

Herstellung von linksgedrehtem Zucker (L-Glucose): Techniken, Alternativen und Perspektiven

1. Techniken zur Herstellung von L-Glucose

Chemische Synthese: L-Glucose kommt in der Natur praktisch nicht vor und muss daher synthetisch erzeugt werden ¹. Es existieren mehrstufige organisch-chemische Synthesewege, etwa ausgehend von der natürlichen D-Glucose (dem gewöhnlichen Traubenzucker). Ein klassisches Verfahren nutzt D-Glucose und führt über mehrere Schutzgruppen- und Umbauschritte (z.B. via **Gulo-** und **Glucono-**Lacton-Zwischenprodukte) schließlich zur L-Glucose ². Alternativ wurden Verlängerungsreaktionen ausgehend von anderen **L-Zuckern** wie L-Arabinose erforscht, um daraus L-Glucose aufzubauen ³. Solche rein chemischen Routen sind jedoch sehr aufwändig und teuer: L-Glucose war zwar einst als kalorienarmer Süßstoff im Gespräch, wurde aber nie vermarktet, da die Herstellungskosten zu hoch waren ⁴. Bis heute bleibt L-Glucose deshalb ein teurer Labor-Chemikalienstandard und kein Massenprodukt.

Enzymatische Verfahren: Fortschritte in der Biochemie haben zu spezifischeren Ansätzen geführt. Prinzipiell lässt sich L-Glucose durch **Enzymreaktionen** aus anderen Zuckern herstellen. Eine Möglichkeit ist die Umwandlung von **L-Fructose** (dem L-Spiegelbild der Fructose) zu L-Glucose mittels Isomerase-Enzymen ⁵. So wurde gezeigt, dass ein *D-Xylose-Isomerase*-Enzym aus *Candida utilis* L-Fructose zu L-Glucose isomerisieren kann ⁵. Ähnlich konnte ein genetisch veränderter *Klebsiella pneumoniae*-Stamm (mit konstitutiver Expression einer D-Arabinose-Isomerase) L-Glucose aus L-Fructose bilden – mit einer Ausbeute von etwa **35 %** im Gramm-Maßstab ⁵. Eine andere elegante enzymatische Route nutzt die Aufteilung und Wieder-Zusammenführung kleinerer Bausteine: Beispielsweise kann man aus den drei-Kohlenstoff-Bausteinen **Dihydroxyacetonphosphat** und **L-Glycerinaldehyd** mittels Aldolasen gezielt L-Glucose aufbauen (ein mehrstufiges Enzymverfahren in vitro) ⁶. Auch eine Sequenz mehrerer biotechnologischer Reaktionen ist denkbar, wie sie im „**Izumoring**“-Konzept aus Japan beschrieben wird. Dieses Strategiekonzept zeigt, wie man von D-Glucose als günstigem Rohstoff schrittweise alle seltenen Zucker (darunter L-Glucose) über enzymatische Isomerisierungen, Epimerisierungen und Oxidationen erreichen kann ⁷ ⁸. Ein Beispiel: **D-Sorbitol** (die Alkoholform der D-Glucose) lässt sich durch bestimmte Bakterien oder Enzyme zunächst zu **L-Sorbose** oxidieren ⁹. L-Sorbose ist ein Ketohexose-Zucker, der dann über eine Isomerase in L-Fructose und schließlich in L-Glucose umgewandelt werden kann ⁵. Yadav und Mitarbeiter demonstrierten etwa ein System mit immobilisierter **Galactose-Oxidase** (plus Katalase zur Nebenproduktbeseitigung) auf einem Träger, um aus D-Sorbitol direkt L-Glucose zu synthetisieren ¹⁰. Hier wird D-Sorbitol enzymatisch an einer bestimmten Stelle oxidiert und in Folge zu L-Glucose umgesetzt. Solche **biokatalytischen Ansätze** sind vielversprechend, da sie selektiv arbeiten und mildere Bedingungen erfordern als klassische Chemiesynthesen. Die Herausforderung besteht jedoch oft in der Beschaffung der passenden Ausgangssubstanzen (z.B. L-Fructose oder L-Sorbose sind selbst selten) und in der Gleichgewichtsbegrenzung der Isomerase-Reaktionen. Oft entstehen Mischungen, die aufgereinigt werden müssen, und die Enzyme müssen stabil und effizient sein. Dennoch konnten durch gentechnische Optimierungen bereits **robustere Enzyme** und ganze **Biotransformationswege** entwickelt werden ¹¹,

sodass heutzutage fast jeder Monosaccharid theoretisch auf enzymatischem Weg zugänglich ist ¹² – zumindest im Labormaßstab.

Mikrobiologische/bioverfahrenstechnische Ansätze: Ideal wäre es, L-Glucose *fermentativ* in Mikroorganismen herzustellen, ähnlich wie Ethanol oder Zitronensäure, um kostengünstige Massenproduktion zu ermöglichen. Doch natürliche Mikroorganismen verstoffwechseln fast ausschließlich die normalen D-Zucker und produzieren keine L-Glucose. Ein vollständiger Stoffwechsel, der **L-Zucker** produziert, ist in der lebenden Natur nicht bekannt. Es gibt jedoch Versuche, Bakterien so zu modifizieren, dass sie bestimmte L-Zucker als Produkte abgeben. Beispielsweise wurde ein E. coli-Stamm dahingehend verändert, dass er L-Aminosäuren und L-Zuckeralkohole umsetzt, um seltene L-Zucker zu gewinnen ⁵. Ein anderer Ansatz ist, mikrobielle Nebenwege zu nutzen: In der Vitamin-C-Industrie wird etwa mittels *Gluconobacter*-Bakterien aus D-Sorbitol der seltene **L-Sorbose** in großen Mengen produziert. An solche etablierte Prozesse könnte man anknüpfen, um L-Sorbose weiter zu L-Glucose umzusetzen (chemisch oder enzymatisch wie oben beschrieben). Tatsächlich wurde berichtet, dass gewisse Mikroben L-Glucitol (L-Sorbitol) über L-Sorbose und L-Tagatose bis zu L-Galactose abbauen – eine Art natürlich vorhandener Spiegel-Stoffwechselweg, der dem Izumoring entspricht ¹³. Diese Erkenntnis lässt hoffen, dass man in Zukunft ganze **Stoffwechselkaskaden** in Mikroorganismen bauen kann, die von einem günstigen Substrat (z.B. Glucose oder Sorbit) zu L-Glucose führen. Bislang gibt es aber keinen industriellen Fermentationsprozess für L-Glucose. Die meisten Forschungsansätze kombinieren daher **Bio- und Chemo-Katalyse**. Ein Patent aus Japan (Horwath & Colonna 1982) beschreibt z. B. die Isomerisierung von L-Glucose zu L-Fructose und zielt darauf ab, L-Glucose in größeren Mengen kostengünstig herzustellen ¹⁴. Generell sind jedoch *begrenzte Ausbeuten* und *aufwändige Aufarbeitung* zentrale Probleme. Die geringe Verfügbarkeit von L-Glucose spiegelt das wider: seltene Zucker wie L-Glucose sind nach wie vor nur in kleinen Mengen verfügbar, da die Synthesemethoden begrenzt und teuer sind ¹⁵.

Bewertung der Verfahren: Zusammenfassend gibt es also *verschiedene Methoden*, um L-Glucose herzustellen, jedoch alle mit Herausforderungen:

- **Chemische Synthesen** liefern reines L-Glucose, sind aber mehrstufig, ressourcenintensiv und teuer (hoher Aufwand pro kg Zucker) ⁴. Für Privatanwender sind sie praktisch nicht zugänglich.
- **Enzymatische/biotechnologische Verfahren** sind selektiver und milder. Sie nutzen z. B. spezielle Isomerasen oder Aldolasen, um aus einem Vorläufer (L-Fructose, L-Sorbose etc.) L-Glucose zu erzeugen ⁵. Hier liegen die größten Fortschritte der letzten Jahre. Das Problem ist oft, dass man erst einen geeigneten L-Zucker als Ausgangsstoff produzieren muss und dass Gleichgewichtsreaktionen nie 100 % Ausbeute an L-Glucose liefern. Durch Kopplung mehrerer Schritte (Kaskaden) und gentechnisch optimierte Enzyme konnten aber zumindest Labormengen effizienter erzeugt werden (z. B. 35 % Ausbeute in einem Schritt) ¹⁶.
- **Mikrobielle Fermentation** wäre theoretisch am günstigsten (ähnlich wie Insulinproduktion in Bakterien oder Fermentation von D-Glucose zu Bioethanol). Doch da Bakterien keine L-Glucose produzieren (und sie meist nicht einmal verwerten können), ist dies nur über Umwege denkbar. Mutanten oder metabolisch enginierte Stämme könnten L-Glucose als *Sekundärmetabolit* ausstoßen, aber es gibt bisher keinen etablierten Prozess. Forschung in synthetischer Biologie versucht, Stoffwechselwege so „umzubiegen“, dass aus D-Zuckern ihre L-Spiegelbilder entstehen – das steht jedoch noch am Anfang.

