre erfolgen sollte. Denn so lange, behauptete ich, dauert es nach meiner Erfahrung im Allgemeinen, bis man auf einem neuen Gebiet Erfolge haben kann, jetzt kann man wieder etwas Neues beginnen.

Doch in Berlin musste ich gewisse Widerstände überwinden, um den Schwerionen-Beschleuniger VICKSI außerhalb der Kernphysik für Bestrahlung einsetzen zu dürfen. „Das fantastische Werkzeug als Hammer missbrauchen“, wurde mir, nicht ganz zu Unrecht, vorgeworfen. Aber das tat ich schon allein aus Überlebensstrategie, denn in der reinen Kernphysik war mein Wissen viel zu gering, um mit den erfahrenen Kernphysikern mithalten. Siegfried Klumünzer, aus Bayern nach Berlin geholt, suchte sich amorphe Materialien als Objekte und entdeckte unter Mithilfe des chinesischen Gastforschers Hou Mingdong den überraschenden „Klumünzer-Effekt“, das **Wachstum der Gläser unter Schwerionenbestrahlung** [6]. Und in den späteren Jahren von VICKSI (da war ich längst in Wien) sollte sich die Bestrahlung zum Arbeitspferd des Schwerionenbeschleunigers entwickeln, nicht nur bei unbelebter Materie; es wurde dort auch Pionierarbeit auf dem Gebiet

der Tumorthherapie mit Schwerionen geleistet. Dass man mich, den früheren Kämpfer auf einsamem Posten, 1999 an das HMI als Leiter der Schwerionengruppe zurückberief, zeigt wie großzügig Berliner sein können.

Mein aus München mitgekommener Doktorand Winfried Petry schlug vor, die „normale“ Atom-Wanderung zu untersuchen, die **Diffusion**. Und natürlich wollten wir weiterhin nukleare Methoden einsetzen. Wir wollten zeigen, dass sich die Methoden der nuklearen Festkörperphysik vor allem für die Aufklärung der atomistischen Details der Diffusionsvorgänge eignen, während die bekannte Radiotracer-Methode nur indirekte Aussagen über den einzelnen Sprungvorgang, den „Elementarsprung“, machen kann.

Es gab einige interessante Ergebnisse: wir klärten den atomistischen Elementarprozess der Diffusion von Eisen in Aluminium und in Kupfer [4]. Bald reizte uns eine andere nukleare Methode, die Neutronenstreuung, und wir studierten zuerst die Diffusion mit **quasielastischer Neutronenstreuung**.

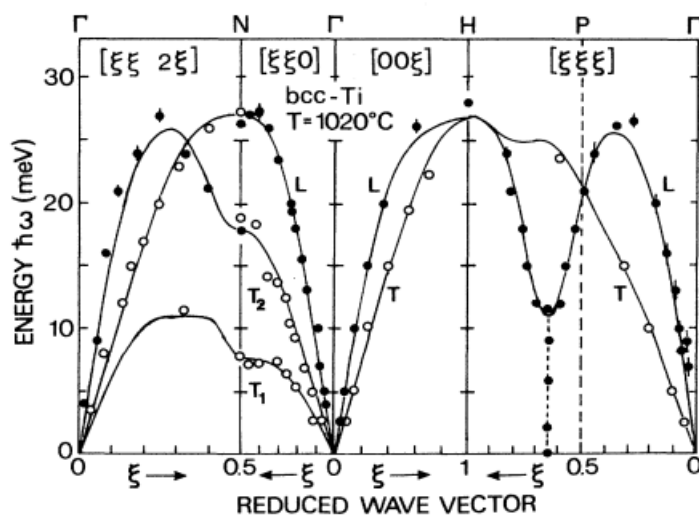


Vergleich von Mößbauer-Spektroskopie (oben) und quasielastischer Neutronenstreuung (unten). Diese Methoden studieren die Frequenz und den Verschiebungsvektor R_n des elementaren Diffusionsprungs. Diffusion führt zu einer Linienverbreiterung. Q ist für Mößbauer-Spektroskopie der Wellenvektor der Gammastrahlung, für quasielastische Neutronenstreuung der Streuvektor.

Bald betrieben wir auch **Phononen-Spektroskopie**, beides auswärts am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble. Der Anfang war abenteuerlich, denn wir verstanden nichts von der Praxis der hochkomplizierten Apparaturen. Aber heute ist Winfried Petry wissenschaftlicher Direktor der deutschen Neutronenquelle in Garching, und unser erster Werkstudent Helmut Schober ist wissenschaftlicher Direktor des ILL.

