

FÜZYON NEDİR, DÜNYA'DA VE ALMANYA'DA ÖNEMLİ FÜZYON ARAŞTIRMALARININ DURUMU?

ARAŞTIRMA MERKEZLERİ VE STRATEJİK GELİŞMELER ÜZERİNE BİR İNCELEME

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr. Fizik Y.Müh. , ybatakan4@gmail.com. Almanya, 19.09.2026

1. Füzyon Nedir?

Füzyon (kaynaşma), Güneş'te ve diğer yıldızlarda oluşan ve onları besleyen fiziksel olaylar dizisidir. Hidrojenin döteryum ve trityum adı verilen izotopları gibi iki hafif atom çekirdekleri, çok yüksek sıcaklık ve basınç altında birbirlerine yaklaşıp birleştiğinde daha ağır çekirdekler (helyum) ile birlikte yüksek enerjili nötronlar açığa çıkar. Bu birleşme sırasında ortaya çıkan kütle farkı, Einstein'ın $E=mc^2$ eşitliğine göre büyük miktarda enerjiye dönüşür.

Füzyonu çekici kılan; kullanılan yakıtın (döteryum deniz suyunda bol miktarda bulunur, trityum ise reaktör içinde lityumdan üretilebilir) pratik olarak sınırsız olması, sürecin sera gazı salımı içermemesi ve günümüzün bilinen fisyon (nükleer bölünme) reaktörlerinde ortaya çıkan uzun ömürlü yüksek radyoaktif atıklar üretmemesidir. Buna karşın, füzyonu kontrollü ve sürekli biçimde gerçekleştirmek; plazmanın (aşırı ısınmış, iyonlaşmış gaz halindeki yakıt) yeterince yüksek sıcaklık, yoğunluk ve süre boyunca bir arada tutulmasını gerektirdiğinden, çok büyük bir bilim ve mühendislik sorunudur.



Soldan sağa: Şekil 1: Wendelstein 7-X stellaratörü, Max-Planck Plazma Fiziği Enstitüsü (IPP), Greifswald, Almanya,

Şekil 2: ITER tokamak tesisinin inşaatı, Cadarache, Fransa.

Şekil 3: ASDEX Upgrade tokamak deney tesisi, Max-Planck Plazma Fiziği Enstitüsü (IPP), Garching, Almanya

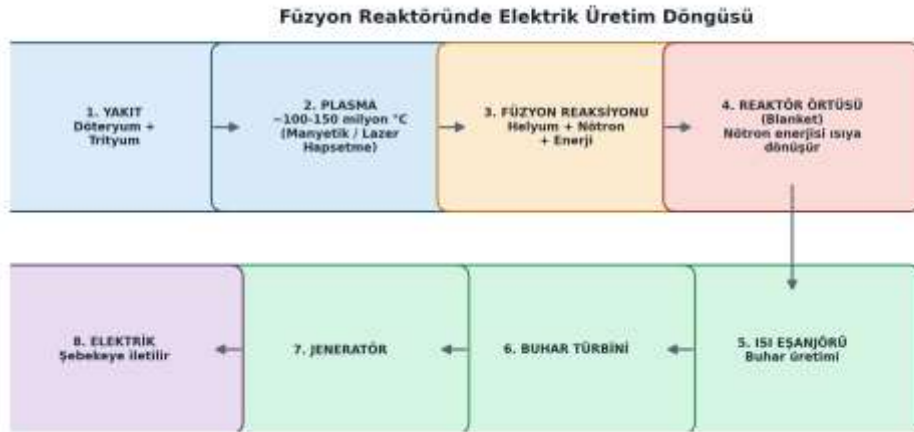
Füzyon Reaktörleri Elektrik Nasıl Üretecek?

Füzyon santralleri, ısıyı elde etme yöntemi dışında konvansiyonel termik santrallere benzer bir mantıkla ileride elektrik üreteceklerdir:

- Yakıt, manyetik hapsetme (tokamak/stellarator) ya da lazer tahrikli (atalet) yöntemlerle $\sim 100-150$ milyon $^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılarak plazma haline getirilir.
- Bu sıcaklıkta çekirdekler birleşir; helyum ve yüksek enerjili nötronlar açığa çıkar.
- Nötronlar, reaktörü saran "reaktör örtüsünde" (blanket) tutulup enerjilerini ısıya çevirir; aynı örtü genellikle yeni trityum yakıtının üretildiği (breeding) yerdir.
- Bu ısı enerjisi, ısı çeviricisinde (eşanjöründe) suyu buhara dönüştürür; buhar bir türbini, türbin de jeneratörü döndürerek elektrik üretir ve elektrik şebekeye aktarılır.