Fazit (Herstellung): L-Glucose lässt sich also heute **im Labor** herstellen, jedoch (noch) nicht kostengünstig im industriellen Maßstab. Die **vielversprechendsten Ansätze** sind kombinierte enzymatische Prozesse, die

auf preiswerten Bulk-Zuckern aufbauen. So könnte man z. B. aus Stärke via Glucose → Sorbit → L-Sorbose → L-Glucose einen Pfad entwickeln, wenn die entsprechenden Biokatalysatoren weiter verbessert werden. An solchen Prozessen – oft unter dem Stichwort *Rare Sugar Production* – wird weltweit geforscht. Dennoch bleibt L-Glucose vorerst ein teurer Spezialstoff. Ein Indikator: In der Literatur wird erwähnt, dass L-Glucose zwar kommerziell erhältlich ist, *aber zu prohibitiven Preisen* ³. Folglich sucht man entweder nach *besseren Verfahren* – oder man schaut auf Alternativen zu L-Glucose als Süßstoff.

2. Mirror-Image Microorganisms: Spiegelbildliche Mikroorganismen als Lösungsweg?

Die Aussage, dass „**mirror-image microorganisms**“ (also *chirale* Mikroorganismen mit entgegengesetzter Händigkeit) theoretisch der günstigste Weg zur L-Glucose wären, klingt faszinierend. Die Idee dahinter: Ein „spiegelbildliches“ Bakterium oder Hefezelle, deren Biochemie komplett auf L-Verbindungen basiert (L-Aminosäuren, L-Zucker etc.), könnte vielleicht L-Glucose genauso einfach herstellen und nutzen, wie normale Organismen D-Glucose produzieren und verstoffwechseln. Man könnte sich z. B. einen spiegelbildlichen Photosynthese-Organismus vorstellen, der aus CO₂ und Wasser L-Glucose aufbaut – im Prinzip eine **L-Pflanze** oder **L-Cyanobakterium**. Dann stünde L-Zucker in Fülle zur Verfügung. **Aber:** Die Realisierung solcher *Mirror-Life*-Organismen steht noch sehr weit am Anfang und ist von erheblichen Risiken begleitet.

Realisierbarkeit: Vollständig spiegelbildliche Mikroorganismen sind bislang *theoretisch* und wurden noch nicht erschaffen. Forscher haben allerdings in den letzten Jahren Fortschritte gemacht, **spiegelbildliche Biomoleküle** herzustellen – zum Beispiel **DNA und Proteine mit umgekehrter Händigkeit** (Enantiomere der natürlichen Moleküle) ¹⁷. Sogar funktionsfähige Enzyme in der D-Form (also Spiegel von natürlichen L-Proteinen) wurden synthetisiert. Diese Fortschritte deuten darauf hin, dass in Zukunft tatsächlich ein ganzes Spiegel-Bakterium gebaut werden *könnte*. Eine Arbeitsgruppe von 38 Wissenschaftlern – darunter namhafte Forscher wie George Church – schätzt, dass *mindestens noch ein Jahrzehnt Entwicklung* nötig ist, bis echte **Mirror-Bacteria** möglich wären ¹⁸ ¹⁹. Der Weg dahin erfordert die **vollständige chemische Synthese aller Zellbausteine** in spiegelbildlicher Form: von der Zellmembran über die Enzyme bis zum Erbgut. Ansätze gibt es, etwa synthetische Zellen in normaler Chiralität zusammenzubauen und dann alle Komponenten durch deren Spiegelbilder auszutauschen ²⁰. Bisher existieren jedoch *keine* lebenden Organismen, die L-Aminosäuren nutzen oder L-Zucker produzieren; allenfalls spezielle Enzyme in normalen Organismen können mal ein L-Molekül herstellen. Daher bleibt ein „mirror microbe“ vorerst ein Zukunftsprojekt.

Theoretischer Nutzen für L-Glucose: Wären solche spiegelbildlichen Organismen verfügbar, könnten sie tatsächlich eine elegante Lösung bieten. Ein Mirror-Bakterium würde *D-Glucose* (unsere normale Glucose) vermutlich als für sich *unverdaulich* empfinden, so wie unsere Bakterien L-Glucose ignorieren. Umgekehrt würde es *L-Nährstoffe* verwerten und dabei eventuell **L-Abfallprodukte** produzieren, die für uns interessant sind. Man könnte sich also vorstellen, einen Bioreaktor mit Mirror-Mikroben zu füttern – möglicherweise mit D-Glucose als „fremder“ Kohlenstoffquelle, die die Organismen nicht metabolisieren, aber vielleicht isomerisieren? Allerdings ist das Spekulation, denn ein echter Spiegelorganismus bräuchte seinerseits eine L-Kohlenstoffquelle. Realistischer wäre es, mirror-image Mikroben *autotroph* zu machen (z. B. CO₂-Fixierung), sodass sie von anorganischen Quellen aus L-Biomasse aufbauen, aus der man L-Glucose extrahieren könnte. **Kurzum:** Ja, rein hypothetisch könnten solche Organismen L-Zucker so billig wie

heutige Mikroben D-Zucker herstellen. Doch **die Risiken überwiegen** bei Weitem, sodass dieser Weg momentan von der Forschung eher *gebremst* als vorangetrieben wird.

Risiken und Biosicherheitsbedenken: Zahlreiche Wissenschaftler warnen davor, *spiegelbildliche Lebewesen* ohne umfassende Bewertung zu entwickeln. In Ende 2024 veröffentlichten Empfehlungen heißt es, Mirror-Life forme *enorme ökologische und gesundheitliche Risiken* ²¹ ²². Der Hauptgrund: Ein solcher Organismus wäre für das bestehende Ökosystem **unsichtbar und unkontrollierbar**. **Weder Fressfeinde noch Parasiten** könnten ein Spiegel-Bakterium effektiv attackieren, da alle Erkennungsmoleküle chiralspezifisch sind ²³ ²⁴. Damit fehlen natürliche Gegenspieler, die die Population in Schach halten – das spiegelbildliche Bakterium hätte also einen enormen Überlebensvorteil. Selbst wenn es langsam wüchse, *würde es kaum absterben*, weil normale Viren (Phagen) und Räuber (Protozoen) es nicht erkennen ²⁵ ²⁶. Ein entkommener Spiegel-Organismus könnte sich daher unbemerkt ausbreiten und Ökosysteme dauerhaft stören.

Noch gravierender: **Infektionsgefahr** für andere Lebewesen. Unsere Immunsysteme sind darauf trainiert, fremde Organismen anhand der chiralen Signaturen (etwa der L-Aminosäuren in Bakterienzellwänden) zu erkennen. Ein spiegelbildliches Bakterium trägt jedoch D-Aminosäuren und D-Zucker auf der Oberfläche – unsere Immunrezeptoren *würden es nicht als Keim erkennen* ²⁷. Basis-Abwehrmechanismen könnten versagen, so dass solche Mikroben ungehindert Infektionen verursachen könnten ²⁷. Gleichzeitig wären herkömmliche **Antibiotika** wahrscheinlich wirkungslos, da diese oft spezifisch an L-biotische Zielstrukturen binden ²⁸. Es entsteht das Schreckensszenario einer *nicht behandelbaren Infektion* durch einen Organismus, der im Verborgenen bleiben kann ²⁷ ²⁹. Zudem könnten Menschen, Tiere und Pflanzen die Stoffwechselprodukte dieser Mikroben nicht abbauen – man stelle sich z. B. ein Mirror-Bakterium vor, das eine schützende Schleimschicht aus L-Polysacchariden bildet, gegen die kein bekanntes Enzym ankommt.

Aus all diesen Gründen fordern Forscher strenge **Leitplanken und Debatten**, bevor man überhaupt versucht, Mirror-Life zu erschaffen ³⁰. In einem Science-Artikel 2024 wurde empfohlen, *derzeit keine spiegelbildlichen Mikroben zu erzeugen*, solange nicht überzeugend gezeigt werden kann, dass diese keine außergewöhnlichen Gefahren bergen ³⁰. Interessanterweise gehören zu den Unterzeichnern dieser Warnungen auch Wissenschaftler, die früher selbst die Vision von Mirror-Life vorangetrieben haben ³¹ – ein Zeichen, wie ernst man die Risiken inzwischen nimmt. Stattdessen solle man sich auf nicht-selbstreplizierende Spiegel-Biomoleküle beschränken, die für Medizin und Technik nützlich sein könnten ³². *Beispiel:* Spiegelproteine könnten als Medikamente dienen, die im Körper länger halten (weil normale Proteasen sie nicht abbauen). Solche Moleküle kann man jedoch auch *ohne lebende Spiegel-Organismen* durch chemische Synthese herstellen ³².