Nach meiner Berufung nach Wien erweiterte ich das Arbeitsgebiet. Mein Ziel war, in Wien Methoden einzuführen, die einerseits das vorhandene methodische Spektrum an meinem Institut ergänzten, andererseits es meinen Mitarbeitern erlauben würden, mit der zu Hause gewonnenen Erfahrung an den europäischen Großforschungsgeräten erfolgreich zu forschen. Meine Berufsbedingung war daher die weltbeste Röntgen-Kleinwinkelstreuanlage, um das weit gespreizte Spektrum der im damaligen Institut für Festkörperphysik betriebenen Forschungsgebiete zu fokussieren und durch eine Methode für Forschung an **Nanomaterialien** zu ergänzen, schließlich um ein Übungsgerät zu haben, sodass die jungen Forscher schon mit Erfahrung an den Synchrotron-Röntgenquellen in Europa antreten würden. Peter Fratzl, der gleich nach seiner Promotion zu uns stieß, baute diese Anlage.

Mein Hauptinteresse lag aber weiterhin in der „**Subnano-Materialforschung**“, dem Verständnis der Dynamik der einzelnen Atome in kondensierter Materie, insbesondere der Mechanismen der Diffusion der Atome in Metallen und Legierungen, und der Gitterschwingungen. Winfried Petry gelang es, an der Neutronenquelle des Instituts Laue-Langevin in Grenoble, **die Zusammenhänge zwischen weichen Phononen-Schwingungsmoden und Phasenübergängen** in den hochschmelzenden Metallen Zirkon, Titan und Hafnium zu klären [6], und ich erweiterte die Erkenntnisse auf das Verständnis der schnellen Diffusion in hochschmelzenden Metallen [7].



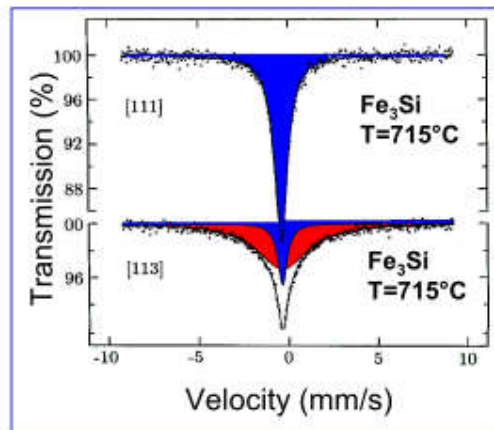
Dispersionsrelation für Titan bei 1020°C. Man erkennt die weichen Schwingungsmoden bei $2/3$ $[111]$, die die Auslöser für schnelle Diffusion und Phasenübergänge sind.

Die Mitarbeiter um Peter Fratzl und seine Doktoranden erforschten mit der **Röntgen-Kleinwinkelstreuung** die Nanostruktur der gleichen Festkörperklassen [8]. Später wuchs darauf die Biomaterialforschung [9], die Fratzl jetzt extrem erfolgreich in Potsdam betreibt, und in Wien nutzt Herwig Peterlik eine mittlerweile völlig neue Kleinwinkelstreu-Anlage zur Forschung an Nanomaterialien in Zusammenarbeit mit Forschern aus ganz verschiedenen Gebieten der Naturwissenschaften.

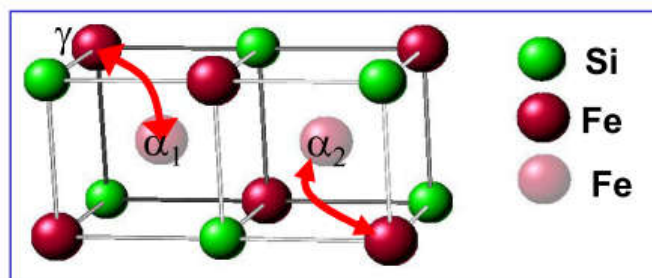
Unser Interessengebiet verschob sich anschließend auf die Dynamik der auch technisch wichtige Klasse der **intermetallischen Verbindungen**. Von und mit unserem Doktoranden Oliver Randl lernte ich die Diagonalisierung und Eigenwertbestimmung der Sprungmatrizen, wusste gar nicht, wie viel mehr Mathematik die Physik-Studenten

mittlerweile gelernt hatten. Hier nur ein besonders interessantes Ergebnis: die ungewöhnlich schnellen Sprünge der Eisenatome in einer der sonst diffusiv trägen weil wohlgeordneten intermetallischen Verbindungen, in Fe_3Si [10].

Bis zu Anwendungen haben wir es allerdings nicht gebracht.



Mössbauerspektroskopie an den schnell diffundierenden Fe-Atomen in Fe_3Si . Auffällig ist die schon bei 715°C extreme Linienverbreiterung in [113]-Richtung, während die Linie in [111]-Richtung schmal ist. Daraus kann auf die Details des Diffusionssprungs geschlossen werden.