Yani füzyon santralinin "yeni" kısmı yalnızca ısı kaynağıdır (plazma); ısıdan elektrığe dönüşüm zinciri bugünkü termik santral teknolojisiyle örtüşür. ITER gibi tesisler elektrik üretmeden yalnızca işin fizikini kanıtlamayı hedeflerken, CFS'nin Commonwealth Fusion Systems özel şirketi) ARC'ı (Affordable Robust Compact ilk füzyon elektrik santrali) ve İngiltere STEP'i (Spherical Tokamak for Energy Production)

doğrudan şebekeye elektrik vermeyi amaçlayan ilk kuşak araştırma santralleridir (**Tüm kısaltmaların açılımları yazının sonundadır**).



Şekil 4: Bir füzyon reaktöründen elektrik üretimine giden temel süreç döngüsü.

2. Dünya'da Öne Çıkan Füzyon Araştırmaları

Füzyon enerjisi alanında dünya genelinde hem devlet destekli büyük uluslararası projeler hem de hızla büyüyen özel sektör girişimleri yer almaktadır. **Fusion Industry Association**'ın **2026 raporuna göre**, özel füzyon şirketleri **2021'den bu yana toplam 14,2 milyar USD'yi aşan bir sermaye toplamış**; yalnızca Temmuz 2026'ya kadar geçen bir yılda ise **4,5 milyar USD'lik yeni yatırım çekmiştir**. Avrupa Birliği'nin Fusion for Energy (F4E) kurumunun ilk küresel füzyon eğilimleri raporuna göre ABD toplam yatırımda (7,38 milyar €) ve özel sermaye çekiminde önde giderken, Çin devlet destekli kamu yatırımında (5,45 milyar €) liderdir; AB ise ITER'e yaptığı aynı katkılar ve bilimsel üretimiyle öne çıkmaktadır.

Aşağıdaki tablo, ülke/bölgelere göre öne çıkan başlıca füzyon araştırma ve geliştirme projelerini, kullanılan teknolojiyi, hedeflenen kapasiteyi ve yaklaşık yatırım tutarlarını özetlemektedir. Tutarlar kamuya açık haber kaynakları ve kurumsal açıklamalardan derlenmiş olup döviz kuru dalgalanmaları ve proje takvimlerindeki değişiklikler nedeniyle yaklaşık değerlerdir.

Ülke / Bölge	Proje / Kurum	Teknoloji	Hedef Kapasite	Yaklaşık Yatırım (USD)	Durum
Uluslararası (35 ülkenin katılımıyla)	ITER (Fransa, Cadarache)	Manyetik (Tokamak)	500 MW ısı gücü ($Q \geq 10$) — deneysel, elektrik üretmeyecek	~24 milyar USD ve üzeri (toplam proje bütçesi)	İnşaat ~%73; ilk plazma 2034 hedefli
ABD	Commonwealth Fusion Systems – SPARC / ARC	Manyetik (Kompakt Tokamak)	SPARC: 140 MW (10 sn atımlarla) ARC: 400 MWe (şebeke ölçekli)	~4 milyar USD (toplanan özel sermaye)	SPARC 2026'da faaliyete başlıyor; ARC 2030'ların başı
Çin	CFETR (EAST'in devamı)	Manyetik (Tokamak)	1 GW (uzun vadeli hedef)	Yıllık ~2,2 milyar USD; 2026-2030 planı: 15 milyar USD	Geliştirme aşamasında; ilk plazma ~2035 hedefli
Almanya (daha başkaları yazıda var)	Wendelstein 7-X (IPP) + Proxima Fusion demo tesisi	Manyetik (Stellarator)	W7-X deneysel; Proxima demo tesisi planlama aşamasında	Ulusal strateji: ~2,2 milyar USD (2 milyar €); Proxima: ~650 milyon USD (600 milyon €)	W7-X faal; demo tesis için saha/tasarım çalışmaları sürüyor