Fazit (Mirror-Organismen): Die Idee, mittels **spiegelbildlicher Mikroorganismen** billig L-Glucose zu produzieren, ist aus heutiger Sicht mehr Science-Fiction als realer Plan. Technologisch rückt die Möglichkeit zwar näher – die Bausteine für Leben mit umgekehrter Händigkeit werden Schritt für Schritt verfügbar ¹⁷ – doch die *ungeklärten Folgen* verhindern derzeit jegliche praktische Umsetzung. Sollte eines Tages ein Mirror-Mikroorganismus konstruiert werden, müsste er unter extremen Sicherheitsvorkehrungen bleiben. Für Privatinvestoren oder Unternehmen ist dieser Weg daher **keine greifbare Option**. Der Fokus richtet sich stattdessen auf konventionellere Methoden (siehe Punkt 1) und auf Alternativen zu L-Glucose, die ohne solche radikalen Ansätze auskommen.

3. Alternativen zum L-Zucker: Allulose und Arabinose

Da L-Glucose selbst schwierig und teuer herzustellen ist, lohnt ein Blick auf *andere Zucker*, die ähnliche Vorteile bieten (kalorienarm, gesundheitlich unbedenklich) und eventuell leichter verfügbar sind. Zwei Kandidaten, die oft genannt werden, sind **Allulose** und **Arabinose**.

Allulose (D-Psicose) – der „neue“ kalorienarme Zucker

Was ist Allulose? Allulose (chemisch **D-Psicose**) ist ein Monosaccharid und gehört zur Familie der „**seltenen Zucker**“. Es ist ein Epimer der Fructose (ein strukturell sehr ähnlicher Zucker) und kommt in der Natur nur in winzigen Mengen vor, z.B. in getrockneten Früchten, Feigen oder Maissirup ³³. Geschmacklich ist Allulose dem Haushaltszucker (Saccharose) sehr nahe: es liefert ca. **70 % der Süße** von Zucker ³⁴ und hat ein nahezu identisches Geschmacksprofil ohne auffälligen Nachgeschmack. Ein großer Vorteil ist jedoch, dass Allulose vom menschlichen Körper kaum verwertet wird. Es liefert nur etwa **0,2–0,4 Kilokalorien pro Gramm**, also rund **10 % der Kalorien** von normalem Zucker ³⁵. Studien zeigen, dass Allulose den Blutzuckerspiegel nicht erhöht und insulinneutral ist ³⁶ ³⁷. Es wird zum Großteil unverändert ausgeschieden bzw. minimal fermentiert, was auch bedeutet, dass es die Zähne nicht schädigt (kariogen ist) und im Vergleich zu Zuckeralkoholen wie Xylit weniger Verdauungsprobleme verursacht ³⁸ ³⁹. Allulose hat zudem ähnliche **funktionelle Eigenschaften** wie Zucker: es kann beim Backen karamellisieren und bräunen, trägt zur Masse bei und gefriert nicht aus in Speiseeis ³⁴ ⁴⁰. Dadurch eignet es sich hervorragend als *nahezu 1:1-Ersatz* für Zucker in vielen Rezepturen ⁴¹ – man muss lediglich etwas mehr nehmen (weil es weniger süß ist) oder die Süße mit Stevia/Erythrit auf das gleiche Level bringen ⁴².

Herstellung und Verfügbarkeit: Die natürliche Gewinnung von Allulose (z. B. aus Früchten) wäre extrem ineffizient. Stattdessen wird Allulose heute in der Regel **enzymatisch** aus Fructose hergestellt ⁴³. Ein **Enzym** (meist eine **D-Psicose-3-Epimerase** aus Mikroben) wandelt dabei Fructose in Allulose um. Industriell nutzt man als Ausgangsstoff oft Fructosesirup aus Maisstärke oder Rübenzucker; die Ausbeute pro Durchgang liegt typischerweise um 30 %, aber durch Recycling des Restfructose kann man ~70 % Gesamtausbeute erreichen. Große Ingredienzien-Hersteller wie **Tate & Lyle** (mit Partner Matsutani) haben solche Prozesse entwickelt und produzieren Allulose bereits kommerziell (in den USA unter dem Markennamen *Dolcia Prima* z. B.) ⁴³ ⁴⁴. In Asien ist Allulose ebenfalls schon verfügbar, etwa durch Firmen in Japan und Korea. Ein internationales Konsortium (Allulose Novel Food Consortium, **ANFC**) aus Unternehmen in Südkorea (Samyang), Japan (Matsutani), Europa (Cosun Beet Company) und den USA (Ingredion) bemüht sich derzeit darum, Allulose global voranzubringen ⁴⁵.

Rechtslage – warum (noch) nicht in der EU zugelassen? In vielen Ländern gilt Allulose bereits als **sicher** und ist zugelassen: z. B. in den **USA, Japan, Südkorea, Singapur, Mexiko** usw. ⁴⁶. In den USA hat die FDA Allulose als GRAS („Generally Recognized As Safe“) eingestuft und sogar entschieden, dass Allulose auf Nährwerttabellen *nicht* als Zucker angerechnet wird (weil es praktisch keinen Kalorienbeitrag leistet) ⁴⁷. In der **EU** hingegen fällt Allulose unter die **Novel-Food-Verordnung**. Das heißt, bevor es in Lebensmitteln verwendet werden darf, muss es ein Zulassungsverfahren durchlaufen. Bisher (Stand 2025) liegt eine solche Zulassung noch *nicht* vor. Wichtig: Allulose ist **nicht „verboten“** aufgrund konkreter Sicherheitsbedenken, sondern schlicht noch **nicht abschließend bewertet** ⁴⁸. Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (**EFSA**) fordert mehr Daten, vor allem Langzeitstudien, um eine umfassende Bewertung vorzunehmen ⁴⁸ ⁴⁹. Mehrere Anträge wurden bereits eingereicht und befinden sich in Prüfung ⁴⁹. Laut Konsortium ANFC wurde 2022 ein gemeinsamer Zulassungsantrag gestellt, und innerhalb von 2–3 Jahren hoffte man auf eine Entscheidung ⁵⁰. Allerdings gab es Verzögerungen: EFSA verlangte

zusätzliche Daten, sodass die Bewertung ins Stocken geriet ⁵¹ ⁵² . Die deutsche **BfR** (Bundesinstitut für Risikobewertung) untersuchte vorsorglich, ob Allulose ähnliche Risiken bergen könnte wie z. B. Trehalose (ein anderer seltener Zucker, der im Verdacht stand, bestimmte Krankenhauskeime zu begünstigen). Das BfR konnte aber *keine eindeutigen Schlüsse* ziehen und plädierte dafür, weitere Daten abzuwarten ⁵³ . Bis diese Hürden genommen sind, bleibt Allulose in der EU vorerst **nicht im Handel**. Einige Experten erwarten jedoch, dass Allulose mittelfristig zugelassen wird, da die bisherigen Studien eine gute Verträglichkeit zeigen und das Interesse sowohl von Verbraucher- als auch Herstellerseite groß ist ⁴⁸ ⁴⁹ .

Fazit Allulose: Allulose gilt als *vielversprechender Zuckerersatz*, der geschmacklich und funktional nah an Zucker herankommt, aber fast ohne Kalorien und Blutzuckerwirkung auskommt. Für Privatpersonen in der EU ist er momentan noch schwer erhältlich (da nicht zugelassen), während er in z. B. den USA bereits in diversen „Zero Sugar“-Lebensmitteln eingesetzt wird. Sollten Zulassungshürden fallen, könnte Allulose eine praktikable Alternative zu L-Glucose sein – zumal die Herstellung deutlich einfacher ist (auf Basis von Fructosesirup enzymatisch, anstatt komplexer chiraler Synthese). Für kleine Investoren dürfte Allulose im Novel-Food-Bereich interessant sein, allerdings dominieren hier bereits größere Ingredient-Unternehmen, die in Produktion und Dateninvestition vorne liegen.

L-Arabinose – ein natürlicher „Zucker-Blocker“ als Alternative?