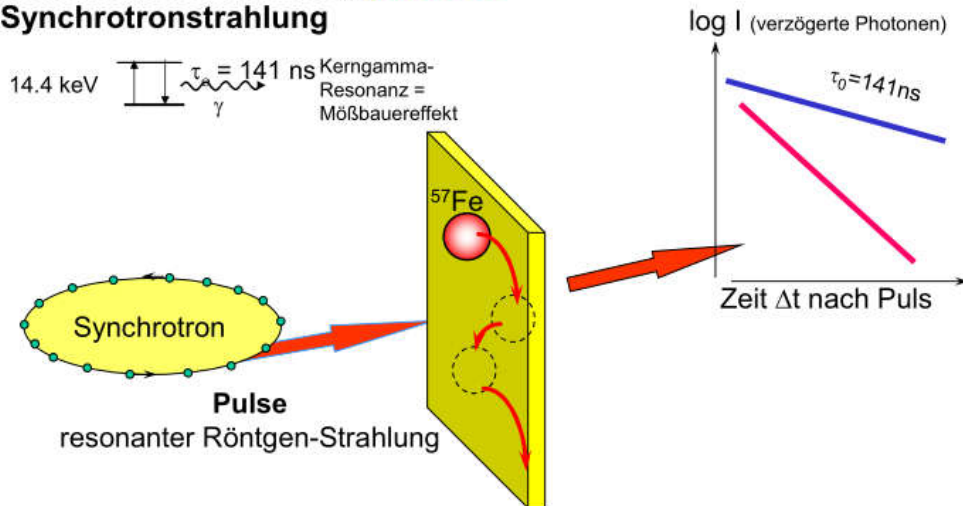


Die geordnete intermetallische Verbindung Fe_3Si hat 3 Fe-Untergitter und ein Si-Untergitter. Die Experimente ergeben, dass die Fe-Atome zwischen den alpha- und gamma-Untergittern springen und zwar viel schneller als die Si-Atome.

S.Dennler und Jürgen Hafner [11] haben mit Dichtefunktional-Rechnungen die Wanderungs- und Bildungsenergien der Defekte analysiert und die prononzierte Asymmetrie (viel schnellere Fe- als Si-Sprünge) überzeugend erklärt.

Bei einem meiner nicht wenigen, von meinen jeweiligen Heimat-Universitäten großzügig gewährten Forschungssemestern erkundete ich ab den Neunzigerjahren in Grenoble die Möglichkeiten der neuen Synchrotronstrahlungs-Röntgenquelle ESRF. (Und der Berge der Dauphinee, eine attraktive Ergänzung – oder waren die faszinierenden Möglichkeiten des ESRF eine attraktive Ergänzung der Berglandschaft?). Eine für uns sehr reizvolle Möglichkeit, die Diffusion in intermetallischen Phasen weiter zu erforschen, erbot sich mit der **kernresonanten Streuung von Synchrotronstrahlung**, das ist Mößbauer-Spektroskopie als Funktion der Zeit statt wie bisher der Energie. Diese Experimente sind nur an Großforschungsanlagen möglich - und wir arbeiteten immer daran, die Grenzen auch dieser Anlagen auszuloten. Das gelang hier auf Anhieb [12].

Kernresonanz-Streuung **gepulster** Synchrotronstrahlung



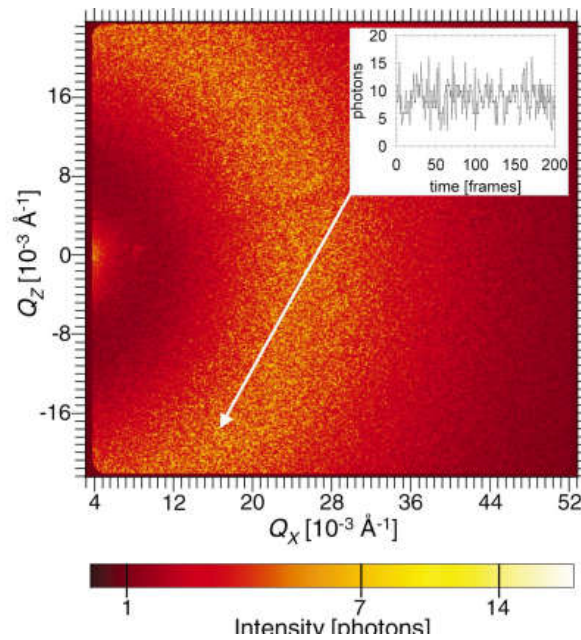
Blaue Linie: keine Diffusion, rote Linie Diffusion

Zum ersten Mal verließ ich in dieser Zeit die metallischen Werkstoffe und erforschte die **Dynamik biologischer Materialien** [13]. Auch hier war wieder die Einstiegshürde zu überwinden, und das gelang perfekter und nachhaltiger meinen jungen Mitarbeitern (von denen eine ganze Reihe mittlerweile Professoren sind) als mir selbst. Wir untersuchten besonders intensiv die Dynamik von Wasser in Zellulose. Unser erstaunlichstes Ergebnis war, dass flüssiges Wasser sich in Zellulose bis -75°C unterkühlen lässt und dann in einer neuen amorphen Eisphase ausfällt. Leider ist uns eine Veröffentlichung nicht gelungen.