Ülke / Bölge	Proje / Kurum	Teknoloji	Hedef Kapasite	Yaklaşık Yatırım (USD)	Durum
İngiltere	STEP Programı (UKAEA)	Manyetik (Sferik Tokamak)	Şebekeye elektrik verecek demo santral	~3,3 milyar USD (2,5 milyar £, 2030'a kadar)	Tasarım ve geliştirme aşamasında
Güney Kore	K-DEMO / KSTAR	Manyetik (Tokamak)	Demo güç santrali	~941 milyon USD (1 trilyon KRW planlanan)	Planlama ve erken yatırım aşamasında
Japonya	JT-60SA	Manyetik (Tokamak)	Halen faal en büyük tokamak (deneysel)	Ulusal fonlama + AB ortaklığı	Faal; ITER'e yönelik destek deneyleri sürüyor

Tablodan da görüleceği üzere, ABD özel sektör odaklı bir modelle (Commonwealth Fusion Systems, TAE Technologies, Helion Energy gibi şirketler aracılığıyla) öne çıkarken; Çin devlet destekli, büyük ölçekli ve hızlandırılmış bir program izlemektedir. Avrupa'da ise ITER'e yapılan ortak katkıların yanında, Almanya ve Birleşik Krallık kendi ulusal stratejileri çerçevesinde hem kamu hem özel sermayeyi bir araya getiren modeller geliştirmektedir. Bu çerçevede Almanya'nın konumu, raporun devamında ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

3. Almanya'da Füzyon Araştırmalarına Giriş

Almanya, hem manyetik hapsedme hem de atalet (lazer) füzyonu alanlarında onlarca yıllık birikime sahip araştırma altyapısıyla bu alanda dünya çapında öncü ülkeler arasında yer almaktadır. Devlet destekli bir eylem planı ve yakın zamanda kurulan araştırma merkezleri (hub¹) çerçevesinde, büyük araştırma enstitüleri, üniversiteler ve genç teknoloji şirketleri, Almanya topraklarında ilk füzyon santralinin hayata geçirilmesi hedefiyle yakın işbirliği içinde çalışmaktadır.

Bu bölüm, Almanya'daki başlıca füzyon araştırma kurumlarını, bunların uzmanlık alanlarını ve devlet tarafından desteklenen yeni araştırma hub'larını sistematik bir çerçevede ele almaktadır. İnceleme; büyük araştırma enstitüleri, bilim-endüstri işbirliği hub'ları ve destekleyici kurumlar olmak üzere üç ana eksen etrafında yapılandırılmıştır.

4. Önde Gelen Büyük Araştırma Enstitüleri

Almanya'daki füzyon araştırmalarının omurgasını, devlet destekli büyük araştırma kurumları oluşturmaktadır. Bu kurumlar, hem temel plazma fiziği hem de reaktör malzemeleri ve yakıt döngüsü gibi uygulamalı alanlarda çalışmalar yürütmektedir.

4.1. Max-Planck Plazma Fiziği Enstitüsü (IPP)

Max-Planck Plazma Fiziği Enstitüsü, manyetik hapsedme alanında dünya çapında öncü kabul edilen kurumdur. Garching (Münih yakınlarında) yerleşkesinde, bir tokamak tipi deney tesisi olan ASDEX

¹Hub: İngilizce kökenli bir sözcük olup asıl anlamı “merkez” veya “göbek”dir (bir tekerleğin tüm parmaklıklarının bağlandığı merkez noktası). Bilim ve teknoloji literatüründe mecazi olarak, farklı kurumların (kamu araştırma enstitüleri, üniversiteler, start-up'lar) bir araya gelerek ortak bir hedef doğrultusunda işbirliği yaptığı merkezi platform ya da işbirliği ağı anlamında kullanılır.

Upgrade işletilmektedir. Greifswald yerleşkesinde ise Wendelstein 7-X adlı, dünyanın en büyük stellarator tipi füzyon tesisi bulunmaktadır.