Was ist Arabinose? *Arabinose* ist ein **Monosaccharid mit 5 Kohlenstoffatomen** (Pentose), das in der Natur vorkommt – vor allem als Bestandteil von Pflanzengummen und Hemicellulosen. Die in der Natur häufigere Form ist **L-Arabinose** (manchmal auch „Pflanzenzucker“ genannt). L-Arabinose schmeckt süß, allerdings nur etwa **50–60 % so süß wie Saccharose** ⁵⁴ . Rein vom Geschmack her ist sie relativ angenehm und hat kein starke Neben- oder Bittergeschmäcke. Weil L-Arabinose kein Glucose-Isomer ist, wird sie vom Körper *anders verstoffwechselt*: ein Großteil der L-Arabinose wird nicht absorbiert, sondern gelangt in den Dickdarm oder wird direkt ausgeschieden. Dadurch hat sie einen **sehr geringen Kalorienwert** (ähnlich wie andere nicht resorbierbare Zucker) und beeinflusst den Blutzucker kaum.

Besondere Eigenschaft – Zuckerblockade: Das wirklich Interessante an L-Arabinose ist ihre Wirkung als **Inhibitor des Sucrase-Enzyms** im Dünndarm. Sucrase (Saccharase) ist das Enzym, das normalen Haushaltszucker (Saccharose) in Glucose und Fructose spaltet, damit diese absorbiert werden können. L-Arabinose kann an Sucrase binden und es hemmen. Studien – auch am Menschen – haben gezeigt, dass bei gleichzeitiger Einnahme von L-Arabinose mit Saccharose die **Glucose- und Insulinspitzen im Blut deutlich geringer ausfallen** ⁵⁵ . Praktisch heißt das: L-Arabinose kann als „Zuckerblocker“ wirken. Zum Beispiel könnte ein Getränk, dem etwas L-Arabinose zugesetzt ist, den Zucker daraus nur teilweise ins Blut übergehen lassen. Diese Eigenschaft macht L-Arabinose für Diabetiker oder Figurbewusste interessant. Zudem gibt es Hinweise, dass unverdaute L-Arabinose im Dickdarm als **Präbiotikum** dienen kann (ähnlich wie andere Ballaststoff-Zucker) ⁵⁶ ⁵⁷ .

Verwendung und Zulassung: Anders als Allulose braucht L-Arabinose in der EU keine neuartige Zulassung – sie ist ein natürlicher Bestandteil traditioneller Lebensmittel (z. B. von Johannisbrotkernmehl, das bis zu ~10 % Arabinose-Einheiten enthält). L-Arabinose wird bereits **frei als Nahrungsergänzung** verkauft, oft in Pulverform. Ein Beispiel ist das Produkt *L-Arabinose Original* (SC Nutra, UK), das aus den **Akazienbäumen** gewonnen wird ⁵⁸ ⁵⁹ . Es wird beworben als „idealer Zuckerersatz oder Zuckerblocker“, den man vor kohlenhydratreichen Mahlzeiten einnehmen kann ⁵⁸ ⁶⁰ . Typische Dosierungen sind 1–3 Gramm vor einer süßen Mahlzeit. In Japan und den USA findet man L-Arabinose auch als **Zusatzzutat** in einigen „Blutzucker-schonenden“ Lebensmitteln (z. B. in bestimmten Limonaden oder Süßwaren). Geschmacklich muss man

bedenken, dass die Süßkraft nur halb so hoch ist – um die gleiche Süße wie 100 g Zucker zu erreichen, bräuchte man ~200 g L-Arabinose, was ökonomisch nicht sinnvoll ist. Deshalb wird L-Arabinose selten *allein* als Süßstoff verwendet, sondern eher in Kombination: z.B. man ersetzt einen Teil des Zuckers durch L-Arabinose, um den glykämischen Index zu senken, nimmt aber noch etwas intensiven Süßstoff hinzu, um die Süße auszugleichen.

Herstellung: Traditionell gewann man L-Arabinose durch **Hydrolyse pflanzlicher Fasern** (z. B. aus Maiskolbensproten, Johannisbrot oder Gummi arabicum). Das lieferte jedoch nur kleine Mengen mit erheblichem Aufwand. Moderne Methoden setzen zunehmend auf **biotechnologische Produktion**. Die Schweizer Firma **Evolva** etwa hat einen Fermentationsprozess entwickelt, bei dem Mikroorganismen L-Arabinose aus nachhaltigen Rohstoffen herstellen ⁶¹ ⁶². Evolva vermarktet L-Arabinose als natürlichen *Health Ingredient* und fördert Forschung zu dessen Anwendungen ⁶³. Die Reinheit des Endprodukts ist hoch, und die Produktion kann skalierbar erfolgen, was die Kosten senkt. Der Preis ist trotzdem momentan deutlich höher als der von Massen-Süßstoffen (als Pulver etwa 300 €/kg im Einzelhandel, wie das genannte Supplement). Für industrielle Anwendungen (Lebensmittelherstellung) dürften Großmengen aber günstiger zur Verfügung stehen, sobald die Nachfrage steigt.

Ist Arabinose eine echte Alternative zu L-Glucose? In mancher Hinsicht **ja**: L-Arabinose liefert Süße mit sehr wenig verfügbarer Energie, beeinflusst den Stoffwechsel kaum und hat sogar einen Zusatznutzen durch die Sucrase-Hemmung. Für Menschen, die ihren Zuckerkonsum reduzieren wollen, ist Arabinose *eine Option*, zumal sie – anders als L-Glucose – bereits legal und erhältlich ist. Insbesondere als **funktioneller Zusatz** (ein Teelöffel L-Arabinose im Dessert, um die Zuckerwirkung abzufedern) könnte sie relevant sein. Allerdings gibt es Einschränkungen: Die begrenzte Süßkraft und der relativ hohe Preis verhindern, dass Arabinose den Haushaltszucker komplett ersetzt. Geschmacklich ist pure Arabinose okay, aber man benötigt viel davon für Süße, was auch im Darm fermentiert werden würde – bei sehr hohen Mengen könnte das zu Blähungen führen (ähnlich wie bei anderen unverdaulichen Zuckern). Studien mit moderaten Dosen zeigten jedoch gute Verträglichkeit ⁵⁵.

Als **Alternative zu L-Glucose** – die ja hauptsächlich wegen ihrer Nicht-Verstoffwechselbarkeit interessant wäre – schneidet L-Arabinose insgesamt gut ab. Sie ist *biologisch verfügbar*, aber *physiologisch fast inert* bezüglich Blutzucker. Während L-Glucose unserem Körper fremd ist und unverwertet bleibt, ist L-Arabinose ein natürlicher Bestandteil von Ballaststoffen – der Körper kennt ihn und kommt damit klar (nur nutzt er ihn kaum). Ein weiterer Punkt: L-Arabinose kann – anders als L-Glucose – *nicht* direkt in Glucose umgewandelt werden vom Körper. Selbst wenn Bakterien im Dickdarm einen Teil verstoffwechseln, entsteht daraus eher kurzkettige Fettsäuren als Glucose. Insofern erfüllt sie den Zweck eines *kalorienarmen Zuckerersatzes* ebenfalls.

Fazit Arabinose: L-Arabinose ist eine **realistisch verfügbare Alternative** für bestimmte Anwendungen. Besonders für **DIY-Enthusiasten** und **kleine Lebensmittelhersteller** ist Arabinose attraktiv, weil sie ohne Novel-Food-Zulassung eingesetzt werden darf (z. B. in innovative Low-Carb-Rezepte). Man muss aber die geringere Süße berücksichtigen. In Kombination mit anderen Süßstoffen könnte Arabinose in Zukunft häufiger genutzt werden, um gesündere Zuckerprodukte zu entwickeln. Im Vergleich zu L-Glucose hat Arabinose den Vorteil, dass sie bereits natürlich vorkommt und einfacher zu beschaffen ist – jedoch kann sie reinen Zucker geschmacklich nicht 1:1 ersetzen, sondern eher dessen Auswirkungen mildern.

4. L-Glucose im DIY- oder Labormaßstab: Möglichkeiten und Grenzen

Viele Hobbychemiker oder Biotech-Tüftler fragen sich vielleicht, ob man **L-Glucose selbst herstellen** kann – sei es im Heimlabor oder Kleinstmaßstab. Die ehrliche Antwort ist: *Es ist außerordentlich schwierig*. Es gibt derzeit **keine einfache Maschine oder Heim-Kit**, das L-Glucose „auf Knopfdruck“ produziert. Die Herstellung erfordert fortgeschrittene chemische oder biochemische Verfahren (siehe Punkt 1), die in der Regel nur in gut ausgestatteten Laboren durchführbar sind.