In dieser Zeit folgte ich einer neuerlichen Berufung nach Berlin, wo ich die Aufgabe vorfand, den neuen Bereich Strukturforschung am Hahn-Meitner-Institut zu leiten. Da blieb wenig Zeit für eigene Forschung. Ich verließ Berlin und das Gebiet der biologischen Materialien nach wenigen Jahren wieder und kehrte noch einmal nach Wien und Grenoble und zur Physik der metallischen Materialien zurück. Dabei war mein Ziel, die noch unergründeten Chancen auszuloten, die Synchrotronstrahlung für die Erforschung der Dynamik der Materie bietet. Die kernresonante Streuung hatte bisher nur bestätigt, was wir aus der Mößbauer-Spektroskopie und der quasielastischen Neutronenstreuung über die Diffusion in intermetallischen Legierungen wussten. Der starke Synchrotronstrahl musste es aber doch möglich machen, erstmals auch die Dynamik in einatomaren Schichten und auf Oberflächen zu ergründen. Wir studierten daher Oberflächendiffusion [14] und Oberflächen-Phononen [15] mit streifender Synchrotronstrahlung. Ohne die Zusammenarbeit mit der Krakauer Gruppe von Jozef Korecki wäre dies nicht gelungen.

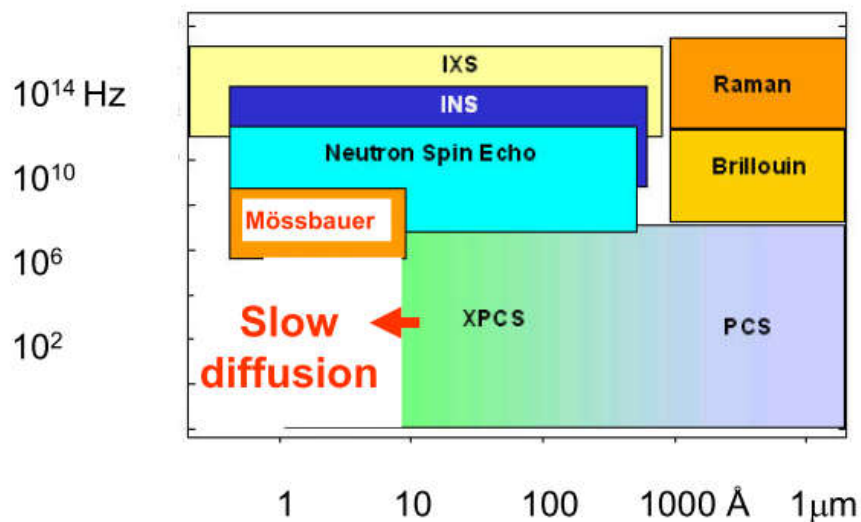
Am ESRF reizte uns außerdem die Erprobung der neuen Methode der **Röntgen-Photonenkorrelationspektroskopie XPCS**.

Wir begannen mit der uns vertrauten Kleinwinkelstreuung, um die Dynamik kleiner Teilchen zu verfolgen [16].



Kleinwinkelstreuung an einer Al-6at.%Ag-Probe. Die Intensität der Flecken (englisch speckles) fluktuiert zeitlich (siehe Inset).

Schließlich versuchten wir, Röntgen-Korrelationsspektroskopie ins Atomare zu erweitern. Wieder ein neue Chance, die es vorher nicht gegeben hatte: Synchrotronstrahlung ist teilweise kohärent und wird mit den Freien-Elektronen-Lasern voll kohärent. Zusammen mit Gerhard Grübel hatte ich noch aus Berlin einen Vorhersage gewagt: ich hatte den erfahrenen Kollegen überzeugt, dass es möglich sein sollte, die Diffusion einzelner Atome mit dieser Methode zu verfolgen[17].



Resolution of methods probing dynamics on length and time scale

Frequenz- und Längenbereiche, die von verschiedenen Methoden überstrichen werden. Man erkennt, dass erst mit der Nutzbarmachung der XPCS (roter Pfeil) langsame Sprünge (1 Hz) auf atomarer Skala (1 Angstrom!) zugänglich werden.