4.2. Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü (KIT)

Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü, füzyon reaktörleri için gerekli teknolojik bileşenlerin geliştirilmesinde küresel ölçekte öncü bir konumdadır. KIT bünyesinde yer alan Mat-Trix Yetkinlik Merkezi, aşırı koşullara dayanıklı malzeme araştırmalarına ve füzyon reaktörleri açısından kritik önem taşıyan trityum yakıt döngüsüne odaklanmaktadır.

4.3. Jülich Araştırma Merkezi (FZJ)

Jülich Araştırma Merkezi bünyesindeki Enerji ve İklim Araştırmaları Enstitüsü (IEK-4), plazma-duvar etkileşimleri ile füzyon reaktörlerine yönelik malzeme geliştirme çalışmalarına yoğun biçimde odaklanmaktadır.

4.4. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

Rostock'ta yeni kurulan ve Rostock Üniversitesi ile işbirliği içinde faaliyet gösteren HEDI Enstitüsü, füzyon hedeflerinin (target) içinde gerçekleşen süreçlerin anlaşılmasına yönelik olarak yüksek enerji yoğunluklu fizik alanında çalışmalar yürütmektedir.

5. Yeni Araştırma Merkezleri (Hub): Bilim ve Endüstri İşbirliği

Almanya Federal Eğitim ve Araştırma Bakanlığı, bilimsel bulguların ekonomiye aktarımını hızlandırmak amacıyla üç merkezi araştırma merkezini desteklemektedir. Bu merkezler, kamu araştırma kurumları ile özel sektörden genç teknoloji şirketlerini bir araya getiren yenilikçi bir işbirliği modeli sunmaktadır.

5.1. “STRIDE²” Merkezi (Manyetik Füzyon – Stellarator)

Garching'deki IPP tarafından koordine edilen bu merkez, Proxima Fusion ve Gauss Fusion adlı şirket ayrılmalarıyla (spin-off) birlikte yürütülmektedir. **Stellaris adı verilen planlanan bir demonstrasyon tesisinin, eski Gundremmingen Nükleer Santrali arazisinde inşa edilmesi öngörülmektedir.**

5.2. “Vega” Merkezi (Lazer / Atalet Füzyonu)

Eski Biblis Nükleer Santrali arazisinde konumlanan bu Merkez'in bünyesinde, Focused Energy ve Marvel Fusion adlı şirketler lazer tahrikli füzyon üzerine araştırmalar yürütmektedir.

5.3. Hamburg ve Schleswig-Holstein Füzyon Ar-Ge Kampüsü

Röntgen lazeri European XFEL'in de dahil olduğu bu ortak proje, lazerle tahrik edilen yakıt kürecikleri (hedefler) üzerine araştırmaları kapsamaktadır.

6. Diğer Katkı Sağlayan Kurumlar

²STRIDE: BMFTR (Almanya Federal Eğitim, Araştırma ve Uzay Bakanlığı) tarafından kamuya açık duyurularda bir marka/proje adı olarak kullanılmaktadır; harf harf açılımına (kısaltmanın uzun karşılığına) dair resmi bir açıklama şu ana kadar yayımlanmamıştır. Benzer biçimde “VEGA” ve “MAT-TRIX” adları da klasik bir kısaltmadan çok proje markası olarak kullanılmaktadır.

- Fraunhofer Kurumu: IFE Targetry Hub bünyesindeki Fraunhofer IAF gibi birçok enstitü; yüksek güçlü lazerler, sensör teknolojileri ve füzyon reaktörleri için dayanıklı malzemeler gibi temel teknolojiler üzerinde çalışmaktadır.
- Darmstadt Teknik Üniversitesi: Almanya'da atalet füzyonu araştırmalarına yönelik akademik bir merkez konumundadır.

7. Teknoloji Yollarının Karşılaştırılması

Almanya'daki füzyon araştırmaları, temel olarak iki teknolojik yaklaşım etrafında şekillenmektedir: manyetik hapsedme (stellarator ve tokamak) ile atalet (lazer) füzyonu. Aşağıdaki tabloda bu iki yaklaşımın öne çıkan araştırma merkezleri ve temel hedefleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Teknoloji Yolu	Öne Çıkan Yerleşim Yerleri	Temel Araştırma Hedefi
Manyetik Hapsedme (Stellarator ve Tokamak)	Garching, Greifswald, Jülich, Gundremmingen	100 milyon °C üzerindeki sıcaklıklarda manyetik alanlar aracılığıyla plazmanın sürekli olarak hapsedilmesi.
Atalet (Lazer) Füzyonu	Biblis, Hamburg, Rostock, TU Darmstadt	Ultra kısa ve yüksek enerjili lazer darbeleri kullanılarak yakıt hedeflerinin tutuşturulması.