Chemischer Labormaßstab: Theoretisch könnte ein geübter organischer Chemiker L-Glucose synthetisieren, indem er publizierten Protokollen folgt ². Man müsste reaktive Chemikalien handhaben, mehrstufige Synthesen über Tage/Wochen durchführen und Chromatographie zur Reinigung einsetzen. Das ist **nichts für Zuhause** ohne professionelle Ausrüstung. Zudem sind die Ausgangsstoffe – etwa spezielle geschützte Zuckerderivate – teuer. Selbst Universallabors kaufen L-Glucose daher oft lieber in kleinen Mengen zu Forschungszwecken, anstatt sie selbst zu synthetisieren. Doch auch das Kaufen ist kostspielig: L-Glucose wird von Chemikalienhändlern zu sehr hohen Preisen angeboten, was die geringe Verfügbarkeit widerspiegelt ³. Für eine Privatperson wäre das ökonomisch kaum vertretbar (einige hundert Euro pro Gramm sind möglich).

Biochemischer Ansatz im kleinen Maßstab: Angenommen, man hat Zugang zu bestimmten Enzymen, könnte man im Prinzip eine Mini-Produktion versuchen. Beispielsweise könnte man **D-Sorbit (Sorbitol)** und ein **Galactose-Oxidase**-Enzym besorgen und damit experimentieren, L-Glucose zu erzeugen (nach Art von Yadavs Methode) ¹⁰. Ebenso könnte man, wenn man **L-Fructose** irgendwoher bekommt, mit einer Xylose-Isomerase arbeiten, um einen Teil davon in L-Glucose umzuwandeln ⁵. Solche Experimente sind im Labor möglich – tatsächlich publizieren Forscher enzymatische Umwandlungen, bei denen am Ende einige Gramm L-Glucose herauskommen ¹⁶. Die Hürden für einen DIY-Ansatz sind jedoch: Wo bekommt man L-Fructose oder L-Sorbose in Reinform her? Wie isoliert man das Endprodukt L-Glucose aus der Reaktionslösung (typischerweise ist ein Gemisch mit unreaktierten Ausgangsstoffen vorhanden, das man per Ionenaustauscher oder Kristallisation trennen muss)? Und wie stellt man sicher, dass die Enzyme richtig arbeiten (Temperatur, pH, Ko-Faktoren etc.)? Diese Anforderungen übersteigen das, was man in einer heimischen Küche oder Hobbywerkstatt leisten kann. Sie erfordern zumindest ein semi-professionelles **Biotech-Setup** (Reaktorgefäße, Reinigungskits, analytische Geräte zur Erfolgskontrolle).

Keine fertige Maschine: Anders als etwa bei Heimbrauanlagen für Bier oder Destillen für ätherische Öle gibt es für Rare Sugars keine gebrauchsfertigen Geräte. Man kann zwar Labor-Bioreaktoren kaufen, aber das Know-how, um damit L-Glucose herzustellen, steckt in den Köpfen der Forscher, nicht in plug-and-play Geräten. Ein interessanter Vergleich: In Japan wurde das Konzept eines „*Rare Sugar's Syrup*“ entwickelt – ein Sirup aus verschiedenen seltenen Zuckern (hauptsächlich Allulose, Tagatose etc.), der bereits industriell hergestellt wird. Aber auch dieser wird in Fabriken mittels Enzymreaktionen produziert, nicht in Haushaltsgeräten.

Für jemanden, der dennoch experimentieren möchte, wäre vielleicht der gangbarste Weg: **L-Arabinose in L-Glucose umzuwandeln**. L-Arabinose ist (wie oben beschrieben) verfügbar. Es gibt tatsächlich chemische Methoden, aus L-Arabinose durch **Kettenverlängerung** L-Glucose zu gewinnen ³. Beispielsweise über eine **Nitroaldol-(Henry)-Reaktion** und nachfolgende Reduktionen ließe sich aus dem fünfkettigen Zucker ein sechs-kettiger bauen (dies wurde in der Literatur als Alternative getestet, um teure L-Glucose zu

umgehen) ³. Doch auch hier: Diese Reaktionen erfordern giftige Chemikalien (Nitromethan, starke Basen) und liefern Gemische, die man aufreinigen muss. Ohne professionelle Ausrüstung und Chemiekennntnisse ist das nicht durchführbar – und mit ihnen immer noch mühsam.

Sicherheit und Legalität: Zu bedenken ist auch, dass manche Chemikalien und Enzyme nicht frei verkäuflich an Laien abgegeben werden. Einiges fällt unter Chemikalienverbotsverordnung oder unterliegt zumindest Nachweispflichten. Enzyme kann man oft über spezialisierte Laborausrüster beziehen, aber nur als gewerblicher oder akademischer Kunde. Die DIY-Community im Bereich Chemie/Biologie muss daher oft auf offene Kooperation mit Unilaboren setzen, um an Materialien zu kommen.

Zusammengefasst: Die **Herstellung von L-Glucose zuhause** oder im Hobbylabor ist praktisch *nicht zugänglich*. L-Glucose bleibt ein High-Tech-Produkt, das eigens entwickelte Prozesse erfordert. Wer privat etwas in dieser Richtung tun möchte, könnte sich eher darauf konzentrieren, **Alternativen** (wie Allulose oder L-Arabinose) in seine Ernährung zu integrieren, oder eventuell kleine Experimente mit kommerziell erhältlichen Enzymen und Zuckern machen, um das Prinzip zu verstehen. Eine richtige Eigenproduktion für den täglichen Süßstoffbedarf ist jedoch utopisch. Es ist kein Zufall, dass L-Glucose nie den Weg in den Massenmarkt fand – wie gesagt, nicht weil es ungesund wäre, sondern weil die Herstellung *exzessiv teuer und kompliziert* ist ⁴. Selbst große Firmen haben diesen Plan vor Jahrzehnten verworfen. Stattdessen fließen Investitionen in leichter produzierbare Rare Sugars wie Allulose und Tagatose, die mittels Fermentation oder Enzymtechnik in wesentlich größeren Mengen gewonnen werden können.

5. Rolle künstlicher Intelligenz (KI) bei chiralen Zuckern

Die Entwicklung neuer Produktionswege für chirale Moleküle wie L-Glucose ist ein komplexes Unterfangen – hier kommt **künstliche Intelligenz (KI)** zunehmend ins Spiel. KI und maschinelles Lernen können in mehreren Bereichen helfen:

- **Enzymdesign und -Engineering:** Einer der vielversprechendsten Ansätze, um seltene Zucker effizient herzustellen, ist die Verwendung maßgeschneiderter Enzyme. KI-Methoden (z. B. Deep Learning auf Proteinsequenzen oder strukturbasiertes Design) ermöglichen es heute, Enzyme mit gewünschten Eigenschaften **in silico** zu entwickeln ⁶⁴ ⁶⁵. Unternehmen wie **Arzeda (USA)** nutzen *biophysik-informierte KI-Modelle* und *generative Ansätze* (z. B. Protein-Diffusionsmodelle) um neue Enzyme zu entwerfen ⁶⁴ ⁶⁵. Tatsächlich hat Arzeda kürzlich ein Enzym für einen natürlichen Süßstoff (Stevia-Derivat) auf diese Weise entwickelt ⁶⁵. Ähnliche Technologien könnten verwendet werden, um Enzyme zu schaffen oder zu optimieren, die z. B. L-Glucose aus gängigen Vorstufen erzeugen. Denkbar wäre etwa, mittels *AlphaFold* und Co. ein aktives Zentrum zu designen, das gezielt L-Fructose in L-Glucose umwandelt (falls die natürlichen Isomerasen ineffizient sind). Auch die **Stabilität** und **Ausbeute** bestehender Enzyme lässt sich durch KI-gestützte Mutationsvorhersagen verbessern ⁶⁶ ⁶⁷. Einige Forschungsprojekte nutzen sogenannte *enzymatische Fitness-Modelle*, um aus großen Mutationsbibliotheken die besten Varianten vorherzusagen ⁶⁶. Gerade bei Zucker-aktiven Enzymen (Isomerasen, Epimerasen, Aldolasen) könnte KI helfen, die **Substratspezifität** umzupolen – z. B. ein Enzym so zu ändern, dass es statt D-Zucker L-Zucker umsetzt.
- **Synthesepaltung und -optimierung:** KI-Tools können Chemikern dabei helfen, **Reaktionswege** für komplexe Moleküle zu finden – inklusive chiraler Verbindungen. Moderne *Retrosynthese-Programme* (teilweise KI-gestützt, z. B. IBM RXN oder Schwantes' Chematica/Synthia) durchsuchen riesige

Reaktionsdatenbanken und schlagen Wege vor, wie man ein gewünschtes Zielmolekül aus verfügbaren Startmaterialien herstellen könnte. Für L-Glucose könnte ein solches System z.B. die Kettenverlängerung aus L-Arabinose oder die Inversion an bestimmten Zentren vorschlagen, ggf. auch exotischere Routen mit Zwischenstufen. Zwar muss der Chemiker diese Vorschläge validieren, aber es spart enorme Zeit, *innovative Synthesewege* zu entdecken. In der Industrie wird KI bereits eingesetzt, um Produktionsprozesse zu optimieren – etwa Reaktionsbedingungen (Temperatur, pH, Katalysatoren) mittels **Bayesscher Optimierung** oder Reinforcement Learning effizienter zu finden, als es reines Trial-and-Error könnte. Bei der enzymatischen Herstellung von seltenen Zuckern könnte KI beispielsweise die **optimalen Prozessparameter** (Feed-Strategie, Bioreaktorbedingungen) vorschlagen, indem es aus existierenden Daten lernt.