Dass dies Michael Leitner und Bogdan Sepiol wenige Jahre später tatsächlich gelingen sollte [18], hatte ich damals nicht erwartet – ich hatte gedacht, dies würde erst mit den wesentlich kräftigeren Strahlen des Röntgen-Freien-Elektronen-Lasers (XFEL) gelingen können. Damit ist das Tor aufgestoßen zur Erforschung der Diffusion auch bei niedrigen Temperaturen und an allen Elementen.

Schwingungen, Sprünge, Tänze

Ich meine, wir haben eine Reihe von Methoden aus der nuklearen, Neutronen- und Synchrotron-Physik für die Materialforschung, besonders die Erforschung der Dynamik der Metalle, erstmals nutzbar gemacht. Durch Anwendung auf gleiche elementare und Legierungssysteme konnten wir uns davon überzeugen, dass die Ergebnisse der verschiedenen Methoden kohärent und verlässlich sind.

Wir konnten in einigen Materialien zeigen, wie die Atomverbände schwingen, wie das einzelne Atom bei der Diffusion springt und wie es im Käfig tanzt. Wir fanden die Gründe für die in manchen wichtigen Materialien besonders schnelle Diffusion und deren Tendenz zu Phasenübergängen.

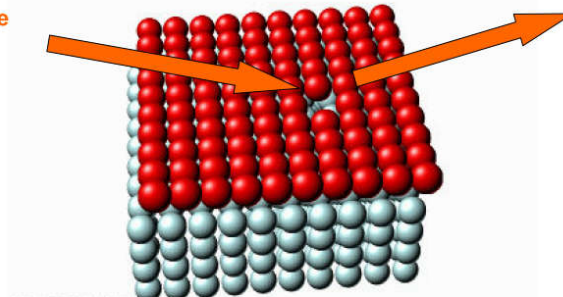
Ob das alles wichtig ist? Ob es das Geld wert ist, das uns die Staaten zur Verfügung stellten, in denen und mit deren Wissenschaftlern zusammen wir forschten (Österreich, Deutschland, Frankreich, Polen, China, Japan, Indien, USA etc.), damit wir begeistert „spielen“ durften? Ich jedenfalls bin dem Steuerzahler dankbar, dass er sich die Kultur der Erweiterung des Wissenshorizonts leistet und dass ich dabei mitspielen durfte. Das Spielen war aber nicht ohne Entbehrungen: die vielen Nachtschichten an den immer ausgebuchten Großgeräten, die ohne Unterbrechung genutzt werden mussten, wenn man Strahlzeit bekam. Die Reisen durch Europa und in die USA zu Geräten in Grenoble, Paris, Berlin, Hamburg Jülich, Argonne, Oak Ridge.

Wir haben kein Buch über unser Fachgebiet „Schwingungen, Sprünge, Tänze“ geschrieben und auch nur kurze Reviews in verschiedenen Sammelbänden – war es Faulheit oder eher das Bedenken, dass es zu viele Fachbücher gibt? Alle sieben Jahre was Neues – bleibt da ein wissenschaftlicher Fußabdruck? Aber an-, manchmal auch auf-regend war und ist es noch immer.

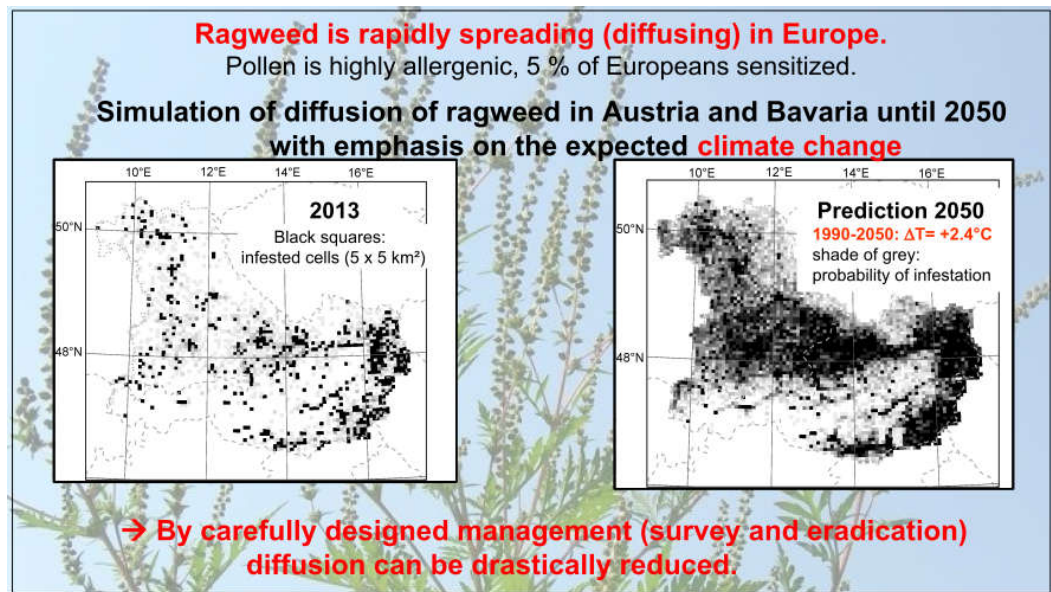
Zur Zeit meiner Emeritierung im Jahr 2009 war ich zum letzten Mal verantwortlich für eine Originalarbeit aus der Festkörper/Materialphysik. Das war die Oberflächendiffusion mit streifendem Einfall der Synchrotronstrahlung [14]. Damit haben wir gerade einmal in dieses aussichtsreiche Gebiet hineingelugt. Ich hoffe, dass Nachfolger kommen werden, die die Ernte einbringen [19].