8. Değerlendirme ve Sonuç

Almanya'daki füzyon araştırma ekosistemi, uzun soluklu bilimsel birikime sahip büyük araştırma enstitüleri ile yeni kurulan, endüstri odaklı merkez yapılarının bir araya gelmesiyle güçlü ve çok katmanlı bir yapı sergilemektedir. Özellikle eski nükleer santral alanlarının (Gundremmingen, Biblis) yeni füzyon demonstrasyon tesislerine dönüştürülmesi planı, hem altyapı sürekliliği hem de sembolik bir enerji dönüşümü anlatısı açısından dikkat çekicidir.

Manyetik hapsedme alanında Wendelstein 7-X ile edinilen deneyim ve atalet füzyonu alanında özel sektör start-up'larının artan rolü, Almanya'yı hem kamu hem de özel sermaye destekli füzyon araştırmalarında Avrupa'nın önde gelen aktörlerinden biri konumuna taşımaktadır. Bununla birlikte, ticari ölçekte bir füzyon santralinin gerçekleştirilmesi hâlâ orta-uzun vadeli bir hedef olarak değerlendirilmelidir; malzeme dayanıklılığı, trityum yakıt döngüsünün endüstriyel ölçekte yönetimi ve maliyet etkinliği gibi konularda önemli teknik zorlukların aşılması gerekmektedir. Dünya genelinde ABD'nin özel sermaye ağırlıklı hızı ve Çin'in devlet destekli büyük ölçekli programı ile karşılaştırıldığında, Almanya'nın kamu-özel sektör işbirliğine dayanan modeli, Avrupa'nın küresel füzyon yarışındaki rekabet gücünü belirleyecek önemli bir unsur olmaya devam edecektir.

Füzyon konusunda önceki yazılarımız:

[2025 Dünya Füzyon Projelerindeki Gelişmeler Ne Durumda Hazırlayan Yüksel Atakan 03.08.2025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)

[ABD'deki Füzyon Atılımı, Gerçek Bir Enerji Santraline Yol Açabilir Y. Atakan 09.09.2025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)

Kaynaklar

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR). "Fusion." Erişim tarihi: Eylül 2026.
 Heise Online. "Drei Forschungs-Hubs: Deutschland will Spitze in der Kernfusion werden." 29 Temmuz 2026.
 ZDFheute Nachrichten / 3sat NANO. "Experiment Kernfusion: Kann Deutschland im internationalen Wettbewerb mithalten?" 22 Şubat 2026.
 World Nuclear Association. "Nuclear Fusion Power." Erişim tarihi: Eylül 2026.
 ITER Organization. "In a Few Lines – What is ITER?" Erişim tarihi: Eylül 2026.

Fusion for Energy (F4E). "Global Fusion Energy Trends Report." Erişim tarihi: Eylül 2026.

Fusion Industry Association. "Fusion in the News" ve yıllık küresel füzyon endüstrisi raporu. Erişim tarihi: Eylül 2026.

Not: Bu rapor, çevrimiçi kamuya açık haber kaynakları ve kurumsal web sitelerinden derlenen bilgilerin akademik bir çerçevede sentezlenmesiyle hazırlanmıştır.

Kısaltmalar Sözlüğü

Aşağıdaki tabloda, raporda geçen kısaltmaların orijinal dildeki açıklamaları ve Türkçe karşılıkları/açıklamaları alfabetik sırayla listelenmiştir.