- **Molekülscreening und Eigenschaften-Vorhersage:** KI hilft auch auf der Seite der *Produktentwicklung*. Wenn es darum geht, **neue süße Moleküle** zu finden – seien es Zuckerderivate oder völlig andere Verbindungen – leisten maschinelle Lernverfahren bereits wertvolle Dienste. Ein aktuelles Beispiel ist die Plattform **ChemSweet**, die ein KI-Modell einsetzt, um potenzielle Süßstoffe mit bestimmten Kriterien aufzuspüren ⁶⁸. Dabei werden gleichzeitig die *Schmeckeigenschaften* und *Sicherheitsprofile* der Moleküle vorhergesagt ⁶⁹ ⁷⁰. Mit ChemSweet identifizierte man jüngst 294 Kandidaten für neue Süßstoffe, die alle Kriterien (Süße, Stabilität, Tox-Profil) erfüllen ⁷¹. Solche Ansätze könnten zur Entdeckung von alternativen Verbindungen führen, die vielleicht einfacher herzustellen sind als L-Glucose, aber einen ähnlichen Nutzen bieten (kalorienfreie Süße). Darüber hinaus gibt es KI-Modelle, die speziell auf **Geschmacksrezeptoren** gerichtet sind – z.B. neuronale Netze, die vorhersagen, ob ein Molekül den menschlichen Süßrezeptor aktiviert ⁷². Dies könnte helfen, *gezielt* nach chiralen Varianten zu suchen, die süß schmecken. Interessant ist in diesem Kontext, dass *L-Glucose für uns genauso süß schmeckt wie D-Glucose* ¹ ⁴ (das haben Geschmackstests gezeigt). KI könnte nun hypothetisch vorhersagen, welche anderen L-Zucker ebenfalls noch Süße haben und vielleicht leichter zugänglich sind.

- **Risikobewertung und Biosecurity:** Ein etwas anderes, aber wichtiges Feld ist die Abschätzung der **Risiken** bei neuartigen bio(techno)logischen Ansätzen – wie z.B. dem oben diskutierten Mirror-Life. Hier kann KI zwar kein Allheilmittel bieten, doch in Zukunft könnten *KI-gestützte Simulationen* helfen, Szenarien durchzuspielen: Wie würde sich ein bestimmter Mikroorganismus in einem komplexen Ökosystem ausbreiten? Welche Mutationen könnten auftreten? Gerade in der Epidemiologie und Ökologie setzen Forscher bereits Machine-Learning-Modelle ein, um Ausbreitungsmuster vorherzusagen. Übertragen auf spiegelbildliche Mikroben könnte man KI nutzen, um potenzielle **Interaktionen** mit der Umwelt zu analysieren (wenn auch die Datenlage hier naturgemäß dünn ist, da es solche Organismen real nicht gibt). Auch in der **Sicherheitsforschung** – zum Beispiel Erkennung von synthetischen Biologie-Experimenten mit Dual-Use-Gefahr – spielt KI eine zunehmende Rolle (Mustererkennung in DNA-Bestellungen etc.). Im Kontext L-Glucose und Rare Sugars ist dies aber eher am Rande relevant. Erwähnenswert: Die Gruppe um die *Mirror Biology Dialogues* hat einen 300-seitigen technischen Bericht veröffentlicht, der zahlreiche Risikoaspekte modelliert ⁷³ – denkbar, dass dabei auch computergestützte Methoden verwendet wurden. Langfristig könnten KI-Systeme auch **biologische Modelle** (digital twins von Organismen) erstellen, um vorherzusagen, wie sich z.B. ein Stoffwechsel umprogrammieren ließe, ohne gefährliche Nebenwege zu eröffnen.

Existierende Projekte/Anwendungen: Es gibt bereits einige spannende Projekte, die KI in diesem Sektor anwenden. Ein Beispiel ist das erwähnte **Arzeda**, das u.a. mit dem Süßstoff-Giganten **Cargill** kooperiert.

Arzeda hat KI-gestützte Enzyme entwickelt, um Stevia-Glykoside nachhaltiger herzustellen ⁶⁵. Das zeigt, dass KI-Design von Enzymen marktreif wird. Auch **DeepMind's AlphaFold** hat indirekt großen Einfluss: Dadurch, dass Proteinstrukturen jetzt für praktisch jedes Enzym vorhersagbar sind, können Forscher Enzyme für Zuckersynthesen viel gezielter modifizieren. Im akademischen Bereich treiben Labore wie das von **David Baker** (Uni Washington) die *De-novo-Design* von Enzymen voran – teils mit KI. Ihr jüngster Durchbruch war die Entwicklung von *Retro-Aldolasen* und anderen Kunstenzymen allein durch Rechenmodelle. Solche Enzyme könnten auch in Zuckersynthese-Kaskaden eingebaut werden. Weiterhin arbeiten Firmen wie **Bonumose** und **Tate & Lyle/Matsutani** (für Allulose und Tagatose) zwar primär mit klassischen Methoden, aber auch dort werden ML-Algorithmen zur **Prozesssteuerung** eingesetzt (z. B. die optimalen Fermentationsparameter zu finden, siehe Endress+Hauser-Fallstudien). Und nicht zuletzt: KI hilft bei der **Datenanalyse** von Experimenten – beispielsweise bei High-Throughput-Screenings von Mutantenbibliotheken für ein Zucker-enzym, um Muster zu erkennen, welche Mutationen die richtige Enantiomerspezifität verleihen.

Fazit (KI): Künstliche Intelligenz entwickelt sich zu einem *wichtigen Werkzeug*, um die Produktion und Anwendung seltener chiraler Zucker voranzubringen. Für L-Glucose spezifisch könnte KI den Durchbruch bringen, indem sie bessere Biokatalysatoren entwirft oder alternative Moleküle findet, die den gleichen Nutzen haben. Auch wenn KI kein Wundermittel ist – man muss die vorgeschlagenen Lösungen immer noch praktisch umsetzen – so **beschleunigt** sie doch Forschung und Entwicklung erheblich. Für Investoren ist KI in der Biotech tatsächlich ein heißes Feld: Startups an der Schnittstelle von KI und SynBio (Synthetic Biology) erhalten zunehmend Aufmerksamkeit, da sie versprechen, ehemals unökonomische Produkte (wie Rare Sugars) plötzlich herstellbar zu machen. Allerdings muss man realistisch sein: Die Erfolge der KI in diesem Sektor sind zwar beachtlich (z. B. ein KI-enzymatischer Süßstoff ist bereits auf dem Markt ⁶⁵), und KI hat hunderte neue Süßstoffkandidaten identifiziert ⁶⁸), aber die tatsächliche *Großproduktion* von L-Glucose hat sie noch nicht ermöglicht. Es bleibt spannend, ob vielleicht in einigen Jahren ein durch KI neu entdecktes oder designtes Enzym auftaucht, das L-Glucose so billig macht, dass es wieder ins Rennen kommt.