Diffusion of Fe in surface monolayer on W

Synchrotron beam
in grazing incidence



Seit einigen Jahren und verstärkt seit 2009 befasse ich mich mit **interdisziplinärer Forschung**. Ich versuche, die Ideen der Diffusion, basierend auf den Methoden der Physik, der physikalischen Denkweise und den dazu gehörenden mathematischen Formalismen, auf Fragestellungen in der Ökologie/Biologie, der Linguistik und in der Anthropologie anzuwenden. In der Ökologie sind uns durch die von Lorenz Stadler initiierte Zusammenarbeit mit den Biologen/Ökologen Franz Essl und Stefan Dullinger [20] einige Arbeiten gelungen, die Resonanz gefunden haben. Es handelt sich um die Computer-Modellierung und darauf aufbauend die Vorhersage der Diffusion oder – um ein passendes Wort aus der Ökologie zu verwenden – der Ausbreitung des Allergiekrauts Ragweed. Wir hoffen, dass die Vorschläge, die wir zur Eindämmung gemacht haben, Beachtung finden.



Aus diesem interdisziplinären Interesse heraus sind zwei kleine Bücher [21] entstanden, welche die Diffusion von Atomen bis zur Ausbreitung von Lebewesen und Ideen behandeln. In diesen wird der Brückenschlag versucht, ein komplexes Thema sowohl dem Wissenschaftler als auch dem naturwissenschaftlich interessierten Leser nahe zu bringen.

Über meine Vorlesungen habe ich immer versucht, die besten Studenten für unsere Arbeitsgruppe zu gewinnen. Nicht wenige meiner Schüler und früheren Mitarbeiter sind jetzt als Hochschullehrer und in führenden Positionen im öffentlichen Leben und in der Wirtschaft tätig. Darauf bin ich mehr stolz als auf das selbst Zusammengetragene. Leonardo soll gesagt haben: Ein Schüler sollte traurig sein, der seinen Lehrer nicht übertrifft.

Meine Frau hat das Wanderleben mitgespielt, wofür ich ihr dankbar bin. Sie hat es geschafft, ihren eigenen Beruf als Lehrerin und Psychologin wieder voll aufzunehmen, als unsere drei Töchter die elterliche Führung nicht mehr dringend brauchten. Unsere Töchter haben offenbar nicht allzu sehr unter den häufigen Ortswechslern gelitten, zwei von ihnen sind jetzt auch beruflich in der Welt unterwegs.