Kısaltma	Açılımı (orijinal dilde)	Türkçe Karşılığı / Açıklama
ARC	<i>Affordable, Robust, Compact</i>	Commonwealth Fusion Systems'in planladığı, şebekeye elektrik verecek ilk nesil demonstrasyon santrali kavramı.
ASDEX Upgrade	<i>Axially Symmetric Divertor Experiment – Upgrade</i>	IPP'nin Garching'deki (Almanya) tokamak tipi deney tesisi.
BMFTR	<i>Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt</i>	Almanya Federal Araştırma, Teknoloji ve Uzay Bakanlığı.
CFETR	<i>China Fusion Engineering Test Reactor</i>	Çin'in EAST'ın devamı niteliğindeki füzyon mühendisliği test reaktörü.
CFS	<i>Commonwealth Fusion Systems</i>	SPARC ve ARC projelerini yürüten ABD merkezli özel füzyon şirketi.
EAST	<i>Experimental Advanced Superconducting Tokamak</i>	Çin'in CFETR'den önceki deneysel süperiletken tokamak tesisi.
F4E	<i>Fusion for Energy</i>	Avrupa Birliği'nin ITER'e katkısını yöneten kurum.
FZJ	<i>Forschungszentrum Jülich</i>	Jülich Araştırma Merkezi (Almanya).
HEDI	<i>High Energy Density Initiative / Institute</i>	Rostock Üniversitesi ve HZDR işbirliğiyle kurulan, yüksek enerji yoğunluklu fizik ve atalet füzyonuna odaklanan yeni enstitü.
HZDR	<i>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</i>	Almanya'da HEDI'nin ortak kurucusu olan Helmholtz araştırma merkezi.
IEK-4	<i>Institut für Energie- und Klimaforschung – 4</i>	FZJ bünyesindeki Enerji ve İklim Araştırmaları Enstitüsü (plazma-duvar etkileşimleri).
IPP	<i>Max-Planck-Institut für Plasmaphysik</i>	Max-Planck Plazma Fiziği Enstitüsü (Garching ve Greifswald, Almanya).
ITER	<i>International Thermonuclear Experimental Reactor</i>	Fransa'da inşa edilen, 35 ülkenin ortak katkısıyla yürütülen dünyanın en büyük deneysel füzyon reaktörü.
K-DEMO	<i>Korean Demonstration (Fusion) Power Plant</i>	Güney Kore'nin planladığı füzyon demonstrasyon santrali.
KIT	<i>Karlsruher Institut für Technologie</i>	Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü (Almanya).
KSTAR	<i>Korea Superconducting Tokamak Advanced Research</i>	Güney Kore'nin süperiletken tokamak deney tesisi.
KRW	<i>Korean Won</i>	Güney Kore para birimi (Kore Wonu).
JT-60SA	<i>Japan Torus-60 Super Advanced</i>	Japonya'nın halen faal olan, dünyanın en büyük deneysel tokamak'ı.
MAT-TRIX	—	KIT bünyesindeki, füzyon malzemeleri ve trityum yakıt döngüsüne odaklanan yetkinlik merkezinin marka adı (klasik bir kısaltma değildir).
Q ($Q \geq 10$)	<i>Enerji kazanç faktörü (fusion gain factor)</i>	Reaktörden elde edilen füzyon gücünün, plazmayı ısıtmak için verilen güce oranı; $Q \geq 10$, üretilen enerjinin harcanan enerjinin en az 10 katı olması hedefini ifade eder.
STEP	<i>Spherical Tokamak for Energy Production</i>	Birleşik Krallık'ın (UKAEA) planladığı, şebekeye elektrik verecek sferik tokamak demonstrasyon programı.
STRIDE	—	IPP koordinesinde yürütülen, manyetik füzyon (stellarator) odaklı Alman araştırma hub'ının marka/proje adı; resmi harf harf açılımı yayımlanmamıştır.
UKAEA	<i>United Kingdom Atomic Energy Authority</i>	Birleşik Krallık Atom Enerjisi Kurumu.
VEGA	—	Eski Biblis Nükleer Santrali arazisinde kurulan, lazer/atalet füzyonu odaklı Alman araştırma hub'ının marka/proje adı; resmi harf harf açılımı yayımlanmamıştır.
XFEL	<i>X-ray Free-Electron Laser</i>	Hamburg merkezli, röntgen lazeri kullanan Avrupa araştırma tesisi (European XFEL).
Not: "—" işareti, ilgili adın resmi/açık bir harf harf açılımının bulunmadığı, bunun yerine bir proje veya marka adı olarak kullanıldığı durumları belirtir.		