6. Forschung, Patente und Unternehmen: Wer arbeitet an linksgedrehtem Zucker?

Wissenschaftliche Veröffentlichungen: In der Literatur gibt es zahlreiche Arbeiten über die Synthese und Anwendung von L-Zuckern. Schon in den 1980ern wurden Syntheserouten für L-Glucose publiziert (z. B. Szarek et al. 1984, siehe *Canadian J. Chem.*) ². In den 2000ern nahm das Interesse wieder zu, getrieben von der Vision kalorienfreier Zucker und der pharmazeutischen Bedeutung von L-Zuckern. Eine vielzitierte Übersichtsarbeit erschien 2013 im *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, die die **Biosynthese seltener Hexosen** beschreibt – darin werden L-Glucose und diverse andere L-Zucker behandelt ¹¹ ⁷⁴. Ebenso entstanden Konzepte wie das **Izumoring** (Ken Izumori et al.), das 2006 vorgestellt wurde und für alle 34 C6-Zucker (D- und L- sowie Zuckeralkohole) mögliche enzymatische Konversionspfade systematisierte ⁷ ⁸. Auf dieses Konzept bauen viele spätere Arbeiten auf, etwa um einzelne Schritte zu verbessern. Des Weiteren sind wissenschaftliche Publikationen zu **L-Glucose-Anwendungen** erschienen: So wurde L-Glucose als insulinneutraler Süßstoff diskutiert und in *Endocrinology*-Studien getestet ⁴; man hat L-Glucose-Pentaacetat als möglichen Wirkstoff für Diabetes Typ 2 untersucht ⁷⁵; und Studien zur Nutzung von L-Glucose als sanftes **Abführmittel** (Colonoskopie-Vorbereitung) wurden publiziert ⁷⁶. Dies zeigt, dass L-Glucose nicht nur ernährungsphysiologisch interessant, sondern auch medizinisch relevant ist. Allerdings ist auffällig: Viele dieser Ideen scheiterten an der mangelnden Verfügbarkeit von L-Glucose. Dies wird oft

direkt in den Papers erwähnt – z. B. „L-Glucose wäre geeignet, wurde aber wegen der exorbitanten Kosten nie weiterverfolgt.“ ⁴ .

In jüngerer Zeit verlagert sich der Fokus der Veröffentlichungen auf **andere Rare Sugars** (Allulose, Tagatose, etc.) und auf **Enzyme**. Zum Beispiel gibt es Patente und Papers zu neuen **Epimerasen** und **Isomerasen** für die Allulose-Produktion (viele aus Japan, Korea, USA). Ebenso sind **Patente** vorhanden, die L-Zucker betreffen: z. B. ein US-Patent 8,642,297 beschreibt die Produktion von L-Ribose und anderen seltenen L-Zuckern mittels Fermentationsverfahren ⁷⁷ . Für L-Glucose selbst existieren Patente aus den 1980ern (wie erwähnt die Isomerisierung L-Glucose ↔ L-Fructose) und neuere Anmeldungen, beispielsweise aus China und Japan, die die *industrielle Massenproduktion* von L-Glucose anstreben ⁷⁸ . Ob diese Patente in die Praxis umgesetzt wurden, ist fraglich – vermutlich eher nicht, da wir am Markt kein L-Glucose sehen.

Forschungsprojekte und Institute: Weltweit gibt es ein paar **Zentren**, die sich auf Rare Sugars spezialisiert haben. Hervorzuheben ist das **International Institute of Rare Sugar** an der Kagawa-Universität (Japan), geleitet von den Pionieren Ken Izumori und Kollegen. Dort wurde nicht nur Allulose erstmals in größeren Mengen produziert, sondern auch ein ganzer “Rare Sugar Supply” aufgebaut. Kagawa ist so etwas wie das Mekka der seltenen Zucker – sie haben u.a. L-Tagatose, L-Sorbose, D-Allose etc. in Zusammenarbeit mit Firmen zur Marktreife gebracht. In den USA gibt es Forschungsgruppen (z.B. an der University of Illinois oder Iowa), die sich mit Biokatalyse für Zucker beschäftigen. **EU-Forschungsprojekte** direkt zu L-Glucose sind mir nicht bekannt, aber es gibt Projekte im Bereich **nachhaltige Sweeteners**, wo Rare Sugars mitbetrachtet werden. Ein EU-Horizon-Projekt namens *Sweet* (fiktiver Name) könnte z.B. sensorische, gesundheitliche und produktionstechnische Aspekte neuer Süßstoffe untersuchen, worin Allulose und Co. eingeschlossen sind.

Start-ups und Unternehmen: Mehrere **Start-ups** widmen sich Rare Sugars oder nutzen KI im Süßstoffbereich. Einige Beispiele:

- **Bonumose (USA)** – Ein Biotech-Unternehmen, das enzymatische Verfahren für *D-Tagatose* und *D-Allulose* entwickelt hat. Bonumose hat eine eigene Produktionsanlage in Virginia aufgebaut und verkündet, mit patentierten Enzymen sehr hohe Ausbeuten (85 %) bei der Tagatose-Herstellung zu erzielen ⁷⁹ . Sie kooperieren mit **ASR Group** (größter Rohrzuckerproduzent) und **Roquette** (Zutatenhersteller), um Tagatose kostengünstig in den Markt zu bringen ⁸⁰ . Tagatose ist ein D-Zucker (Epimer der Galactose) mit ähnlichen Eigenschaften wie Allulose (kalorienarm, gut schmeckend). Bonumose zielt darauf ab, Rare Sugars vom „teuren Nischenprodukt“ zum Massenmarkt zu führen ⁸¹ . L-Glucose gehört zwar (noch) nicht zu ihrem Portfolio, aber ihre Technologie könnte prinzipiell auch für L-Zucker eingesetzt werden.
- **ZuChem (USA)** – Ein Unternehmen, das sich auf **Zucker-Chemie** spezialisiert hat. ZuChem hat biotechnologische Prozesse für mehrere Rare Sugars entwickelt, u.a. L-Galactose und L-Fucose. Laut Pressemeldung bieten sie etwa *L-Galactose in Kilogramm-Mengen* an, ebenso Zwischenprodukte wie **β-L-Glucose-1-phosphat** für die Forschung ⁸² . Das zeigt, dass zumindest in der **B2B-Nische** (z. B. für Impfstoffentwicklung, wo L-Galactose gebraucht wird) L-Zucker verfügbar gemacht werden. ZuChem nutzt Fermentations- und enzymatische Verfahren und hat diverse Patente im Bereich Kohlenhydrat-Produktion.

- **Evolva (Schweiz)** – Bereits erwähnt bei Arabinose. Evolva ist ein synthetische Biologie/Industrial Biotech-Unternehmen, das via fermentative Verfahren naturbasierte Inhaltsstoffe herstellt (Vanillin, Stevia-Glykoside, Resveratrol u.a.). Sie haben auch L-Arabinose im Programm und arbeiten daran, dessen Nutzen wissenschaftlich abzustützen ⁶³. Evolva hat Erfahrung in **Hefe-Stämmen** und könnte in Zukunft auch andere Rare Sugars fermentativ erzeugen (aktuell ist Arabinose der Fokus im Zuckersektor).
- **Sugarlogix (USA)** – ein Start-up (aus Berkeley hervorgegangen), das seltene **Muttermilch-Oligosaccharide** fermentativ herstellt. Indirekt relevant, weil diese komplexen Zucker teils L-Glycosidbindungen enthalten. Zwar geht es ihnen primär um Präbiotika für Säuglingsnahrung, aber es illustriert die Bewegung, mittels gentechnisch veränderter Hefen und Bakterien komplexe Zucker zugänglich zu machen.
- **KI-gestützte Start-ups:** Neben Arzeda (USA) wären hier z. B. **NNAISENSE (Schweiz)** oder **BioXcel** zu nennen, die KI für chemische und biotechnologische Entwicklung anbieten. **Shiru (USA)** kombiniert Daten und KI, um pflanzliche Proteine und Süßstoffe zu finden ⁸³. Solche Firmen könnten zukünftig im Hintergrund auch Rare Sugars designen – etwa digitale Screens, welche Kombination von Enzymreaktionen L-Glucose am effizientesten liefern könnte.

Etablierte Unternehmen: Nicht zuletzt haben große Unternehmen der **Zucker- und Zutatenindustrie** Projekte zu alternativen Zuckern gestartet:

- **Tate & Lyle (UK)** – traditionell Zuckerraffinerie, haben sich zu einem Ingredienzenhersteller gewandelt. Sie arbeiten an Allulose (Koop mit Matsutani) und bieten bereits Polydextrose, Sucralose etc. an. L-Glucose selbst steht bei ihnen nicht im Portfolio, aber sie beobachten natürlich den Süßstoffmarkt genau.
- **Matsutani Chemical (Japan)** – Partner bei Allulose, haben viel F&E in Rare Sugars investiert (Allulose wird in Japan schon seit 2010er Jahren kommerzialisiert, Matsutani war federführend dank Kooperation mit Kagawa-Uni).
- **Cosun Beet Company (Niederlande)** – ein großer Rübenzucker-Hersteller, der diversifiziert. Cosun ist Teil des Allulose-Konsortiums und sieht Rare Sugars als Zukunft für die Zuckerrübe (statt nur klassischen Zucker). Sie könnten Allulose aus Rübenzucker herstellen, sobald erlaubt ⁴⁵.
- **Ingredion (USA)** – Spezialist für Stärken und Süßstoffe, ebenfalls im Allulose-Konsortium. Sie treiben neben Allulose auch Projekte zu **Isomaltulose** (einem langsam verstoffwechselbaren Zucker) und anderen „*Better sugars*“ voran.
- **Cargill (USA) / Beneo (DE)** – zwar nicht direkt L-Glucose, aber allgemein im Süßstoff- und Kohlenhydratinnovationssektor aktiv (Beneo stellt z.B. **Palatinose** her, ein isomerer Zucker mit niedrigem GI). Cargill kooperiert mit Evolva für Stevia und beobachtet Rare Sugars.