Ausgewählte Zitate

- [1] G.Vogl, B.Weiss
DER EINFLUSS VON NEUTRONENBESTRAHLUNG AUF DIE
AUSSCHIEDUNGSKINETIK EINER UBERSÄTTIGTEN AL-CU-LEGIERUNG
Acta metall. 13, 578 (1965)
- [2] W.Mansel, G.Vogl, W.Koch
DIRECT EVIDENCE FOR INTERSTITIAL-ATOM TRAPPING BY CO-57 IMPURITIES
IN ALUMINUM FROM MOSSBAUER-EFFECT MEASUREMENTS AFTER LOW-
TEMPERATURE NEUTRON-IRRADIATION
Phys.Rev.Lett. 31, 359-362 (1973);
- G.Vogl, W.Mansel, P.H.Dederichs
UNUSUAL DYNAMIC PROPERTIES OF SELF-INTERSTITIALS TRAPPED AT CO
IMPURITIES IN AL
Phys.Rev.Lett. 36, 1497 (1976)
- [3] L.Pauling
THE STRUCTURE AND OSCILLATIONAL MOTION OF FE-57 ATOMS IN
INTERSTITIAL SITES IN AL AS DETERMINED FROM INTERFERENCE OF
MOSSBAUER-GAMMA RADIATION
J.Solid State Chem. 40, 266-269 (1981)
- [4] S.Mantl, W.Petry, K.Schroeder, G.Vogl
DIFFUSION OF IRON IN ALUMINIUM STUDIED BY MÖSSBAUER SPECTROSCOPY
Phys.Rev.B 27, 5313 (1983)
- K.H.Steinmetz, G.Vogl, W.Petry, K.Schroeder
DIFFUSION OF IRON IN COPPER STUDIED BY MÖSSBAUER SPECTROSCOPY IN
SINGLE CRYSTALS
Phys.Rev.B 34, 107 (1986)
- [5] G.Schumacher, S.Klaumünzer, S.Rentzsch, G.Vogl
RADIATION-INDUCED DEFECTS IN AMORPHOUS PD80SI20
Z.Physik B-Cond.Matter 40, 19-21 (1980)
- S.Klaumünzer, G.Schumacher, S.Rentzsch, G.Vogl
SEVERE RADIATION-DAMAGE BY HEAVY-IONS IN GLASSY PD80SI20
Acta metall. 30, 1493-1502 (1982)
- [6] W.Petry, A.Heiming, J.Trampenau, M.Alba, C.Herzig, H.R.Schober, G.Vogl
PHONON DISPERSION OF THE BCC PHASE OF GROUP-IV METALS. I.BCC
TITANIUM
Phys.Rev.B 43, 10933 (1993)
- A.Heiming, W.Petry, J.Trampenau, M.Alba, C.Herzig, H.R.Schober, G.Vogl
PHONON DISPERSION OF THE BCC PHASE OF GROUP-IV METALS. II. BCC
ZIRCONIUM, A MODEL CASE OF DYNAMICAL PRECURSORS OF MARTENSITIC
TRANSITIONS
Phys.Rev.B 43, 10948 (1993)
- [7] G.Vogl, W.Petry, Th.Flottmann, A.Heiming
DIRECT DETERMINATION OF THE SELF-DIFFUSION MECHANISM IN BETA-
TITANIUM
Phys.Rev.B 39, 5025 (1989)

[8] P.Fratzl, F.Langmayr, G.Vogl, W.Miekeley
THE GROWTH OF OMEGA-PHASE INCLUSIONS IN TI-20 AT PERCENT MO AND
THE COMPETITION BETWEEN ELASTIC AND SURFACE
Acta metall. mater. 39, 753-761 (1991)

P.Fratzl, Y.Yoshida, G.Vogl, H.G.Haubold
PHASE-SEPARATION KINETICS OF DILUTE CU-FE ALLOYS STUDIED BY
ANOMALOUS SMALL-ANGLE X-RAY-SCATTERING AND MOSSBAUER-
SPECTROSCOPY
Phys.Rev.B 46, 11323-11331 (1992)

[9] P.Fratzl, M.Groschner, G.Vogl, H.Plenk, J.Eschberger, N.Fratzl-Zelman, K.Koller,
K.Klaushofer
MINERAL CRYSTALS IN CALCIFIED TISSUES - A COMPARATIVE-STUDY BY
SAXS
J. Bone and Mineral Research 7, 329-334 (1992)

[10] O.G. Randl, G. Vogl, W.Petry, B.Hennion, B. Sepiol, K.Nembach
LATTICE DYNAMICS AND RELATED DIFFUSION PROPERTIES OF
INTERMETALLICS: I. Fe_3Si
J.Phys.: Condens. Matter 7, 5983 (1995)

G.Vogl, M.Kaisermayr, O.G.Randl
THE MECHANISM OF FAST NI DIFFUSION IN THE HIGH-TEMPERATURE PHASE
OF Ni_3SB STUDIED WITH QUASIELASTIC NEUTRON SCATTERING
J. Phys.: Condens. Matter 8, 4727 (1996)

B.Sepiol, G.Vogl
ATOMISTIC DETERMINATION OF DIFFUSION MECHANISM ON AN ORDERED
LATTICE
Phys.Rev.Lett. 71, 731-734 (1993)

G.Vogl, B.Sepiol
ELEMENTARY DIFFUSION JUMP OF IRON ATOMS IN INTERMETALLIC
PHASES STUDIED BY MOSSBAUER SPECTROSCOPY
I. Fe-A1 CLOSE TO EQUIATOMIC STOICHIOMETRY
Acta metall. mater. 42, 3175-3181 (1994)

R.Feldwisch, G.Vogl, B.Sepiol
II. FROM ORDER TO DISORDER
Acta metall. mater. 43, 2033-2039 (1995)

[11] S. Dennler, J.Hafner
FIRST-PRINCIPLES STUDY OF LATTICE DYNAMICS AND DIFFUSION IN DO_3 -
TYPE Fe_3Si
Phys.Rev.B 73, 174303 (2006)

[12] B.Sepiol, A.Meyer, G.Vogl, R. A.I.Chumakov, A.Q.R.Baron
TIME DOMAIN STUDY OF Fe^{57} DIFFUSION USING NUCLEAR FORWARD
SCATTERING OF SYNCHROTRON RADIATION
Phys.Rev.Lett. 76, 3220-3223 (1996)