Zusammenfassend: Es gibt ein **weltweites Netz** aus Forschungsgruppen, Firmen und nun auch KI-Initiativen, die an der *Zucker-Zukunft* arbeiten. L-Glucose selbst steht nicht mehr allein im Rampenlicht – stattdessen fokussiert man sich auf machbarere Alternativen (Allulose, Tagatose, etc.), welche die gleichen Vorteile (kalorienarm, gesundheitsverträglich) bieten. Allerdings bleibt L-Glucose als *Referenz* interessant:

Sie zeigt, dass die maximal mögliche Verträglichkeit erreichbar ist (100 % Süß ohne Verwertung). Sollte eines Tages die Produktion drastisch vereinfacht werden können (z. B. durch einen von KI designten Biokatalysator oder einen synthetischen Organismus, der sicher im Fermenter bleibt), könnte L-Glucose oder ein analoger **Spiegeldoppelgänger** von herkömmlichen Zucker doch noch seinen Platz im Markt finden.

Chancen und Ausblick: Für **Privatpersonen** bedeutet all das, dass es zwar (noch) keinen L-Glucose-Zuckersteuer für den Küchentisch gibt, aber die Palette an *neuartigen Zuckeralternativen* wächst. Allulose und Tagatose könnten in den nächsten Jahren in Europa zugelassen werden und dann in Light-Produkten auftauchen. L-Arabinose ist jetzt schon eine Option, insbesondere um den eigenen Zuckerkonsum gesünder zu gestalten (etwa durch Beimischung als Blocker). **Kleine Investoren** könnten in Start-ups investieren, die an Rare-Sugar-Technologien arbeiten – ein Bereich, der voraussichtlich an Bedeutung gewinnt, da der Druck steigt, **Zucker zu reduzieren** und gesündere Süßstoffe bereitzustellen. Die Risiken bei manchen hochinnovativen Wegen (wie Mirror-Life) sind allerdings erheblich, weshalb man hier eher auf die konventionelleren Innovationen setzen wird.

Der **neue wissenschaftliche Weg** ist klar multidisziplinär: Chemiker, Biotechnologen und Informatiker (KI) arbeiten zusammen, um das „Problem Zucker“ anzugehen – mit dem Ziel, süße Lösungen zu finden, die unseren Genuss erhalten, aber Gesundheit und Umwelt schonen. L-Glucose war dabei eine der ersten visionären Ideen und bleibt ein interessantes Lehrstück der Wissenschaftsgeschichte. Auch wenn es bislang kein kommerzieller Erfolg wurde, hat die Forschung daran viele Folgeinnovationen inspiriert – und wer weiß, vielleicht feiert der linksgedrehte Zucker in irgendeiner Form doch noch ein Comeback in unserer zukünftigen Ernährung.

Quellen: Die vorstehenden Informationen basieren auf einer Vielzahl von aktuellen Fachartikeln, Patentschriften und Berichten aus der Industrie, darunter Ghosh *et al.* (2024) in *Nature* ²³ ²⁴, Wyss Institute News (2024) ⁸⁴ ²⁶, eine Beilstein-Übersicht zu Rare Sugars (Li *et al.*, 2013) ⁵ ¹⁰, Daten der Allulose Novel Food Consortium ⁵⁰ ⁵³, Angaben der EFSA und FDA zu Allulose ⁴⁸ ⁴⁹, sowie Unternehmensmeldungen von Arzeda ⁶⁵, Bonumose, ZuChem und Evolva ⁵⁵, um nur einige zu nennen. Diese Quellen belegen die technischen Aussagen und unterstreichen den aktuellen Stand von Forschung und Entwicklung in diesem Bereich.

¹ ⁴ ⁷⁵ ⁷⁶ L-Glucose - Wikipedia

<https://en.wikipedia.org/wiki/L-Glucose>

² ³ L-Glucose. A convenient synthesis from D-glucose | Request PDF

https://www.researchgate.net/publication/237860195_L-Glucose_A_convenient_synthesis_from_D-glucose

⁵ ¹⁰ ¹¹ ¹⁴ ¹⁵ ¹⁶ ⁷⁴ BJOC - Biosynthesis of rare hexoses using microorganisms and related enzymes

<https://www.beilstein-journals.org/bjoc/articles/9/281>

⁶ A Short Enzymic Synthesis of L-Glucose from Dihydroxyacetone ...

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jo00118a058>

⁷ ⁸ ⁹ ¹³ Systematization of rare sugar production: Invention and evolution of the production strategy map known as the “Izumoring”

<https://www.glycoforum.gr.jp/article/27A17.html>

12 Transforming monosaccharides: Recent advances in rare sugar ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667160325000067>

17 18 19 20 22 23 24 25 28 29 32 Scientists warn of mirror bacteria risks

https://www.nature.com/articles/d44151-025-00003-7?error=cookies_not_supported&code=ff204b4c-8c4a-4f2d-b86a-2a411ae04882

21 26 27 30 31 73 84 Scientists call for discussion about “mirror life”

<https://wyss.harvard.edu/news/researchers-call-for-global-discussion-about-possible-risks-from-mirror-bacteria/>

33 34 35 40 41 42 45 46 47 50 51 52 53 Allulose approval in Europe to be sought by new ingredients consortium

<https://www.foodnavigator.com/Article/2021/12/07/Allulose-approval-in-Europe-to-be-sought-by-new-ingredients-consortium/>

36 37 38 39 43 44 48 49 Allulose 101: A curious alternative sweetener - Bevi

<https://bevi.co/blog/allulose-sugar/>

54 Scientific Understanding of "Sugar Substitute": A New Wave under ...

<https://www.cirs-group.com/en/food/scientific-understanding-of-sugar-substitute-a-new-wave-under-the-call-of-sugar-reduction>

55 56 57 61 62 63 veriteresveratrol.com

https://veriteresveratrol.com/wp-content/uploads/2021/11/L-Arabinose_Science-Overview.pdf

58 59 60 L-Arabinose Original Powder 100g Powder – SC Nutra

<https://www.sweetcures.co.uk/products/l-arabinose-original-powder>

64 65 Arzeda is using AI to design proteins for natural sweeteners and more | TechCrunch

<https://techcrunch.com/2024/09/17/arzeda-is-using-ai-to-design-proteins-for-artificial-sweeteners-and-more/>

66 Opportunities and Challenges for Machine Learning-Assisted ...

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.3c01275>

67 Navigating the landscape of enzyme design: from molecular ...

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/cs/d4cs00196f>

68 69 70 71 ChemSweet: An AI-driven computational platform for next-gen sweetener discovery - PubMed

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39326310/>

72 Sweetener identification using transfer learning and attention ...

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19476337.2024.2341812>

77 US8642297B2 - Production of L-ribose and other rare sugars

<https://patents.google.com/patent/US8642297B2/en17>

78 Method for producing l-glucose or d-glucose from raw material d ...

<https://patents.google.com/patent/WO2015068724A1/en>

79 Bonumose's technology helps produce plant-based tagatose - GreyB

<https://www.greyb.com/blog/bonumose-technology/>

80 Bonumose Begins Production of Tagatose at New State-of-the-Art ...

<https://asr-group.com/news/bonumose-begins-production-of-tagatose-at-new-state-of-the-art-facility>

81 Roquette and Bonumose team up to enhance scalability of tagatose

<https://agfundernews.com/roquette-and-bonumose-team-up-to-enhance-scalability-of-tagatose-a-low-glycemic-rare-sugar-with-92-of-the-sweetness-of-sugar-and-38-of-the-calories>

82 **Zuchem Expands Rare Sugar Product Offerings**

<https://www.zuchem.com/zuchem-expands-rare-sugar-product-offerings/>

83 **Shiru Launches Global Search for Beverage Partner to Discover and ...**

<https://www.prnewswire.com/news-releases/shiru-launches-global-search-for-beverage-partner-to-discover-and-scale-natural-sugar-replacement-with-ai-powered-ingredient-discovery-302351472.html>