B.Sepiol, A.Meyer, G.Vogl, H.Franz, R.Rüffer
DIFFUSION IN A CRYSTAL LATTICE WITH NUCLEAR RESONANT SCATTERING
OF SYNCHROTRON RADIATION
Phys.Rev. B 57, 10433-10439 (1998)

[13] M.Müller, C.Czihak, G.Vogl, et al.
DIRECT OBSERVATION OF MICROFIBRIL ARRANGEMENT IN A SINGLE NATIVE
CELLULOSE FIBER BY MICROBEAM SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING
Macromolecules 31, 3953-3957 (1998)

C.Czihak, M.Müller, H.Schober, L.Heux, G.Vogl
DYNAMICS OF WATER ADSORBED TO CELLULOSE
Physica B 266, 87-91 (1999)

H.Lichtenegger, W.Doster, T.Kleinert, A.Birk, B.Sepiol, G.Vogl
HEME-SOLVENT COUPLING: A MOSSBAUER STUDY OF MYOGLOBIN IN
SUCROSE
Biophys. J. 76, 414-422 Part: 1 (1999)

[14] G. Vogl, M. Sladeczek, S. Dattagupta
PROBING SINGLE JUMPS OF SURFACE ATOMS
Phys.Rev.Lett. 99, 155902 (2007)

G. Vogl, E. Partyka-Jankowska, M. Zajac A.I. Chumakov
DIFFUSION JUMPS OF SINGLE ATOMS INTO VACANCIES IN AN IRON
MONOLAYER (EDITORS' CHOICE)
Phys.Rev.B 80, 115406 (2009) EDITORS' CHOICE

[15] S.Stankov, R.Rohlsberger, T.Slezak, et al.
PHONONS IN IRON: FROM THE BULK TO AN EPITAXIAL MONOLAYER
Phys.Rev.Lett. 99, 185501 (2007)

[16] G.Grübel, G.Vogl
PROBING DIFFUSION IN THE TIME-DOMAIN
Synchrotron Radiation News 15, No.4, 14-17 (2002)

[17] L.-M.Stadler, B.Sepiol, R.Weinkamer, M.Hartmann, P.Fratzl, J.W.Kantelhardt,
F.Zontone, G.Grübel, G.Vogl
LONG TERM CORRELATIONS DISTINGUISH COARSENING MECHANISMS IN
ALLOYS
Phys.Rev.B 68, 80101(R) (2003)

[18] M.Leitner, B Pfau, B.Sepiol, L.-M. Stadler, G.Vogl
INFLUENCE OF NEIGHBOURHOOD ON ATOMIC MOTION STUDIED BY
COHERENT X RAYS
Nature Materials 8, 717 (2009)
Siehe auch Diskussion der Arbeit:
G.B.Stephenson, A.Robert, G.Grübel,
NEWS AND VIEWS: REVEALING THE ATOMIC DANCE
Nature Materials 8, 702 (2009)

[19] G.Vogl
FUTURE DIFFUSION STUDIES WITH NEW X-RAY SOURCES
Hyperfine Interactions 204, 65-70 (2012)

[20] G. Vogl, M. Smolik, L. Stadler, M. Leitner, F. Essl, S. Dullinger, I. Kleinbauer, J.
Peterseil
MODELLING THE SPREAD OF RAGWEED: EFFECTS OF HABITAT, CLIMATE
CHANGE AND DIFFUSION
Eur. Phys. J. Special Topics 161, 167-173 (2008)

M.G. Smolik, S. Dullinger, F. Essl, I. Kleinbauer, M. Leitner, J. Peterseil, L.-M. Stadler, and G.Vogl
INTEGRATING SPECIES DISTRIBUTION MODELS AND INTERACTING PARTICLE SYSTEMS TO PREDICT THE SPREAD OF AN INVASIVE ALIEN PLANT
J. Biogeogr. 37, 411-422 (2010)

R.Richter, S.Dullinger, F. Essl, M. Leitner, G. Vogl
HOW TO ACCOUNT FOR HABITAT SUITABILITY IN WEED MANAGEMENT PROGRAMMES?
Biol.Invasions 15, 657-669 (2013)

R. Richter, U.E.Berger, S.Dullinger, F. Essl, M. Leitner, M. Smith, G. Vogl
SPREAD OF INVASIVE RAGWEED: CLIMATE CHANGE, MANAGEMENT AND HOW TO REDUCE ALLERGY COSTS
J.Applied Ecology 50, 1422-1430 (2013)

[21] G.Vogl
WANDERN OHNE ZIEL, Springer Verlag, Berlin, 2007
WEGE DES ZUFALLS, Spektrum Akadem.Verlag, Heidelberg, 2011